

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Томский политехнический университет»

Е. П. Чинков, А. Г. Багинский

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Второе издание, исправленное и дополненное

**Издательство ТПУ
Томск 2009**

УДК 620.22

Чинков Е. П., Багинский А. Г.

Материаловедение и технология конструкционных материалов:
Учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. –Томск: Изд-во ТПУ,
2009. –180 с.

В учебном пособии в краткой форме изложены закономерности формирования структуры и свойств металлических и неметаллических материалов, используемых в машиностроении. Большое внимание уделено фундаментальным основам теории и технологии термической обработки металлических материалов. Изложены основы технологии литейного производства, обработки давлением, сварки, механической обработки.

Учебное пособие соответствует программе дисциплины и предназначено для студентов немашиностроительных специальностей.

Пособие написано на основе лекций, прочитанных авторами на кафедре «Материаловедения и технологии металлов» ТПУ студентам дневной формы обучения.

УДК 620.22

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензенты:

Б. П. Гриценко – доктор технических наук, профессор
старший научный сотрудник Института физики
прочности и материаловедения СО РАН;

Н. В. Коробейников – главный инженер ООО «Томский
инструментальный завод».

© Томский политехнический университет, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Получение, разработка новых материалов и способы их обработки являются основой современного производства, уровень развития которого определяет научно-технический и экономический потенциал страны. Проектирование конкурентно-способных изделий, организация их производства невозможны без достаточного уровня знаний в области материаловедения и технологии конструкционных материалов.

Материаловедение – наука о строении и свойствах металлических и неметаллических материалов, их взаимосвязи и возможности изменения для рационального использования в технике.

Разнообразие свойств материалов является главным фактором, предопределяющим их широкое применение в технике. В современной технике имеется огромное количество различных устройств, машин и механизмов, строительных конструкций, приборов, оборудования и инструментов, которые работают в жестких условиях износа, а также воздействия высоких нагрузок, агрессивных сред, высоких и низких температур. Для того чтобы обеспечить их работоспособность, надежность и долговечность, инженер должен иметь представление о возможности формирования необходимых свойств современных материалов, уметь ориентироваться во множестве вариантов и владеть основами знаний, необходимых при выборе материала для конкретных деталей и изделий. Кроме того, инженер должен знать возможности прогнозирования необходимых свойств используемых материалов и изготавливаемых из них деталей и изделий.

Технология конструкционных материалов – совокупность знаний о современных методах обработки конструкционных материалов, об оборудовании, применяемом для получения деталей машин с необходимой точностью и качеством, и о рациональном их использовании.

При конструировании машин и оборудования инженер должен иметь представление о взаимосвязи конструкции изделия с технологией ее изготовления. Знать технологические методы получения и обработки заготовок и деталей машин, области их рационального применения, представлять технологические возможности типового оборудования используемого на своем предприятии. Уметь правильно выбрать метод изготовления заготовок и деталей машин в соответствии с требованиями к точности и качеству, и обязательно с учетом условий последующей эксплуатации готового изделия. Уметь выполнить сравнительный анализ различных вариантов технологического процесса.

1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

1.1. Классификация материалов

Материал – вещество (совокупность веществ), из которого изготовлено техническое изделие, имеющее функциональное значение.

Конструкционные материалы – материалы, из которых изготавливаются детали машин, конструкций, работающих под нагрузкой. Эти материалы классифицируются: *по природе* – на металлические, неметаллические и композиционные и др.; *по технологическому признаку* – на деформируемые, литые, спекаемые, свариваемые и др.; *по условиям работы* – на работающие при низких температурах, жаропрочные, коррозионностойкие, износостойкие и др.; *по прочности* – на материалы малой, средней и высокой прочности.

Металлические материалы классифицируются: *по системам сплавов* – на алюминиевые, медные, никелевые сплавы, сплавы на железной основе и др.; *по типу упрочнения* – на закаливаемые, цементуемые, азотируемые и др.; *по структурному составу* – на однофазные, двухфазные, многофазные. **Черные металлы** – железо и сплавы (стали, чугуны) с содержанием железа не менее 50 %. **Цветные** – металлы и их сплавы, имеющие естественную окраску (медь, алюминий, титан и др.). **Благородные** – золото, серебро, платина и др. **Редкоземельные** – лантан, неодим, празеодим и др.

Неметаллические материалы подразделяют по изомерному составу и технологическому исполнению (прессованные, тканые, намотанные, формованные и др.), по типам наполнителей (армирующих элементов) и характеру их размещения и ориентации. **Пластмассы** – материалы на основе высокомолекулярных соединений – полимеров, чаще всего с добавками. **Керамические материалы (керамики)** – порошки тугоплавких соединений: карбиды, окислы, нитриды, бориды. **Керамико-металлические** – керамики с добавлением металлической связки. **Стекла** – окислы различных элементов. **Резина** – материал на основе каучука – углеродно-водородного полимера с добавлением серы и других элементов. **Древесина** – органическая ткань древесных растений.

Композиционные материалы состоят из металлической или неметаллической матрицы (основы) с заданным распределением в ней упрочнителей (волокон, дисперсных частиц и др.). Подразделяются на: *дисперсноупрочненные*, полученные введением в металлическую матрицу дисперсных частиц упрочнителей; *волокнистые*, упрочненные непрерывными волокнами и нитевидными кристаллами; *слоистые*, созданные путем прессования, прокатки разнородных материалов.

Рождение материала происходит в направлении усложнения структуры (рис. 1.1) и отражает определенные уровни его строения. Вещества состоят из атомов и молекул. Атом состоит из ядра и электронов. Силы, связывающие электроны и атомные ядра в атомах, атомы в молекулах, имеют электромагнитную природу.

Движущими силами объединения частиц вещества (твердого, жидкого, газообразного) являются силы взаимного притяжения и отталкивания. Процесс рождения материала осуществляется в направлении

плазма → газ → жидкость → твердое тело
(*атом → молекула → вещество*)

на каждом этапе *сопровождается уменьшением энергии системы*, и поэтому развивается самопроизвольно. Наибольшим запасом энергии вещество обладает в состоянии плазмы. При разрушении (диспергировании) вещества процесс идет в обратном направлении и сопровождается поглощением энергии.

Любой материал есть сложная физико-химическая система. В металловедении системами являются металлы и металлические сплавы.

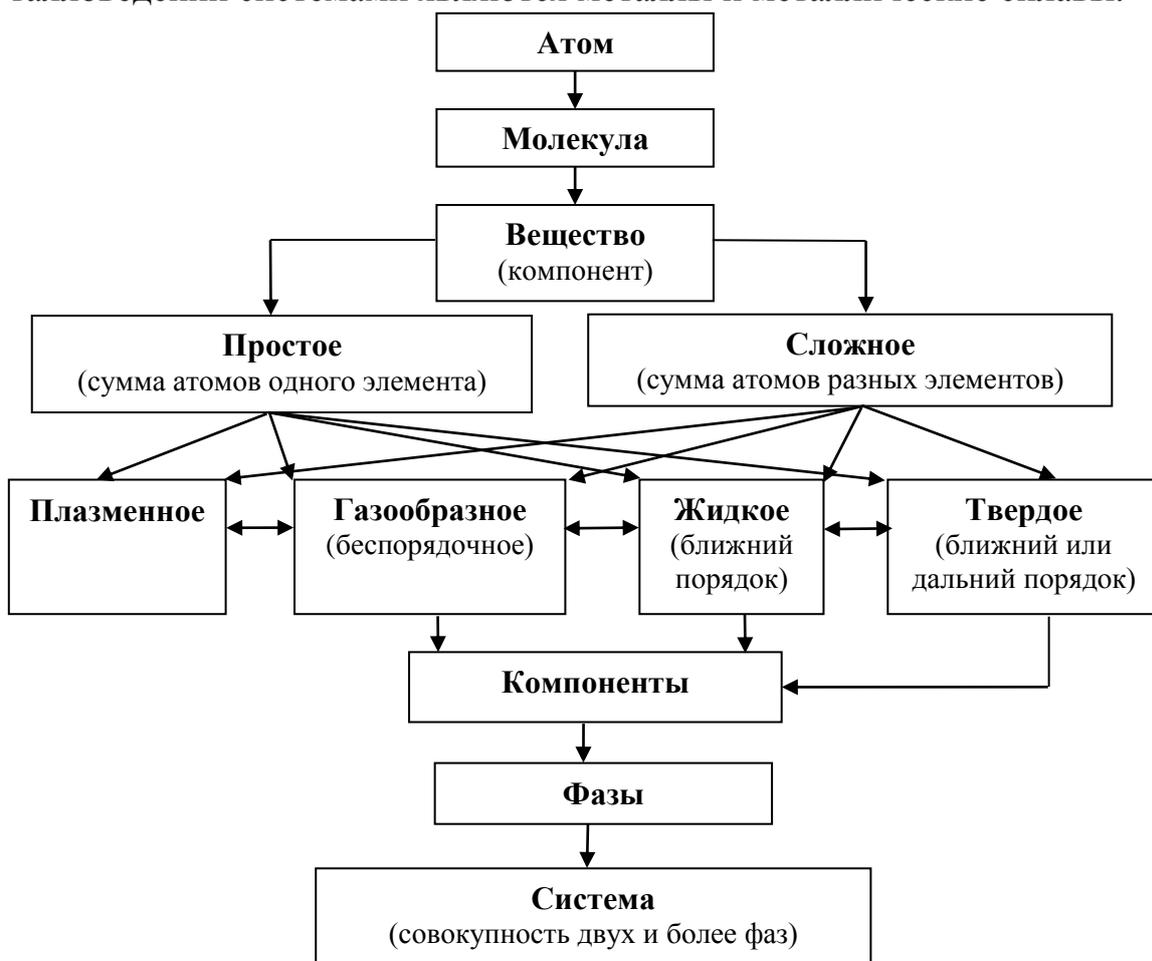


Рис. 1.1. Схема рождения материала

Система – группа тел, выделяемых для наблюдения и изучения. *Компоненты* – минимальное число химически различных веществ, образующих систему (чистые вещества и химические соединения).

Фаза – совокупность однородных частей системы, отделенных от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую свойства, структура и химический состав резко изменяются.

Твердое тело является одним из агрегатных состояний вещества. Оно отличается от других агрегатных состояний (жидкости, газов, плазмы) стабильностью формы. Твердые тела могут быть аморфными и кристаллическими. Аморфное твердое тело можно рассматривать как жидкость с очень большой вязкостью. У кристаллических тел, в отличие от аморфных, присутствует дальний порядок в расположении атомов.

Классификация твердых тел по типу связи.

Химическая связь образуется за счет электростатического взаимодействия между заряженными частицами: катионами и анионами, ядрами и электронами. Энергия химической связи неодинакова для разных твердых тел. Химические связи в кристаллах подразделяются на ковалентные, ионные, металлические и молекулярные. Ионная связь возникает в результате полного или частичного обмена валентными электронами, ковалентная – при частичном обмене. Металлическая связь по природе ковалентная, но обобществляется множество электронов. Силы Ван-дер-Ваальса возникают без обмена зарядами.

Ковалентная (гомеополярная) связь возникает между нейтральными соседними атомами за счет перекрытия их электронных облаков. Обычно она осуществляется двумя электронами с противоположно направленными спинами. В пространстве между ядрами атомов электроны создают состояния с повышенной электронной плотностью. Образовавшийся отрицательный заряд между ядрами стремится приблизить их. Если электронная плотность расположена симметрично между атомами, то ковалентная связь называется *неполярной*. Если электронная плотность смещена в сторону одного из атомов, то ковалентная связь называется *полярной*. Одно из существенных свойств ковалентной связи – *насыщаемость*. При ограниченном числе внешних электронов между ядрами образуется ограниченное число электронных пар вблизи каждого атома (ограниченное число химических связей). Другое важное свойство ковалентной связи – *направленность в пространстве*. Это проявляется в примерно одинаковом геометрическом строении близких по составу химических частиц. Особенность ковалентной связи – *поляризуемость*. Энергия ковалентной связи – сотни килоджоулей на моль. Ковалентные кристаллы – в основном полупроводники и диэлектрики.

Ионная связь образуется за счет кулоновского (электростатического) взаимодействия противоположно заряженных ионов. Такую связь называют *ионной* или *гетерополярной*. Взаимодействие между катионами и анионами не зависит от направления. Об ионной связи говорят как о *ненаправленной*. Каждый катион может притягивать любое число анионов, и наоборот. Ионная связь является *ненасыщенной*. Число взаимодействий между ионами в твердом состоянии ограничивается лишь размерами кристалла. В ионных кристаллах не существует отдельных молекул. «Молекулой» ионного соединения следует считать весь кристалл. Например, в кристалле поваренной соли NaCl каждый положительно (отрицательно) заряженный ион натрия (хлора) окружен соответствующим числом отрицательно (положительно) заряженных ионов хлора (натрия). Ионная связь – сильная связь с энергией от сотен до десятков тысяч килоджоулей на моль. Поэтому твердые тела с ионной связью имеют высокие температуры плавления. Ионные кристаллы – в основном диэлектрики, прозрачны в широком диапазоне частот.

Идеальной ионной связи практически не существует. Даже в тех соединениях, которые относят к ионным, не происходит полного перехода электронов от одного атома к другому и электроны частично остаются в общем пользовании. Так, связь в кристалле фторида лития LiF на 80 % ионная, на 20 % – ковалентная. Поэтому правильнее говорить о *степени ионности* (полярности) ковалентной химической связи.

Металлическая связь. Атомы металлов отличаются от атомов других элементов тем, что слабо удерживают свои внешние электроны. В кристаллической решетке металла эти электроны покидают свои атомы, превращая их в положительно заряженные ионы. Связь возникает вследствие взаимодействия положительных ионов решетки с электронным газом: электроны, находящиеся между ионами стремятся приблизить их друг к другу, уравновешивая силы отталкивания. Межатомные расстояния в металлах больше, чем в их соединениях с ковалентной связью. Энергия металлической связи сравнима с энергией ковалентной связи. Благодаря наличию свободных, не связанных с определенными атомами электронов, металлы хорошо проводят электрический ток и тепло. При нагревании металла колебания катионов усиливаются. Электронам труднее продвигаться между ними, поэтому электрическое сопротивление металла увеличивается.

Металлическая связь существует не только в твердых кристаллах металлов, но и расплавах и аморфном состоянии. Металлическая связь имеет признаки, характерные как для ковалентной, так и для ионной связи. В кристаллах металлов атомы ионизированы не полностью, часть валентных электронов остается связанной. В результате возможно по-

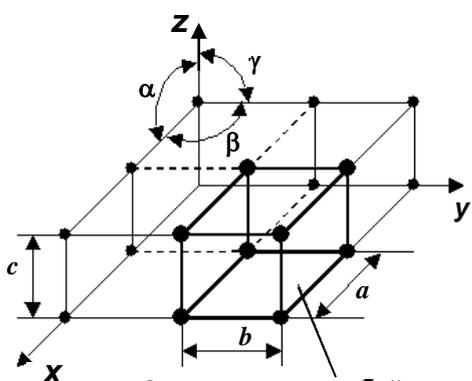
явление ковалентных связей между соседними атомами. Вклады ионной и ковалентной составляющей обнаружены во многих металлах.

Молекулярная связь. Взаимодействие молекул между собой не приводит к разрыву или образованию новых химических связей. В их основе также лежат электрические взаимодействия. В узлах кристаллической решетки находятся определенным образом ориентированные нейтральные молекулы. Они связаны слабыми *ван-дер-ваальсовыми силами*, которые включают все виды межмолекулярного притяжения и отталкивания. *Полярные молекулы*, в которых центры тяжести положительного и отрицательного зарядов не совпадают (HCl , H_2O , NH_3), ориентируются так, чтобы рядом находились концы с противоположными зарядами. Между ними возникает *ориентационное взаимодействие* – притяжение. *Индукционное взаимодействие* возникает между полярными и неполярными молекулами. неполярная молекула становится полярной (поляризуется), молекулы начинают притягиваться друг к другу, только слабее, чем в случае полярных молекул. *Дисперсионное взаимодействие* возникает между неполярными молекулами. Находясь в постоянном движении, электроны создают состояния с повышенной электронной плотностью с одной стороны молекулы, т. е. неполярная молекула станет полярной. Это вызывает перераспределение зарядов в соседних молекулах, между ними устанавливаются кратковременные связи. Если бы молекулы только притягивались друг к другу, то это привело бы к их слиянию. Но на очень малых расстояниях их электронные оболочки начинают отталкиваться – *межмолекулярное отталкивание*.

Типичные кристаллы с молекулярной связью – O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O в твердом состоянии (при низких температурах). В электрическом отношении молекулярные кристаллы являются диэлектриками.

В реальных кристаллах рассмотренные выше связи в чистом виде встречаются редко. Практически всегда имеет место наложение связей.

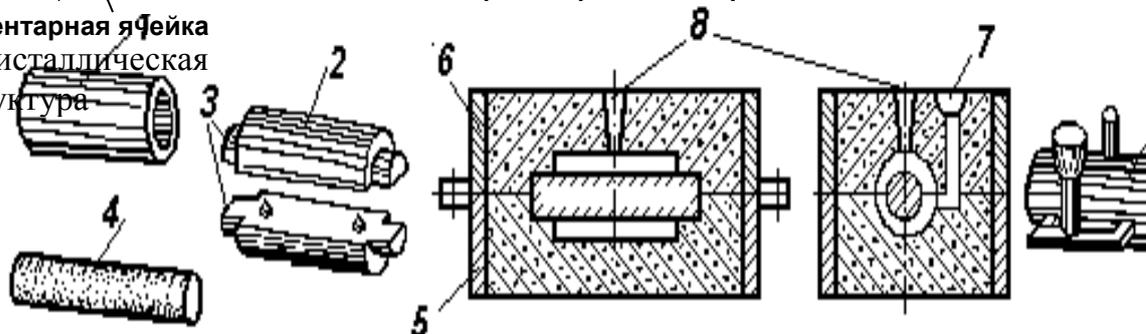
Одна из них имеет преобладающее значение, определяя структуру и свойства твердого тела.



Элементарная ячейка
Рис. 1.2. Кристаллическая структура

1.2. Кристаллическое строение материалов

Кристаллы – твердые тела, обладающие трехмерной периодической



Кристаллическая структура – периодически повторяющаяся в пространстве элементарная часть кристаллической решетки (*элементарная ячейка*). Параметры элементарной ячейки: a, b, c – *периоды решетки* – расстояние между центрами ближайших атомов; *углы между кристаллографическими осями* – α, β, γ ; *координационное число* – количество атомов, расположенных на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома; *базис решетки* – количество атомов в элементарной ячейке (величина базиса и координационное число решетки могут не совпадать); *плотность упаковки* – отношение объема, занятого атомами к объему ячейки. В зависимости от соотношения между величинами a, b, c и α, β, γ различают семь кристаллических структур (рис. 1.3).

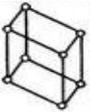
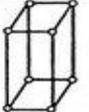
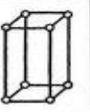
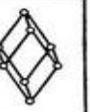
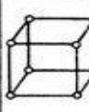
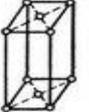
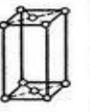
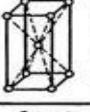
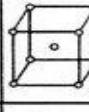
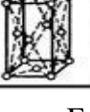
Сингония Тип решетки	Три- клинная	Моно- клинная	Ромби- ческая	Тетраго- нальная	Триго- нальная (ромбоэдр- ическая)	Гексаго- нальная	Куби- ческая
Примитивный							
Базоцентри- рованный							
Объемноцен- трированный							
Гранецентри- рованный							

Рис. 1.3. Решетки Браве. Сингонии:

триклинная – косоугольный параллелепипед: $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$;

моноклинная – параллелепипед: $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$;

ромбическая – параллелепипед: $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;

тетрагональная – параллелепипед: $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;

тригональная – ромбоэдр – куб, вытянутый вдоль пространственной диагонали: $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ, < 120^\circ$;

гексагональная – состоит из трех призм с основанием в форме ромба: $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$;

кубическая – куб со сторонами: $a = b = c$ и углами $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;

В металлах отсутствуют направленные связи, т. к. валентные электроны принадлежат всему кристаллу. Это и определяет высокую симметрию и компактность структур большинства металлических кристаллов. Наиболее распространены следующие кристаллические структуры.

Гранецентрированная кубическая решетка. Атомы находятся в вершинах куба и центре каждой грани. Решетку имеют: Fe $_\gamma$, Cu, Al, Ni.

Объемноцентрированная кубическая решетка. Атомы находятся в вершинах и центре куба – на пересечении его главных диагоналей. Такую решетку имеют: Fe_α, Cr, W, V, Mo.

Гексагональная плотноупакованная решетка. Атомы находятся в вершинах и центрах шестиугольников; центрах боковых граней, чередуясь через грань. Такую решетку имеют: Zn, Mg, Cd, Be.

Тетрагональная решетка бывает объемно- и гранецентрированной. Такую решетку имеют: In, β-Sn, В.

У некоторых металлов (Fe, Ti и др.) кристаллическая структура при изменении температуры может изменяться – явление *поллиморфизма*.

Кристаллографические плоскости и направления.

Плотность упаковки атомов в разных плоскостях и по разным направлениям неодинаковая. Поэтому свойства кристалла в разных направлениях неодинаковы – явление *анизотропии*. Чтобы понять явление анизотропии, необходимо обозначить плоскости и направления в кристалле. Плоскости или прямые, проведенные в кристаллической решетке через ее узлы (атомы), называются *кристаллографическими плоскостями* или *направлениями*.

Для обозначения кристаллографических плоскостей и направлений пользуются *индексами Миллера*. Чтобы установить индексы Миллера, элементарную ячейку кристалла вписывают в пространственную систему координат (рис. 1.4). Оси координат x , y , z называются *кристаллографическими осями*. За единицу измерения вдоль каждой оси принимается период решетки, т. е. длина ребер элементарной ячейки.

Индексы кристаллографических плоскостей. Чтобы найти индексы плоскости простой кубической решетки, нужно: 1) установить координаты точек пересечения плоскости с осями координат, измеренные в постоянных решетки a , b , c ; 2) взять обратные значения этих чисел; 3) привести их к общему знаменателю; 4) отбросить общие знаме-

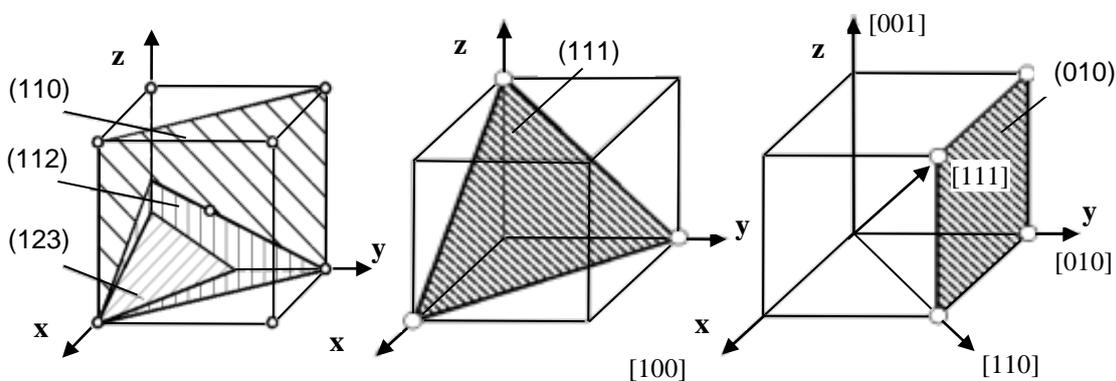


Рис. 1.4. Символы некоторых направлений (показаны стрелками) и плоскостей (заштрихованы) в кубической решетке

натели и заключить в скобки числители этих дробей, переписанные по порядку. Это и будут индексы Миллера (hkl).

Пример 1. Плоскость отсекает на осях координат (x, y, z) отрезки 1, $1/2$, $1/3$ (см. рис. 1.4). Обратные величины: 1, 2, 3. Это целые числа. Символ плоскости – (123). Следует читать: один, два, три.

Пример 2. Плоскость отсекает на осях координат отрезки 4, 3, 2. Обратные величины: $\frac{1}{4} : \frac{1}{3} : \frac{1}{2}$. Приведение к общему знаменателю:

$\frac{1}{4} : \frac{1}{3} : \frac{1}{2} = \frac{3}{12} : \frac{4}{12} : \frac{6}{12}$. Символ плоскости – (346).

Все параллельные плоскости имеют одинаковые индексы. Если плоскость пересекает ось в области отрицательных значений координат, то соответствующий индекс будет отрицательным и знак минус ставится над индексом. Плоскость, параллельная какой-либо координатной оси, имеет по этой оси индекс ноль, так как $1/\infty = 0$.

Зная индексы (hkl) плоскости, можно подсчитать межплоскостное расстояние d между плоскостями данного семейства для кубических кристаллов с периодом решетки a по формуле

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}.$$

Индексы кристаллографических направлений (рис. 1.4). Индексы направления представляют собой три наименьших целых числа, характеризующих положение ближайшего узла, лежащего на данном направлении. Ориентация прямой определяется координатами двух ее точек. При определении индексов направлений необходимо, чтобы одна точка направления совпадала с началом координат. Затем необходимо установить координаты второй точки, в единицах периода решетки. Далее остается привести отношения этих координат к отношению трех наименьших целых чисел (обратные величины при вычислении не рассматриваются). Заключив полученные числа в квадратные скобки, получим индексы кристаллографического направления.

Дефекты кристаллического строения. В кристаллах всегда имеются дефекты, оказывающие влияние на их свойства.

Точечные дефекты. *Вакансии* – отсутствие атомов в узлах решетки. *Атомы внедрения* – внедрение своих или чужих (примесных) атомов в свободное пространство между атомами решетки основы. *Атомы замещения* – замещение атомов в узлах решетки чужими атомами. Около дефектов всегда возникают локальные искажения решетки (рис. 1.5).

Линейные дефекты. *Краевая дислокация* – лишняя атомная полуплоскость, вставленная в какой-то части кристалла (рис. 1.6,а). *Винтовая дислокация* (рис. 1.6,б) может быть получена при помощи сдвигаю-

щего напряжения τ , которое нарушает параллельность атомных слоев. Кристалл превращается в плоскость, закрученную по винту. В отличие от краевой, точечные дефекты к винтовой дислокации не стекают.

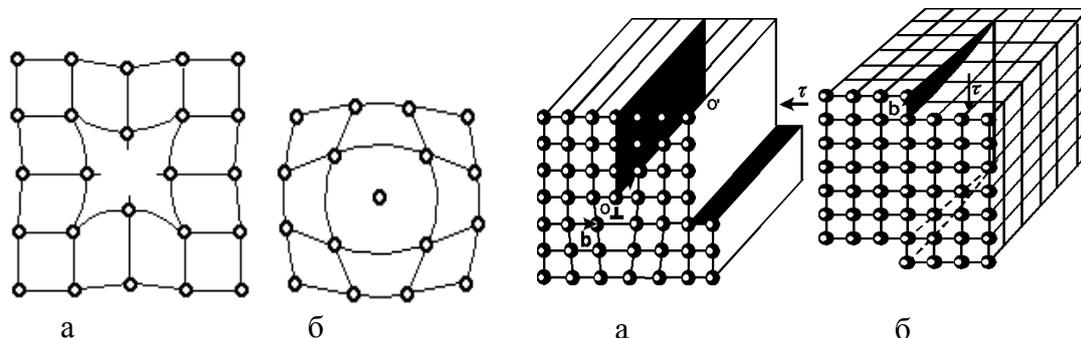


Рис. 1.5. Вакансия (а) и атом в междоузлии (б)

Рис. 1.6. Краевая (а) и винтовая (б) дислокации

Плотность дислокаций (ρ) – суммарная длина дислокаций в 1 см^3 – определяет пластичность и прочность материала. Монокристаллы, нитевидные кристаллы или «усы» (длина 2-10 мм, толщина 0,5-2 мкм) не содержат дислокации, их прочность близка к теоретической прочности железа 20000 МПа (рис. 1.7). Прочность нормальных (отожженных) металлов – 300 МПа при $\rho = 10^6\text{-}10^8 \text{ см}^{-2}$ после холодной деформации увеличивается до 1500 МПа при плотности дислокаций 10^{12} см^{-2} , что соответствует 10^6 км дислокаций в 1 см^3 .



Рис. 1.7. Влияние плотности дислокаций на прочность

Пути повышения прочности.

Создание материала с идеальной кристаллической решеткой. Реализация этого пути представляет большие трудности.

Упрочнение материала дефектами. Это направление осуществляют пластическим деформированием, термообработкой и т. д.

Поверхностные и объемные дефекты – границы зерен, фрагментов и блоков, неметаллические включения, поры.

Границы между зернами одной фазы. Металл состоит из кристаллов (зерен) размером от 1 до 1000 мкм. Если углы разориентации (β) между

зернами составляют несколько десятков градусов, то говорят, что зерна разделяет *большеугольная граница* (рис. 1.8,б). Она представляет собой

зону шириной 5-15 межатомных расстояний с нарушением порядка в расположении атомов. Скопление в этой зоне дислокаций и примесей оказывает существенное влияние на механические свойства металла.

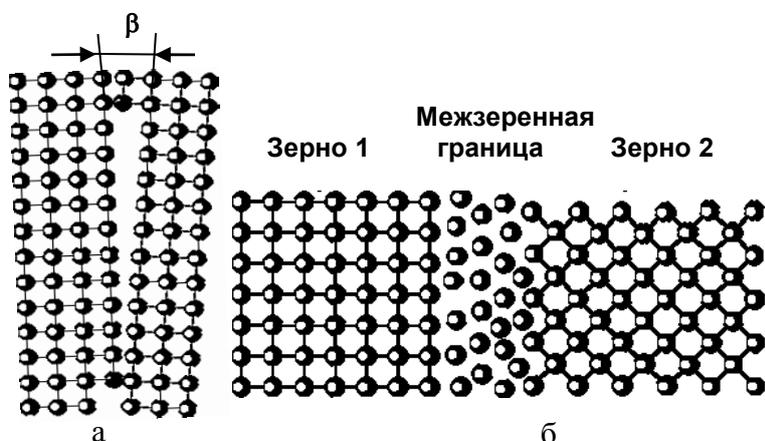


Рис. 1.8. Строение границы между зёрнами:
а – малоугловая; б – большеугловая; β – угол разориентации между соседними зёрнами

Зёрна состоят из более мелких (0,1-1 мкм) блоков (субзёрен), разориентированных относительно друг друга на небольшие углы (менее пяти градусов). Границу между фрагментами, блоками называют *малоугловой* (рис. 1.8,а). Процесс деления зёрен на фрагменты называется *фрагментацией* или *полигонизацией*. Структуру называют *блочной* или *мозаичной*.

Межфазные границы – границы между кристаллами, принадлежащим разным фазам. Различают три типа межфазных границ (рис. 1.9). На *когерентной границе* решётка одной фазы плавно переходит в решётку другой. Несоответствие решёток обуславливает упругую деформацию, изгиб атомных плоскостей на границе. На *полуккогерентной границе* дислокации чередуются с участками сопряжения решёток двух фаз. При большом несоответствии решёток двух фаз, плавное их сопряжение невозможно, межфазную границу называют *некогерентной*.

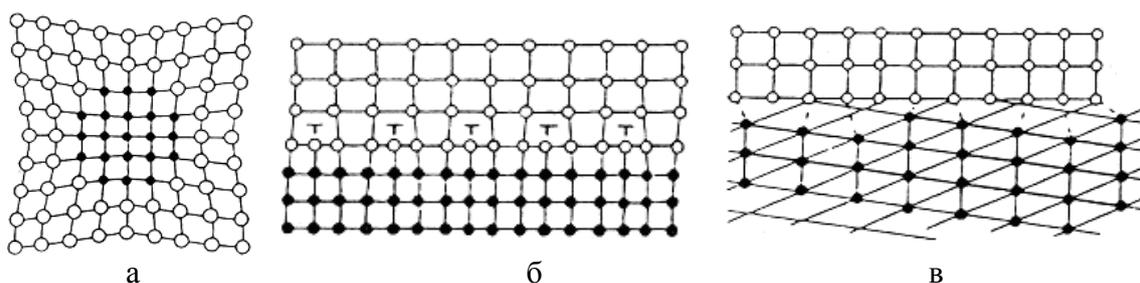


Рис. 1.9. Схема межфазных границ: а – когерентные; б – полуккогерентные; в – некогерентные

Когерентные частицы – выделения в твёрдом растворе (матрице) с когерентной границей раздела между ними и матрицей.

Строение поверхности металла. Структура, фазовый и химический состав *поверхностного слоя* детали отличаются от основного материала, из которого она сделана (рис. 1.10). Зона *1* состоит из адсорбиро-

ванных из окружающей среды атомов и молекул органических и неорганических веществ. Толщина слоя 0,001-1 мкм. Зона 2 состоит из продуктов химического взаимодействия металла с окружающей средой

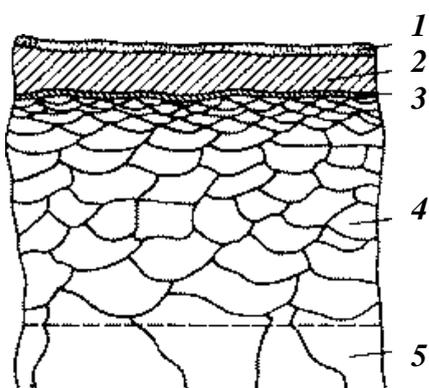


Рис. 1.10. Схема поверхностного слоя детали

(обычно оксидов). Толщина слоя 1-10 мкм. Переходная зона 3 толщиной несколько межатомных расстояний, имеет иную, чем в объеме, кристаллическую структуру. Зона 4, с измененной по сравнению с основным металлом 5 структурой, фазовым и химическим составом, возникает при изготовлении детали и изменяется в процессе эксплуатации. Толщина и состояние поверхностного слоя может изменяться в зависимости от состава материала, метода обработки, условий эксплуатации.

Пути упрочнения материала. Прочностные свойства металла зависят от сил межатомных связей и препятствий – барьеров, которые приходится преодолевать движущимся дислокациям.

Упрочнение за счет торможения дислокаций точечными дефектами решетки (упрочнение твердым раствором). Эффективность механизма определяется количеством точечных дефектов (собственных и примесных). Около дефектов имеются локальные искажения решетки: чем они больше, тем выше сопротивление деформации.

Упрочнение за счет увеличения количества дислокаций. В реальном металле имеется большое количество дислокаций, расположенных в разных плоскостях («лес» дислокаций). Среди них могут быть малоподвижные и неподвижные дислокации, скопления дислокаций. При пластической деформации движущимся дислокациям приходится преодолевать расположенные на их пути «леса» дислокаций. Чем больше дислокаций, тем выше сопротивление деформации.

Упрочнение за счет торможения дислокаций дисперсными частицами. В структуре сплавов могут находиться дисперсные (мелкие) частицы какой-либо фазы: карбиды (Fe_3C , Cr_7C_3 , TiC , $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ и др.), интерметаллические соединения (Co_7W_6 , CuAl_2 и др.), окислы (SiO_2 , Al_2O_3). Эти частицы являются барьерами для движущихся дислокаций. Механизмы преодоления дислокациями дисперсных частиц: перерезание (прохождение через частицы) и прохождение между ними.

Упрочнение за счет торможения дислокаций границами зерен, фрагментов и блоков. На этих границах скапливаются дефекты решетки. Дислокации не могут переходить через границу и начинают тормо-

зяться. Дополнительное напряжение, необходимое для пластической деформации, с учетом преодоления дислокациями границ, обратно пропорционально диаметру зерна. Мелкозернистый металл обладает более высоким сопротивлением деформации, чем крупнозернистый.

1.3. Кристаллизация металлов

Энергетическое состояние любой системы характеризуется запасом внутренней энергии, которая складывается из энергии движения атомов (ионов), электронов, энергии упругих искажений кристаллической решетки и т. д. Часть энергии, которая при изотермических условиях может быть превращена в работу, называется *свободной*:

$$F = U - T \cdot S,$$

где F – свободная энергия, U – полная внутренняя энергия, T – температура; S – энтропия. Чем больше свободная энергия, тем менее устойчива система. Любое вещество может находиться в твердом, жидком или газообразном агрегатных состояниях. Переход в новое состояние возможен, только если оно обладает меньшим запасом свободной энергии.

С ростом температуры свободная энергия F металла в жидком и твердом состояниях, уменьшается (рис. 1.11):

$$dF / dT = - S.$$

Выше *равновесной* или *теоретической температуры* (T_p) кристаллизации металл находится в жидком состоянии, ниже – в твердом. При температуре T_p свободные энергии жидкой и твердой фаз одинаковы.

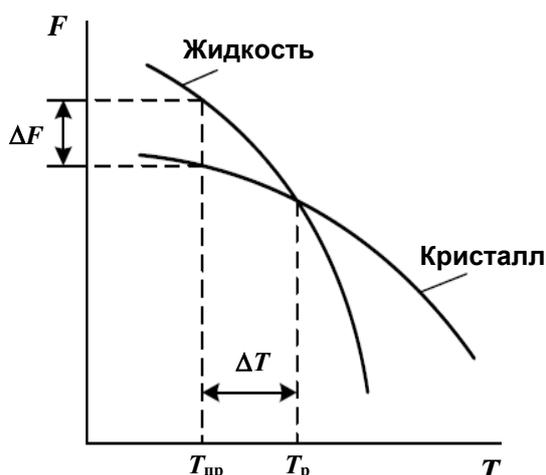


Рис. 1.11. Зависимость свободной энергии от температуры

Изменения энергии не происходит ($\Delta F = F_{ж} - F_{т} = 0$), обе фазы сосуществуют одновременно. Фактически кристаллизация начинается при *практической температуре* ($T_{пр}$) кристаллизации. Охлаждение расплава ниже равновесной температуры называют *переохлаждением* и характеризуют *степень переохлаждения*: $\Delta T = T_p - T_{пр}$.

При равновесной температуре T_p процесс кристаллизации не происходит.

При медленном охлаждении, например, со скоростью V_1 кристаллизация протекает при высокой температуре, близкой к равновесной (см. рис. 1.12). Т. е. при небольшой степени переохлаждения, например, до температуры T_1 (см. рис. 1.13)

число центров кристаллизации мало, скорость роста кристаллов минимальна, и образуются крупные зерна.

С увеличением скорости охлаждения (степени переохлаждения) кристаллизация протекает при более низкой температуре. Центров кристаллизации много, скорость роста кристаллов увеличивается, и обра-

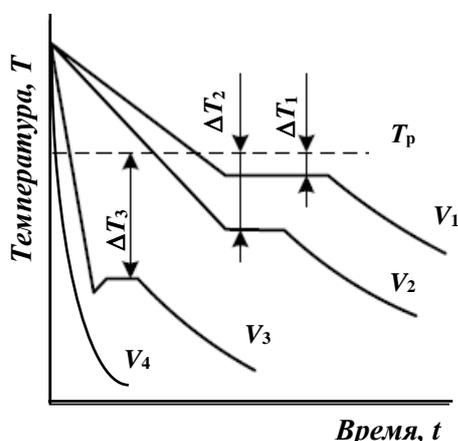


Рис. 1.12. Зависимость степени переохлаждения от скорости охлаждения

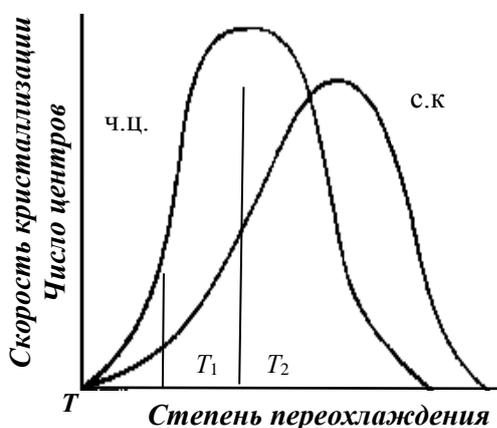


Рис. 1.13. Зависимость числа центров и скорости кристаллизации от степени переохлаждения

зуются мелкие зерна.

При больших скоростях охлаждения (большой степени переохлаждения) число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов равны нулю, образуется аморфная структура — *металлическое стекло*.

Механизм кристаллизации. Около температуры плавления в жидком металле образуются скопления атомов, которые называют *центрами кристаллизации* или *зародышами* (рис. 1.14). Для их образования и роста необходимо уменьшение свободной энергии металла, в противном случае они растворяются. Минимальный размер способного к росту зародыша называется *критическим*, зародыш — *устойчивым*. Зародыши образуются независимо друг от друга. Растущие кристаллы имеют правильную форму. При срастании с другими кристаллами форма наруша-

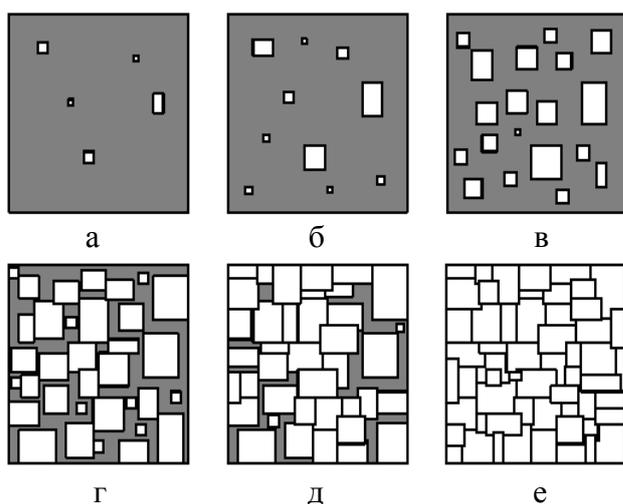


Рис. 1.14. Модель процесса кристаллизации

ются независимо друг от друга. Растущие кристаллы имеют правильную форму. При срастании с другими кристаллами форма наруша-

ется. Рост кристаллов продолжается в направлениях оставшихся участков жидкого металла.

Процесс искусственного регулирования размеров зерен за счет добавления веществ (модификаторов) называется *модифицированием*. Нерастворимые модификаторы служат дополнительными центрами кристаллизации, растворимые – осаждаются на поверхности растущих кристаллов и препятствуют их дальнейшему росту. В качестве модификаторов для алюминиевых сплавов используют титан, ванадий, цирконий, для стали – алюминий, титан и ванадий, для чугуна – магний, церий.

Строение металлического слитка. Кристаллизация на поверхности происходит в условиях сильного переохлаждения (рис. 1.15,а). Образуется много зародышей, сплав имеет мелкозернистую структуру с произвольно ориентированными кристаллами. Жидкий металл под коркой находится в условиях меньшего переохлаждения. Рост кристаллов происходит в направлении, обратном направлению теплоотвода – перпендикулярно стенкам изложницы. Это оси роста первого порядка. На

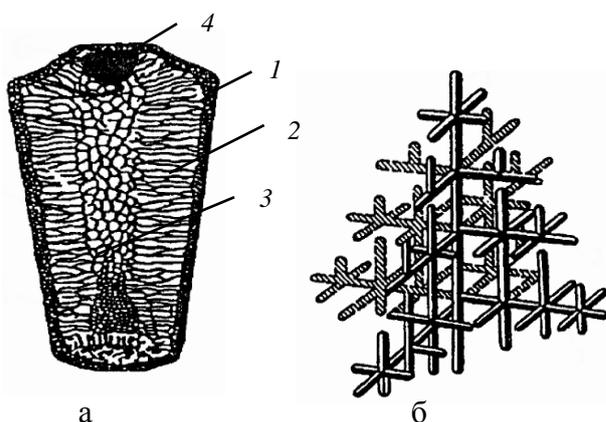


Рис. 1.15. Схема стального слитка (а) и строение дендритного кристалла (б): 1 – корковая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона равноосных кристаллов; 4 – усадочная раковина

них под определенными углами формируются поперечные оси роста второго порядка. На них оси третьего порядка и т. д. Так формируются древовидные кристаллы (рис. 1.15,б) – *дендриты*, образующие зону столбчатых кристаллов. Центральная часть дендрита (оси первого порядка) обогащена тугоплавкими компонентами, периферийная – легкоплавкими. Неоднородность химического состава сплава называют *внутрикристаллической (дендритной) ликвацией*. Теплоотвод от жидкого

металла в центре слитка происходит равномерно, степень переохлаждения минимальна. В этой зоне образуются крупные кристаллы с произвольной ориентацией.

При охлаждении сплав уменьшается в объеме, верхняя корка прогибается, под ней образуется усадочная раковина, заполненная газами. Под раковиной сплав имеет рыхлую структуру, так как жидкий металл стекает вниз для заполнения пустот между кристаллами. Эта часть слитка (около 15-20 % от длины) подлежит отрезке и переплавке.

1.4. Деформация и разрушение металлов

Деформация – изменение формы и размеров тела под действием внешних воздействий.

Механическое напряжение – мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле и действующих на единицу площади поперечного сечения под влиянием внешних воздействий. Единица напряжения в системе СИ – паскаль (Па): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$, $1 \text{ кгс/мм}^2 = 10 \text{ МПа}$.

Напряжения и вызываемые ими деформации возникают при действии на тело внешних сил в результате фазовых и структурных превращений, связанных с изменением объема.

При *упругой деформации* (рис. 1.16,а) происходят небольшие смещения атомов из положения равновесия. Баланс кулоновских сил притяжения и отталкивания, которыми

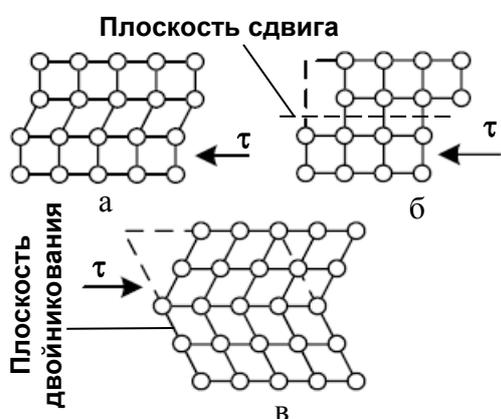


Рис. 1.16. Схема деформации:
а – упругой; б – скольжением;
в – двойникованием

были связаны атомы, нарушается. При снятии нагрузки смещенные атомы под действием кулоновских сил возвращаются в исходное положение, деформация исчезает. С ростом нагрузки начинается *пластическая деформация*, которая остается после снятия нагрузки. Пластическая деформация в кристаллах осуществляется *скользящим* и *двойникованием* (рис. 1.16,б,в). Скольжение (смещение) отдельных частей кристалла

относительно друг друга происходит под действием напряжений больше критической величины. При двойниковании сдвиг происходит в ограниченном объеме на определенную величину, одна часть кристалла становится в положение, симметричное относительно другой.

Скольжение осуществляется в результате перемещения дислокаций по плоскостям и направлениям с наиболее плотной упаковкой атомов (рис. 1.17) и зависит от кристаллической структуры металла, скорости приложения нагрузки, температуры. При приложении касательного

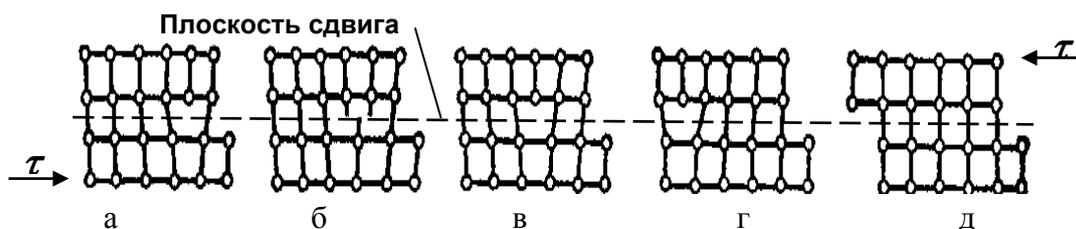


Рис. 1.17. Скольжение краевой дислокации

напряжения (τ) краевая дислокация перемещается вследствие разрыва старых межатомных связей и установления новых (рис. 1.17,б,в). Затем разрываются новые межатомные связи и т. д. Дислокация выходит на край кристалла (рис. 1.17,д). За счет элементарного акта пластической деформации происходит сдвиг на величину межатомного расстояния. Дислокации не обрываются внутри кристалла, а прерываются на других дислокациях или на границах зерен.

Направления скольжения совпадают с направлениями наиболее плотного расположения атомов. Плоскости и направления скольжения в этой плоскости (рис. 1.18) образуют *систему скольжения*. Число систем скольжения в металлах с различным типом решетки неодинаково.

В металлах с ГЦК решеткой (Fe_γ , Cu, Al, Ni, Ag) четыре плоскости скольжения (111) с тремя направлениями скольжения вдоль диагоналей граней [110] в каждой плоскости образуют 12 систем скольжения.

В металлах с ОЦК решеткой (Fe_α , W) плоскости скольжения (110), (112), (123) и направления скольжения вдоль пространственных диагоналей [111] образуют 48 систем скольжения. При пластической деформации металлы с ГЦК решеткой упрочняются сильнее, чем с ОЦК.

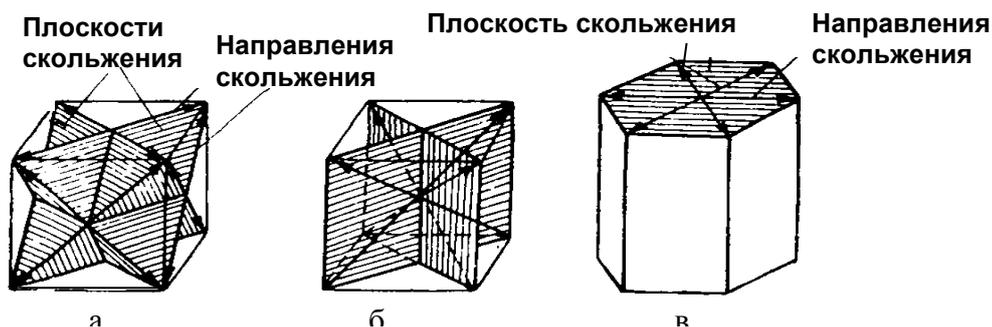


Рис. 1.18. Плоскости (заштрихованы) и направления скольжения (показаны стрелками): а – ГЦК решетка; б – ОЦК решетка; в – ГПУ решетка

В металлах с ГПУ решеткой при $c/a \geq 1,63$ (Mg, Zn) скольжение происходит по плоскости базиса (рис. 1.18,в) и трем направлениям скольжения. Эти металлы менее пластичны и труднее, чем металлы с кубической решеткой, поддаются прокатке, штамповке.

В металлах с ГПУ решеткой при $c/a \leq 1,63$ (Zr, Ti) скольжение происходит по плоскостям базиса, пирамидальным и призматическим плоскостям. Эти металлы более пластичные, чем магний и цинк.

Источник Франка-Рида. Дислокация расположена в плоскости скольжения (плоскости рисунка) и закреплена в точках A и A_1 другими дислокациями или примесными атомами (рис. 1.19). Под действием сдвигающего напряжения τ дислокация выгибается и принимает форму полусферы. Далее распространение дислокации происходит самопроиз-

вольно путем образования двух спиралей. В точке C спирали встречаются. Это приводит к образованию внешней замкнутой петли дислокации и новой дислокации, занимающей исходную позицию A и A_1 . Внешняя петля разрастается до поверхности кристалла (зерна), что приводит к элементарному сдвигу, новая дислокация начинает снова выгибаться. Из одного источника образуются сотни дислокаций.

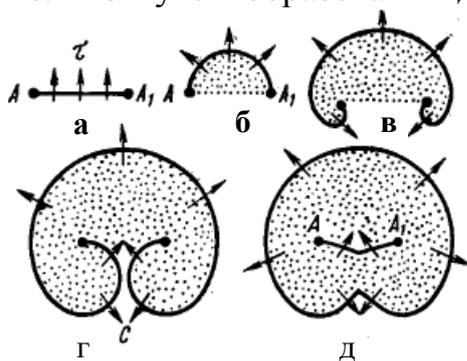


Рис. 1.19. Схема источника Франка-Рида

При деформировании монокристалла дислокации перемещаются бес-

препятственно на большие расстояния, если плоскость скольжения параллельна направлению напряжения. Монокристалл не упрочняется, пластическая деформация велика. Эта стадия легкого скольжения в кристаллах с ГПУ решеткой достигает 1000 %, с ГЦК и ОЦК – 10-15 %. С ростом деформации возникает множественное скольжение – дислокации перемещаются в пересекающихся плоскостях. Плотность дислокаций растет до 10^2 - 10^4 см⁻², сопротивление деформации увеличивается.

При деформировании поликристалла стадия легкого скольжения отсутствует. Достигнув границы зерна, дислокации останавливаются. Напряжения при скоплении дислокаций упруго распространяются через границу и приводят в действие источник Франка-Рида в соседнем зерне. Плоскости и направления скольжения в каждом зерне различны. Зерна деформируются неодинаково, так как ориентированы произвольно по отношению к приложенной нагрузке (рис. 1.20).

С ростом нагрузки деформация зерен сопровождается изгибами и поворотами плоскостей скольжения. Зерна вытягиваются в направлении

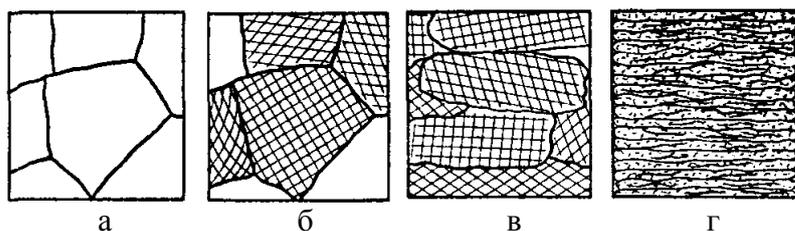


Рис. 1.20. Микроструктуры при пластической деформации: а – $\varepsilon = 0$ %; б – $\varepsilon = 1$ %; в – $\varepsilon = 40$ %; г – $\varepsilon = 80$ %

пластического течения. Концентрация дефектов (дислокаций, вакансий, междоузельных атомов) внутри зерен возрастает.

Эти дефекты затрудняют движение дислокаций: сопротивление деформации растет, пластичность – уменьшается. Явление упрочнения металла при пластической деформации называют *наклепом*. При степенях деформации более 40 % появляется кристаллографическая ориентация зерен – *текстура деформации* (рис. 1.20,г). Внутри зерен дислока-

ции сначала распределены равномерно. С ростом деформации появляется *ячеистая структура*. Ячейки с размером 0,2-3 мкм свободны от дислокаций; границы ячеек – сложно переплетенные стенки дислокаций.

Деформирование двухфазного сплава. Каждая фаза имеет свои плоскости скольжения и критические напряжения сдвига. Процесс деформирования зависит от количества и структуры второй фазы, характера ее распределения. Если хрупкая вторая фаза располагается в виде сетки по границам зерен пластичной матрицы, то сплав будет хрупким. Если хрупкая фаза присутствует в виде отдельных зерен, то сплав сохранит пластичность.

Когда дислокация наталкивается на *когерентные частицы* второй фазы, то она либо их перерезает, либо огибает (рис. 1.21,а), в зависимости от их размеров, прочности и расстояния между ними.

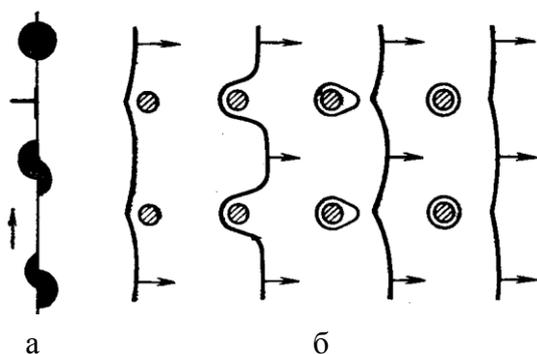


Рис. 1.21. Движение дислокаций в двухфазном сплаве: а – перерезание дислокацией когерентных частиц; б – образование дислокационных петель

Когда дислокация наталкивается на *некогерентные частицы*, то она их только огибает. На рис. 1.21,б показано сначала выгибание, а при больших напряжениях – огибание частиц дислокациями. Оставив вокруг частицы петлю, дислокация скользит в прежнем направлении. При возрастании

напряжений число петель вокруг каждой частицы увеличивается, расстояние между ними уменьшается. Напряжение для движения дислокации между частицами возрастает, прочность металла увеличивается.

Разрушение металлов. Процесс деформации при достаточно высоких напряжениях заканчивается зарождением трещины и ее распространением через все сечение образца – *разрушением*. Если металл претерпевает перед разрушением упругую и значительную пластическую деформацию (более 30 %), то говорят о *вязком разрушении*. При отсутствии или незначительном развитии пластической деформации происходит *хрупкое разрушение*. Для хрупкого разрушения характерна острая, ветвящаяся трещина, для вязкого наоборот – тупая, раскрывающаяся трещина. Абсолютно вязкое разрушение характерно для такого материала, как сырая глина; абсолютно хрупкое разрушение свойственно алмазу. Большин-



Рис. 1.22. Образование трещины при скоплении дислокаций у препятствия

Рис. 1.22. Образование трещины при скоплении дислокаций у препятствия

ству технических материалов присуще и вязкое, и хрупкое разрушение, разделение проводится условно по преобладанию того или иного вида. Механизм зарождения трещины при хрупком и вязком разрушении одинаков. Возникновение зародыша трещины происходит при скоплении дислокаций перед препятствием (границы зерен, межфазовые границы, включения), что приводит к возникновению концентратора напряжений, достаточных для образования микротрещины (рис. 1.22).

Влияние нагрева на структуру деформированного металла. До

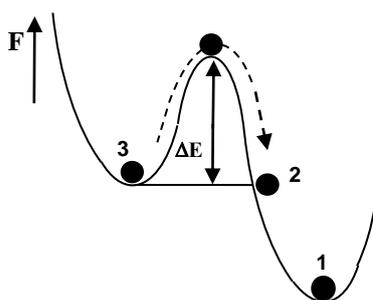


Рис. 1.23. Изменение свободной энергии

пластической деформации металл находится в *равновесном состоянии 1* (рис. 1.23) с минимальным запасом свободной энергии. Большая часть работы (до 95 %), затрачиваемой на деформацию металла, превращается в теплоту – металл нагревается. Система переходит в *неравновесное состояние 2*. Часть энергии (5-10 %), затрачиваемой при деформации на образование большого числа дефектов кристаллического строения, накапливается в металле.

Плотность дислокаций в зависимости от степени деформации увеличивается от 10^6 - 10^8 до 10^{10} - 10^{12} см⁻². Система переходит в *метастабильное состояние 3*, устойчивое при комнатной

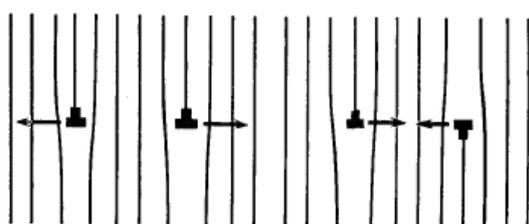


Рис. 1.24. Схема взаимодействия дислокаций, лежащих в одной плоскости скольжения

температуре. При нагреве преодолеваются барьеры ΔE для диффузии точечных дефектов и движения дислокаций. Система возвращается в равновесное состояние *1*.

Процессы, происходящие при нагреве, подразделяют на возврат и рекристаллизацию, которые сопровождаются уменьшением свободной энергии. Возврат происходит при низких температурах, рекристаллизация – при более высоких.

Возврат. Форма зерен при возврате не изменяется. При низких температурах нагрева протекает *первая стадия возврата – отдых*. Уменьшается концентрация собственных точечных дефектов (сток к границам и взаимоуничтожение). Дислокации одинаковых знаков отталкиваются друг от друга, противоположных – притягиваются и аннигилируют (рис. 1.24), т. е. восстанавливаются атомные плоскости. Остаются хаотично расположенные дислокации преимущественно одного знака. Отдых металла снимает внутренние напряжения, уменьшает на 10-15 % твердость и прочность.

При более высоких температурах нагрева протекает *вторая стадия*

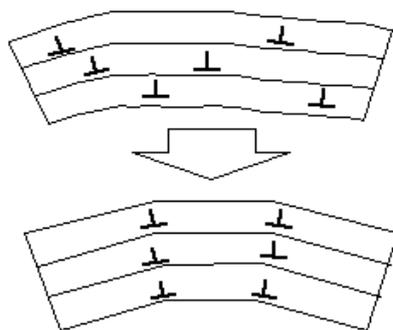


Рис. 1.25. Трансформация дислокационной структуры при полигонизации

возврата – полигонизация. В зернах образуются новые малоугловые границы в результате скольжения и переползания дислокаций. Зерно делится на субзерна – *полигоны*, свободные от дислокаций. Дислокации скапливаются на границах полигонов, образуя стенки (рис. 1.25). Полигонизация наблюдается не у всех металлов: редко развивается в меди и ее сплавах, хорошо выражена в сплавах алюминия и железа. При деформировании сплавов сложного состава полигонизация приводит к возникновению

стабильной ячеистой структуры. Дислокации скапливаются на границах ячеек и вступают во взаимодействие с атомами и дисперсными частицами второй фазы. Ячеистая структура сохраняется при значительном нагреве. Сплавы не рекристаллизуются. При нагреве деформированных металлов процесс отдыха происходит всегда, полигонизация – при определенных условиях.

Первичная рекристаллизация – образование зародышей новых зерен и последующий рост. Зародыши возникают на участках с повышенной

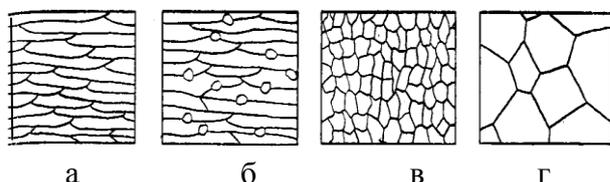


Рис. 1.26. Изменение микроструктуры наклепанного металла при нагреве: а – наклепанный металл; б, в – начало и конец первичной рекристаллизации; г – собирательная рекристаллизация

плотностью дислокаций, где сосредоточены наибольшие искажения решетки – у границ деформированных зерен, блоков (рис. 1.26). Чем больше степень пластической деформации, тем больше возникает зародышей. Зародыши растут путем диффузии к ним атомов от деформированных участков.

Для начала рекристаллизации необходимы следующие условия.

1. *Критическая степень деформации* металла (например, для алюминия – 2 %, для железа и меди – 5 %). При меньшей степени деформации зарождения новых зерен при нагреве не происходит.

2. *Температурный порог рекристаллизации* – наименьшая температура нагрева, обеспечивающая возможность зарождения новых зерен:

$$T_{рек} = \alpha \cdot T_{пл}.$$

Коэффициент α зависит от чистоты металла и степени деформации. Металл после холодной деформации со степенью $\varepsilon = 80 \%$ рекристалли-

зуются при более низкой температуре, чем после деформирования со степенью $\varepsilon = 20\%$. Для металлов технической чистоты $\alpha = 0,3-0,4$, твердых растворов $\alpha = 0,5-0,6$. Для алюминия, меди и железа технической чистоты $T_{\text{рек}}$ равна соответственно: 100, 270 и 450 °С.

Первичная рекристаллизация полностью снимает наклеп. После ее завершения происходит рост образовавшихся зерен – *собирательная рекристаллизация*. При высоких температурах зерна самопроизвольно укрупняются за счет слияния и объединения границ. Свободная энергия металла уменьшается вследствие уменьшения поверхностной энергии (чем крупнее кристаллы, тем меньше протяженность границ). Заключительный этап – *вторичная рекристаллизация*, сопровождается неравномерным ростом отдельных зерен по сравнению с другими. Формируются зерна-гиганты и зерна-карлики.

1.5. Свойства материалов и методы их испытаний

Свойство – количественная или качественная характеристика материала, определяющая его общность или различие с другими материалами. Механические свойства определяют поведение материала при деформации и разрушении под действием внешних нагрузок. В зависимости от условий нагружения механические свойства могут определяться при *статическом* (нагрузка возрастает медленно и плавно), *динамическом* (ударный характер нагрузки) и *циклическом нагружении* (нагрузка многократно меняется по величине или направлению).

Испытания на растяжение. При испытании металлов на растяжение получают характеристики прочности и пластичности (ГОСТ 1497-84). *Прочность* – способность материала сопротивляться деформациям и разрушению. *Пластичность* – способность материала к пластической деформации без разрушения.

Деформацию растяжения характеризуют *абсолютным удлинением* или *абсолютной деформацией* Δl , равной разности длин образца после растяжения l_k и исходной l_0 : $\Delta l = l_k - l_0$. В процессе испытания регистрируется первичная диаграмма растяжения в координатах «нагрузка P – абсолютное удлинение Δl » (рис. 1.27). Чтобы исключить влияние размеров и формы деталей, испытания проводят на стандартных образцах, имеющих в поперечном сечении форму круга или прямоугольника. Результаты пересчитывают в относительные величины: прикладываемую нагрузку – в механическое напряжение $\sigma = \frac{P}{F_0}$; абсолютную деформа-

цию – в относительную $\sigma = \frac{\Delta l}{l_0}$, где F_0 – площадь поперечного сечения образца до деформации. Построенная диаграмма называется *диаграммой условных напряжений*, поскольку площадь образца в процессе испытания изменяется.

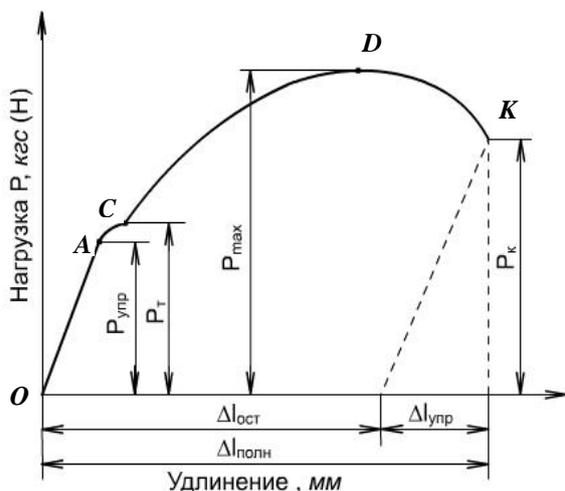


Рис. 1.27. Диаграмма растяжения пластичного металла

На диаграмме растяжения выделяют следующие участки деформации: упругой до нагрузки $P_{упр}$; пластической от $P_{упр}$ до P_{max} ; разрушения от P_{max} до P_k .

Прямолинейный участок диаграммы OA указывает на пропорциональную зависимость между нагрузкой P и удлинением Δl . Тангенс угла наклона к оси абсцисс характеризует *модуль упругости Юнга*: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$.

Деформирование выше $P_{упр}$ идет при возрастающей нагрузке до P_{max} , т. к. металл упрочняется. Наклеп продолжает увеличиваться, хотя растягивающая нагрузка уменьшается от P_{max} до P_k . Это связано с появлением в образце местного утончения – *шейки*, в которой развивается основная пластическая деформация. Растягивающие напряжения в шейке растут, пока при нагрузке P_k не происходит разрушение.

Пределы пропорциональности $\sigma_{упр}$, текучести σ_T и прочности σ_B определяются как отношение соответствующей нагрузки к исходной площади поперечного сечения образца F_0 .

Теоретический предел упругости ($\sigma_{упр}$) – максимальное напряжение $P_{упр}$, до которого образец получает только упругую деформацию. Определить его трудно, поэтому используют *условный предел упругости* – напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,005-0,05 % от начальной длины образца, которую указывают в обозначении.

Предел текучести – сопротивление материала небольшой пластической деформации. *Физический предел текучести* – напряжение P_T , при котором происходит увеличение деформации образца при постоянной нагрузке. На диаграмме растяжения появляется площадка текучести. У большинства сплавов ее нет. *Условный предел текучести* ($\sigma_{0,2}$) – напряжение, которому соответствует пластическая деформация 0,2 %.

Таблица 1.1

Классификация сплавов по прочности

Класс материалов	$\sigma_{0,2}$, МПа		
	Fe – сплавы (стали)	Al– сплавы	Ti – сплавы
Низкой прочности	650	200	400
Средней прочности	650-1300	200-400	400-800
Высокой прочности	1300-1400	400	800

Предел прочности (временное сопротивление разрыву) – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения: $\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}$.

Пластичность материала характеризуется *относительным удлинением* δ и *относительным сужением* ψ :

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

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

где F_k – площадь поперечного сечения в месте разрыва. Принято считать металл «надежным» при $\delta \geq 15 \%$ и $\psi \geq 45 \%$.

Испытания на изгиб. При испытании на изгиб в образце возникают растягивающие и сжимающие напряжения. По этой причине изгиб – более мягкий способ нагружения, чем растяжение. На изгиб испытывают малопластичные материалы: чугуны, инструментальные стали, стали после поверхностного упрочнения, керамику. Испытания проводят на образцах большой длины цилиндрической или прямоугольной формы, которые устанавливают на две опоры. Используют две схемы нагружения: *сосредоточенной силой* (применяют чаще) и двумя симметричными силами (*испытания на чистый изгиб*). Определяемыми характеристиками служат предел прочности и стрела прогиба.

Испытание на сжатие. Для чугуна, литых алюминиевых сплавов и прочих хрупких материалов применяют испытания на сжатие. Эти материалы разрушаются при растяжении путем отрыва, а при сжатии – срезом. При испытании определяют *предел прочности на сжатие*.

Твердость – сопротивление материала проникновению в него стандартного тела (*индентора*), не деформирующегося при испытании. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем выше твердость. Наиболее распространены методы Бринелля, Роквелла и Виккерса (рис. 1.28).

Метод Бринелля. Индентор – стальной закаленный шарик. Диаметр ($D = 2,5; 5; 10$ мм) и величину нагрузки P выбирают в зависимости

от твердости и толщины изделия. Для термически необработанной стали и чугуна $P = 30 D^2$, для бронзы и латуни $P = 10 D^2$, свинца и других мягких металлов $P = 2,5 D^2$. Диаметр отпечатка измеряется в двух направлениях при помощи лупы Бринелля. Число твердости обозначается «*НВ*» и определяется как отношение приложенной нагрузки к площади сферической поверхности отпечатка:

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

где P – нагрузка на шарик (кгс); d – диаметр отпечатка (мм). Твердость по шкале Бринелля выражают в Н/мм² или МПа. Для перевода в единицы СИ необходимо умножить число твердости в кгс/мм² на 9,81.

Временное сопротивление и число твердости по Бринеллю связаны между собой следующими соотношениями: для стали $\sigma_B = 0,34 HB$; для медных сплавов $\sigma_B = 0,53 HB$; для алюминиевых сплавов $\sigma_B = 0,37 HB$.

Метод Роквелла. Предварительная нагрузка $P_0 = 98,07$ Н (10 кгс) необходима для того, чтобы исключить влияние упругой деформации и шероховатости поверхности образца на результаты измерений. В течение некоторого времени действует общая нагрузка: $P = P_0 + P_1$. Значение твердости определяют по глубине вдавливания.

Для испытания мягких (до 230 *НВ*) материалов используется стальной шарик диаметром 1,588 мм. Нагрузка $P_1 = 980,7$ Н (100 кгс). Твердость отсчитывают по шкале «*В*» и обозначают «*HRB*».

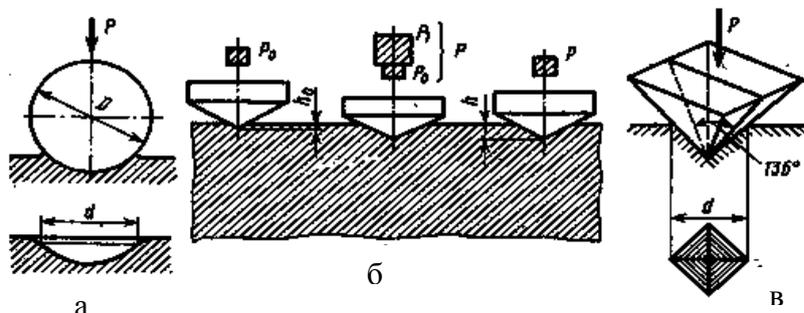


Рис. 1.28. Схемы определения твердости:
а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Для металлов с высокой твердостью применяют алмазный конус с углом при вершине 120 ° и нагрузку $P_1 = 1471$ Н (150 кгс). Твердость отсчитывают по шкале «*С*» (от 20 до 70 единиц), обозначают «*HRC*».

Для металлов с высокой твердостью применяют алмазный конус с углом при вершине 120 ° и нагрузку $P_1 = 1471$ Н (150 кгс). Твердость отсчитывают по шкале «*С*» (от 20 до 70 единиц), обозначают «*HRC*».

Для металлов с высокой твердостью применяют алмазный конус с углом при вершине 120 ° и нагрузку $P_1 = 1471$ Н (150 кгс). Твердость отсчитывают по шкале «*С*» (от 20 до 70 единиц), обозначают «*HRC*».

При испытании очень твердых материалов или тонких поверхностных слоев используют алмазный конус и нагрузку $P_1 = 588,4$ Н (60 кгс), твердость отсчитывают по шкале «*С*», но обозначают «*HRA*».

Метод Виккерса. Твердость по Виккерсу «*HV*» определяется по размеру отпечатка алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136 ° и нагрузке P от 10 до 1000 Н. Нагрузка ниже 50 Н используется для определения твердости тонких изделий и упрочненных

поверхностных слоев металла. Диагональ отпечатка измеряют при помощи микроскопа, установленного на приборе. Число твердости определяют по формуле: $HV = 0,189 P \cdot d^2$. Числа твердости по Виккерсу и по Бринеллю для материалов, имеющих твердость до 450 *НВ*, совпадают.

Микротвердость определяют вдавливанием в поверхность алмазной пирамиды при небольших нагрузках (0,01-2 Н). Размер диагонали отпечатка индентора определяют штатным микроскопом. По формуле (как для метода Виккерса) определяют число твердости.

Динамический метод (по Шору). Шарик бросают на поверхность материала с заданной высоты, он отскакивает на определенную величину. Чем больше величина отскока, тем тверже материал.

Метод царапания (по Моосу). Шкала относительной твердости

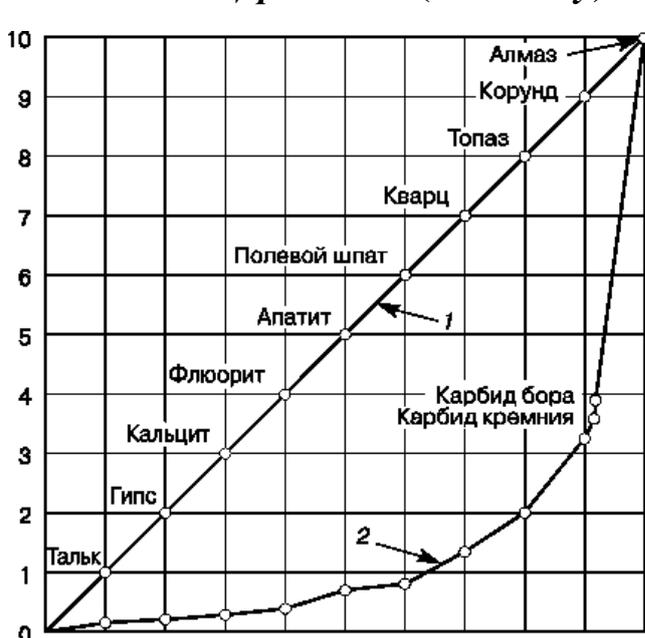


Рис. 1.29. Твердость минералов по шкале Мооса: качественная (1) и количественная (2) оценка

минералов состоит из 10 этапов твердости (рис. 1.29): тальк – 1 (24); гипс – 2 (360); кальцит – 3 (1090); флюорит – 4 (1890); апатит – 5 (5360); полевой шпат – 6 (7950); кварц – 7 (11200); топаз – 8 (14270); корунд – 9 (20600); алмаз – 10 (100600). В скобках – значения микротвердости минералов в МПа. Из представленных данных видно, насколько алмаз тверже наиболее твердых материалов. Если эталон с твердостью 5 царапает образец, который царапает эталон с твердостью 4, то относительная твердость образца – 4,5.

Ударная вязкость характеризует способность материала сопротивляться хрупкому разрушению. Испытания проводят на образцах определенной формы и размеров. Ударную вязкость обозначают *KCV*, *KCU* и *KCT*. Где *KC* – символ ударной вязкости, третий символ показывает вид надреза на образце: острый (*V*), с радиусом закругления (*U*), наведенная трещина (*T*).

Образец устанавливают на маятниковом копре (рис. 1.30) надрезом в сторону, противоположную удару маятника, который поднимают на высоту *H*. На разрушение образца затрачивается работа $A = P \cdot (H - h)$, где *P* – вес маятника, *h* – высота подъема маятника после удара. Удар-

ная вязкость определяется как отношение работы разрушения к площади поперечного сечения (F) в месте надреза [$\text{Дж}/\text{см}^2$ ($\text{кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$)].

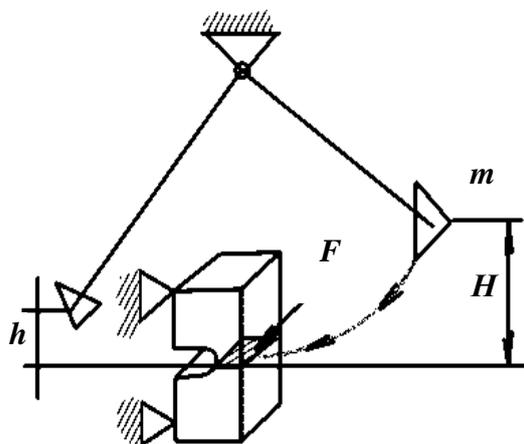


Рис. 1.30. Схема маятникового копра

Значение $KС$ зависит от температуры. Для многих конструкционных материалов существует пороговая температура, при которой характер разрушения меняется скачкообразно (*порог хладноломкости*). Ниже данной температуры имеет место хрупкое разрушение (малая работа разрушения, склонность к образованию трещин), выше – вязкое разрушение (трещины распространяются с трудом). Для определения порога

хладноломкости образцы испытывают при различных температурах и строят кривые в координатах – «ударная вязкость – температура».

Хладноломкость – склонность металла переходить в хрупкое состояние с понижением температуры. Хладоломкими являются железо, вольфрам, цинк и другие металлы, имеющие ОЦК и ГПУ решетки.

Усталость – постепенное накопление повреждений в материале при повторных знакопеременных напряжениях, не превышающих предела текучести приводящее к разрушению.

Выносливость – свойство металлов сопротивляться усталости.

Предел выносливости – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за базовое число циклов нагружения без разрушения.

Технологические свойства характеризуют способность материала подвергаться разным способам обработки.

Литейные свойства – определяются способностью материала к получению качественных отливок без трещин, раковин и других дефектов. Основные показатели: *жидкотекучесть* – способность жидкого металла заполнять полость литейной формы; *усадка (линейная, объемная)* – уменьшение объема материала в процессе затвердевания и охлаждения; *ликвация* – неоднородность химического состава отливки по объему.

Способность к обработке давлением – способность материала поддаваться пластической деформации в холодном и нагретом состоянии под действием внешних нагрузок без разрушения. Оценивается по степени допустимой деформации и силе сопротивления деформации.

Свариваемость – способность материала образовывать неразъемные соединения. Оценивается по качеству и прочности сварного шва.

Способность к обработке резанием – способность материала поддаваться обработке режущим инструментом. Оценивается по стойкости инструмента и качеству обработанной поверхности.

Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях.

Износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения. Количественный показатель: потеря массы материала детали с поверхности за время работы.

Коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться действию агрессивных кислотных, щелочных сред. Количественные показатели: *скорость электрохимической коррозии*, оцениваемая по изменению массы металла или линейных размеров образца; *степень изменения механических свойств*, оцениваемая по влиянию повреждений поверхности на материал.

Жаростойкость – способность материала сопротивляться поверхностному окислению в газовой среде при высокой температуре. Количественные показатели: *скорость окисления*, оцениваемая по изменению массы металла или толщины оксидной пленки на поверхности; *допустимая рабочая температура металла*, при которой скорость окисления не превышает заданного значения.

Жаропрочность – способность материала сохранять характеристики механической прочности при высоких температурах.

Антифрикционность – способность материалов образовывать прочные граничные слои, уменьшающие трение, а также легко (упруго или пластически) деформироваться или изнашиваться. Это способствует равномерному распределению нагрузки по поверхности соприкосновения (свойство прирабатываемости).

К антифрикционности также относят микрогеометрическое строение поверхности (степень шероховатости или пористости) и способность материала «поглощать» твердые абразивные частицы, попавшие на поверхность трения, предохраняя тем самым детали от износа.

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ

В металловедении системами являются чистые металлы и металлические сплавы. *Сплавы* – твердые вещества, которые получают сплавлением двух или более веществ (компонентов). Возможны другие способы изготовления сплавов: спекание, электролиз, возгонка. Такие сплавы называют *псевдосплавами*.

Структура сплава (микроструктура) – строение металлографического шлифа сплава, наблюдаемое при помощи микроскопа. Образец сплава шлифуется и полируется, затем поверхность шлифа обрабатывается (протравливается) раствором кислоты (для растворения границ раздела фаз и отдельных зерен). Ямки травления хорошо рассеивают свет и видны в металлографический оптический микроскоп в виде участков темного цвета.

2.1. Строение сплавов

Строение сплава, структура и окончательные свойства зависят от вида взаимодействия компонентов сплава при кристаллизации. Металлы в жидком состоянии хорошо растворяются друг в друге, в твердом могут образовать механические смеси, твердые растворы, химические соединения.

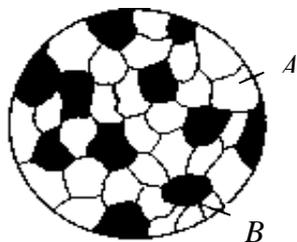


Рис. 2.1. Механическая смесь компонентов

Механические смеси образуются, если компоненты не вступают в химические реакции и не растворяются друг в друге в твердом состоянии. Механическая смесь (рис. 2.1) состоит из зерен компонентов *A* и *B*, имеющих собственные кристаллические решетки. Примеры таких сплавов: Fe-Al , Si-Al , Pb-Sb .

Твердые растворы образуются, когда компоненты частично или полностью растворяются друг в друге (рис. 2.2). Первый компонент (*A*) образует собственную кристаллическую решетку, а второй (*B*) – присутствует в виде отдельных атомов и собственной решетки не имеет.

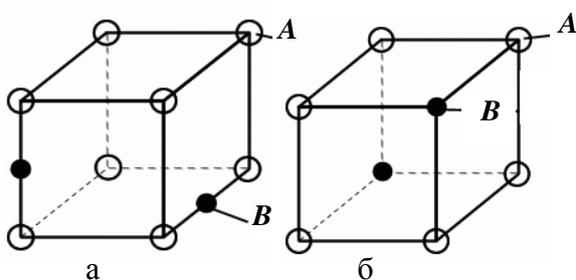


Рис. 2.2. Твердые растворы: а – внедрения; б – замещения

Твердые растворы внедрения (рис. 2.2,а) образуются, когда атомы (ионы) растворенного вещества внедряются в междоузельные позиции решетки рас-

творителя. Растворимость ограничена размерами промежутков между атомами решетки растворителя. Растворы внедрения образуются при сплавлении металлов с неметаллами, имеющими малый атомный (ионный) радиус (С, N, В, Н). Если размеры атомов превышают размеры межатомных промежутков, то это вызывает искажение решетки и возникновение механических напряжений. Предельная концентрация таких растворов – не более 2-2,5 %.

Твердые растворы замещения (см. рис. 2.2,б) образуются в том случае, когда размеры атомов (ионов) компонентов отличаются не более чем на 15 %. Атомы растворенного вещества замещают атомы растворителя в узлах кристаллической решетки. Если замещение осуществляется в случайных местах, то растворы называют *неупорядоченными*.

Если размеры атомов растворенного элемента больше размеров растворителя, то решетка растягивается, если меньше – сжимается. В первом приближении изменение параметров решетки пропорционально концентрации растворенного компонента и определяет изменение механических свойств твердых растворов замещения. Уменьшение параметра решетки ведет к большему упрочнению, чем увеличение. Твердые растворы замещения бывают *ограниченными* и *неограниченными*. В последнем случае, компоненты должны иметь близкие атомные радиусы и одинаковый тип решетки. Неограниченная растворимость в твердом состоянии наблюдается в сплавах: Cu–Ni, Cu–Au, Si–Ge.

Твердые растворы вычитания образуются в химических соединениях компонентов, в которых узлы кристаллической решетки не заняты полностью, то есть часть атомов как бы вычтена из кристаллической решетки и образуются вакансии. Появление вакансий связано, как правило, с присутствием ионов переменной валентности (Fe, Mn).

Химические соединения компонентов – сплав, в котором сохраняется определенное соотношение атомов элементов, кристаллическая решетка, свойства сплава резко отличаются от строения и свойств чистых компонентов. Состав выражается формулой A_nB_m , где A и B – компоненты, n и m – целые числа.

Химические соединения типа металл-неметалл. К ним относятся фазы с ионным типом связи и фазы внедрения. В первом случае в структуре сплава образуются неметаллические включения сульфидов, оксидов, фосфидов (FeS, MnO, Fe₃P и т. д.). Фазы внедрения образуются как при сплавлении металлов с неметаллами, имеющими малый атомный радиус. В этом случае образуются карбиды, нитриды, бориды.

Химические соединения металл-металл. *Электронные соединения* образуют одновалентные металлы (Cu, Na, Li) с металлами переходной группы (Fe, Mn, Co) и с металлами с валентностью от 2 до 5 (Al, Mg,

Zn). Электронные соединения – фазы переменного состава, в которых отношение числа валентных электронов к числу атомов различно: $3/2$ – β -фазы; $21/13$ – γ -фазы; $7/4$ – ϵ -фазы. Эти соединения характерны для сплавов на медной основе (латунь, бронза), где являются фазами упрочнителями. *Фазы Лавеса* имеют формулу AB_2 и образуются при соотношении радиусов атомов компонентов от 1,1 до 1,6 (обычно 1,2).

2.2. Диаграммы состояния двойных сплавов

В процессе охлаждения (нагрева) или при изменении концентрации какого-либо компонента в сплавах происходят фазовые и структурные изменения. Эти изменения можно проследить с помощью диаграмм состояния, представляющих графическое изображение состояния сплавов в зависимости от температуры и концентрации. Фазовые диаграммы строятся для равновесного состояния с минимумом свободной энергии системы, которое достигается при достаточно медленном охлаждении (или нагревании), что на практике трудно реализовать. При быстром охлаждении (нагреве) система может остановиться на промежуточном (метастабильном) уровне. Структура неустойчива и при соответствующих условиях может вернуться в равновесное состояние. Диаграммы состояния позволяют прогнозировать фазовые и структурные изменения в сплавах и в метастабильном состоянии. Закономерности сосуществования равновесных фаз определяются *правилом фаз*:

$$c = k - f + 2,$$

где k – число компонентов, f – число фаз, c – число степеней свободы (вариантность системы), т. е. число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация), которые можно изменять без изменения количества фаз в системе. При $c = 1$ возможно изменение одного из факторов в некоторых пределах, без изменения числа фаз. При $c = 0$ внешние факторы нельзя изменить без изменения числа фаз. Если превращения происходят при постоянном давлении, то число переменных уменьшается, (единица учитывает изменение температуры):

$$c = k - f + 1.$$

Изменяя соотношение компонентов, получают сплавы, имеющие свою структуру и свойства, температуру плавления и затвердения.

Диаграмма состояния сплавов с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма I рода)

Сначала получают термические кривые охлаждения сплавов. Соединив точки начала и конца кристаллизации сплавов (рис. 2.3), получают диаграмму состояния (рис. 2.4). Линия на диаграмме, выше которой сплавы находятся только в жидком состоянии, называется *ликвидус*

– геометрическое место точек температур начала кристаллизации (T_n).
 Линия *солидус* – геометрическое место точек температур конца кристаллизации (T_k).

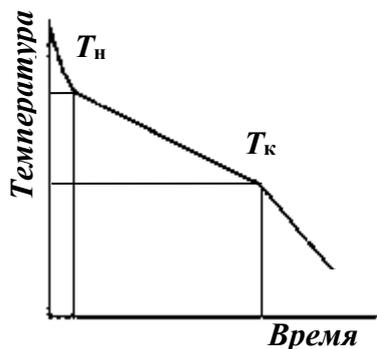


Рис. 2.3. Термическая кривая охлаждения сплава

Ниже сплавы находятся только в твердом состоянии. Строение сплавов механической смеси компонентов показано на рис. 2.5.

Анализ диаграммы состояния. Количество компонентов $k = 2$: химические элементы A, B . Число фаз $f = 3$: кристаллы A и B , жидкая фаза $Ж$. Линия *солидус* MN параллельна оси концентраций. Ветви *ликвидуса* OC и CP пересекаются в *точке эвтектики* C , состав сплава, соответствующий этой точке, называют *эвтектическим*.

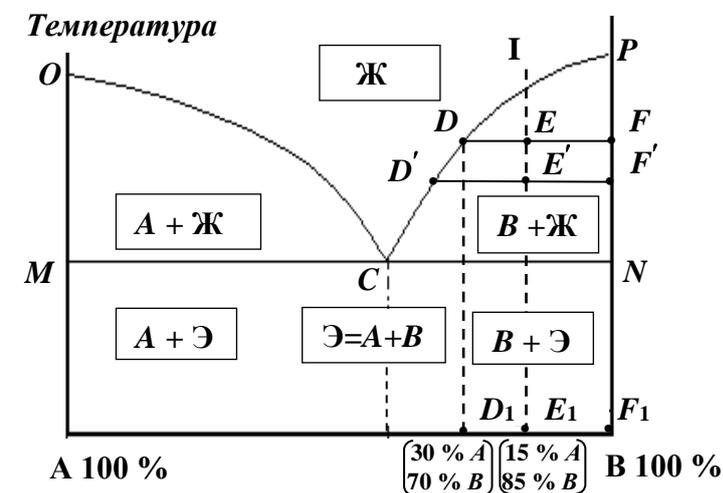


Рис. 2.4. Диаграмма состояния сплавов с полной нерастворимостью компонентов

Сплавы системы.

Чистые компоненты и эвтектический сплав \mathcal{E} кристаллизуются при постоянной температуре (точки O, P и C на диаграмме). Эвтектический сплав соответствует концентрации компонентов A и B в точке C . Механическая смесь двух кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости при самой низкой и

постоянной температуре, называется *эвтектикой*: $\mathcal{E} = A + B$ (рис. 2.5,б). Линия, на которой в сплавах образуется эвтектика, – *линия эвтектического превращения*.

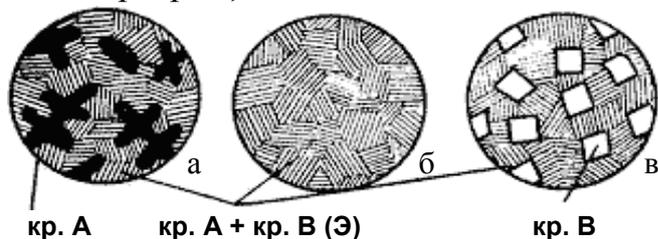


Рис. 2.5. Микроструктуры сплавов:
 а – доэвтектического; б – эвтектического;
 в – заэвтектического

Кристаллизация доэвтектических сплавов начинается на линии *ликвидуса* с образования зародышей кристаллов A . По мере их роста жидкая фаза обедняется компонентом A . При охлаждении до температуры, соответствующей линии диа-

граммы MN , состав жидкой фазы изменяется по ветви ликвидуса OC до эвтектического. На линии MC происходит одновременная кристаллизация компонентов A и B (эвтектики). Структура сплава: кристаллы $A+\text{Э}$ (рис. 2.5,а). Кристаллизация заэвтектических сплавов подобна кристаллизации доэвтектических. Структура: кристаллы $B+\text{Э}$ (рис. 2.5,в).

Число фаз и их концентрацию в любой точке двухфазной области диаграммы можно определить, используя *правило отрезков*.

При охлаждении сплава I на линии CP (рис. 2.4) образуются кристаллы компонента B . Состав жидкости изменяется (обогащается компонентом A), достигая эвтектической концентрации на линии CN .

1. Чтобы определить процентное соотношение компонентов A и B в сплаве I в точке E (рис. 2.4), необходимо через эту точку опустить перпендикуляр на основную ось концентраций. Проекция точки E – точка E_1 . Отрезок AB определяет общее количество сплава (100 %), отрезок AE_1 – количество компонента B (85 %), отрезок E_1B – количество компонента A (15 %). Сплав I в точке E имеет двухфазную структуру: жидкая фаза $Ж$ и кристаллы чистого компонента B .

2. Чтобы определить количество фаз в точке E , необходимо через эту точку провести изотермическую линию (*коноду*). Первые точки пересечения конноды с линиями диаграммы (D и F) определяют присутствующие фазы. Количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам проведенной конноды.

Общее количество сплава $Q = Q_{\text{ж}} + Q_{\text{тв}}$ определяется отрезком DF (принимается за 100 %). Количество твердой фазы $Q_{\text{тв}} = \frac{DE}{DF} \cdot 100\%$ – отрезок DE , прилегающий к линии ликвидус (40 %). Количество жидкой фазы $Q_{\text{ж}} = \frac{EF}{DF} \cdot 100\%$ – отрезок EF , прилегающий к оси ординат (60 %).

Для проверки количественного соотношения фаз необходимо понизить температуру сплава. Точка E опускается до точки E' . Соотношение отрезков изменяется. Количество всего сплава определяет отрезок DF' (принимается за 100 %), количество твердой фазы – отрезок DE' (55 %), жидкой – отрезок EF (45 %). В процессе кристаллизации количество твердой фазы увеличивается, жидкой – уменьшается.

3. Для определения состава фаз при температуре, соответствующей точке E , из точек пересечения конноды с линиями диаграммы D и F опускаются перпендикуляры на основную ось концентраций.

Проекция точки D точка D_1 покажет состав жидкой фазы $Ж$. Отрезок AB – 100 %, отрезок AD_1 – 70 % компонента B , отрезок D_1B – 30 % компонента A . Состав жидкости: $Ж = 70\% B + 30\% A$.

Проекция точки F точка F_1 покажет состав твердой фазы. Точка F_1 на диаграмме совпадает с точкой B , которая соответствует чистому компоненту $B - 100\%$, при этом количество компонента $A - 0\%$. Состав твердой фазы сплава: $100\% B + 0\% A$.

Для сплавов механических смесей компонентов характерна *ликвация* (химическая неоднородность). При медленном процессе кристаллизации в нижней части слитка преобладают кристаллы с большим удельным весом. Чтобы предотвратить ликвацию применяют ускоренное охлаждение слитка, механическое перемешивание, вибрацию и т. д. Примеры сплавов с полной нерастворимостью компонентов – Al–Si, Pb–Sb.

Диаграмма состояния сплавов с полной растворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма II рода)

Количество компонентов $k = 2$ (химические элементы A, B). Число фаз $f = 2$ (кристаллы α -твердого раствора, жидкая фаза). Линия AaB – ликвидус, AbB – солидус.



Рис. 2.6. Диаграмма состояния сплавов с полной растворимостью компонентов

Сплавы системы. Чистые компоненты кристаллизуются при постоянных температурах. Кристаллизация любого сплава начинается на линии ликвидуса (рис. 2.6, точка a) с образования зародыша α -твердого раствора, обогащенного тугоплавким компонентом B . При понижении температуры до точки ($б$) количество жидкой фазы уменьшается, твердой – увеличивается. За счет процессов диффузии состав этих фаз постоянно изменяется. Периферийная часть растущего зерна обогащена легкоплавким компонентом A , а центральная компонентом B , что приводит к *внутрикристаллической (дендритной) ликвации*. Кристаллизация заканчивается в точке ($б$) на линии солидус. Строение сплавов с полной растворимостью компонентов показано на рис. 2.7. Примеры сплавов – системы Cu–Ni, W–Nb, V–Mo.

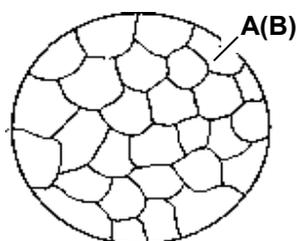


Рис. 2.7. Схема твердого раствора

Число фаз и их соотношение. Через выбранную точку (m) проводят изотерму (*коноду*) до пересечения с линиями диаграммы ликвидус и солидус. Состав жидкой (твердой) фаз определяется проекциями точек

пересечения изотермы с линией ликвидус (солидус) на ось концентрации. Состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидуса, твердой – по линии солидуса. С понижением температуры состав фаз изменяется в сторону уменьшения содержания компонента *B* и увеличения содержания компонента *A*.

Соотношение жидкой и твердой фаз. Количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам проведенной коноды. Количество всего сплава (*Q*) определяет отрезок (*pq*), твердой фазы (*Q_{ТВ}*) – отрезок (*mp*), прилегающий к линии ликвидус, жидкой (*Q_Ж*) – отрезок (*mq*), прилегающий к линии солидус:

$$Q_{ТВ} = \frac{mp}{pq} \cdot 100\% ; \quad Q_{Ж} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\% .$$

Неравновесная кристаллизация. Линия (*Bn'nq'б'*) на рис. 2.6 – линия неравновесного солидуса. При неравновесной кристаллизации, при температуре соответствующей точке *n'*, будут выделяться кристаллы α -твердого раствора. Состав твердой фазы будет соответствовать точке *n'*, лежащей на линии равновесного солидуса. При температуре, соответствующей точке *n*, концентрация кристаллов α -твердого раствора отличается от равновесной. В сплаве содержится некоторое количество жидкой фазы: $Q'_{Ж} = \frac{qn}{pn} \cdot 100\%$. При неравновесной кристаллизации сплавы затвердевают ниже равновесной температуры затвердевания.

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма III рода) характеризует систему сплавов, образующих твердые растворы в ограниченной

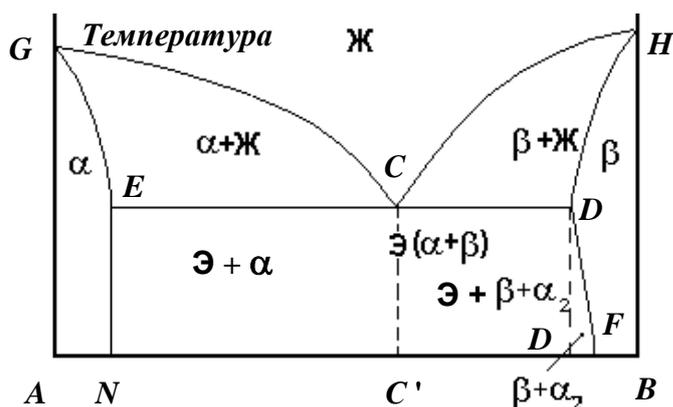


рис. 2.8. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов

области составов, за пределами которой образуется механическая смесь из кристаллов твердых растворов. Диаграмма состояния представляет собой комбинацию первых двух типов диаграмм.

Диаграмма состояния сплавов с эвтектическим превращением встречается в составе сложных диаграмм распространенных промышленных сплавов (Fe–C, Al–Cu).

Количество компонентов $k = 2$ (A и B). Число фаз $f = 3$: жидкая фаза и кристаллы α - и β -твердых растворов. **Линии и точки диаграммы.**

Линия ликвидус – GCH , солидус – $GEDH$. Точки E и N указывают предельную постоянную растворимость α -твердого раствора, точки D и F – предельную переменную растворимость β -раствора.

Сплавы системы

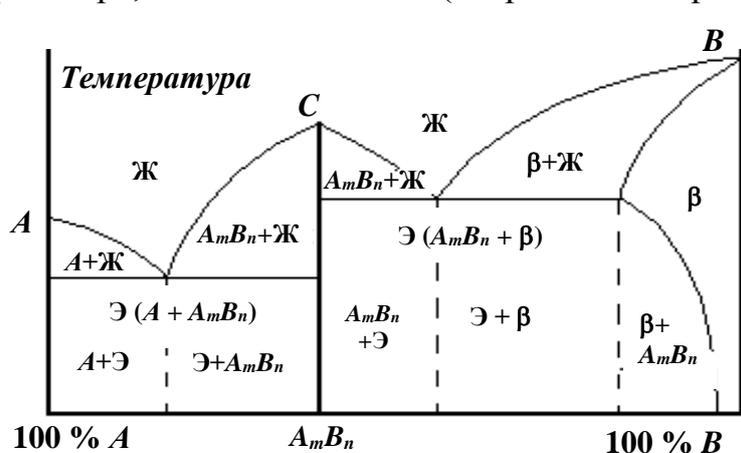
Компоненты A и B образуют твердые растворы слева от линии EN (α -раствор) и справа от линии DF (β -раствор). Процесс аналогичен тому, который происходит в сплавах с диаграммой состояния II рода.

Выше линии солидус в областях диаграммы GEC и CDH все сплавы имеют двухфазную структуру: (α +Ж) и (β +Ж).

Точка C – *эвтектическая точка*. Линия ECD – линия, в пределах которой протекает *эвтектическое превращение* аналогично тому, как это имеет место на диаграммах состояния I рода. Отличие в том, что в данном случае эвтектика состоит механической смеси α - и β -твердых растворов, а не механической смеси кристаллов A и B .

Кристаллизация доэвтектических сплавов (между точками C и E) начинается с выделения кристаллов α -твердого раствора и заканчивается эвтектической реакцией: $\alpha + \text{Ж} \rightarrow \alpha + \text{Э}(\alpha + \beta)$.

Кристаллизация заэвтектических сплавов (между точками C и D) начинается с выделения β -твердого раствора. На линии CD идет эвтектическая реакция: $\beta + \text{Ж} \rightarrow \beta + \text{Э}(\alpha + \beta)$. При охлаждении сплавов от эвтектической температуры предельная растворимость атомов компонента A в решетке компонента B падает, β -твердый раствор *пересыщен* компонентом A . Чтобы система пришла в равновесие, избыток атомов A из β -раствора должен выделиться. Чистые компоненты не могут существовать в виде отдельной фазы. Образуется α -твердый раствор, который в β -твердом растворе располагается в виде мелкодисперсных включений. Избыточные кристаллы, выделяющиеся не из жидкости, а из твердого раствора, обозначаются α_{II} (вторичные α -кристаллы). Выделение новой



фазы – *вторичная кристаллизация*.

Диаграмма состояния сплавов с устойчивым химическим соединением (диаграмма IV рода).

Компоненты сплава при определенном соотношении вступают в реакцию и образуют

Рис. 2.9. Диаграмма состояния сплавов с устойчивым химическим соединением

химическое соединение типа A_mB_n с собственной кристаллической решеткой (рис. 2.9). На диаграмме появляется вертикальная линия. Точка C соответствует температуре плавления химического соединения. Если A_mB_n обозначить как компонент C , то вертикальная линия разбивает диаграмму на две части. Левая часть – диаграмма с полной нерастворимостью компонентов, правая – с ограниченной растворимостью компонента C в решетке B , в которой β -фаза является твердым раствором химического соединения в решетке компонента B .

Диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением компонентов. Полиморфные превращения – превращения в твердом состоянии одного

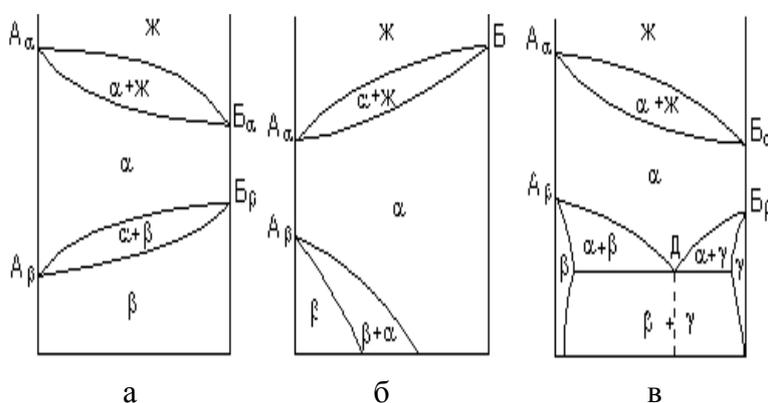


Рис. 2.10. Диаграммы состояния сплавов с полиморфным превращением компонентов

типа кристаллической решетки компонента в другой при изменении температуры или давления. На диаграмме полиморфные превращения проявляются в виде системы линий ниже линии солидус. На рис. 2.10,а показана диаграмма состояния, когда оба компонента обладают полиморфизмом. Компонент A кристаллизуется с образованием α -решетки при температуре A_α , которая при температуре A_β меняется на β -решетку. Аналогичное превращение происходит с компонентом B . На рис. 2.10,б приведена диаграмма состояния для сплава, в которой только компонент A обладает полиморфизмом.

На рис. 2.10,а показана диаграмма состояния, когда оба компонента обладают полиморфизмом. Компонент A кристаллизуется с образованием α -решетки при температуре A_α , которая при температуре A_β меняется на β -решетку. Аналогичное превращение происходит с компонентом B . На рис. 2.10,б приведена диаграмма состояния для сплава, в которой только компонент A обладает полиморфизмом.

Низкотемпературные фазы на диаграммах выделяются из твердого раствора, но закономерности формирования структуры сплава те же, что и при кристаллизации из жидкости. Зародыши новой фазы образуются и растут до полного завершения фазового превращения. Механическая смесь, состоящая из одновременно выделяющихся из α -твердого раствора в точке D кристаллов β - и γ -твердых растворов (рис. 2.10,в), называется *эвтектоидом*.

Правила Курнакова Н.С. Если известны свойства чистых компонентов и вид диаграммы состояния для этой системы сплавов, то можно предсказать свойства любого сплава данной системы (см. рис. 2.11).

1. В твердых растворах с неограниченной растворимостью свойства сплавов изменяются по криволинейной зависимости. Механические и

электрические свойства будут значительно отличаться от свойств чистых компонентов.

2. Свойства механических смесей изменяются по линейному закону. Значения характеристик свойств каждого сплава находятся в интервале между характеристиками чистых компонентов.

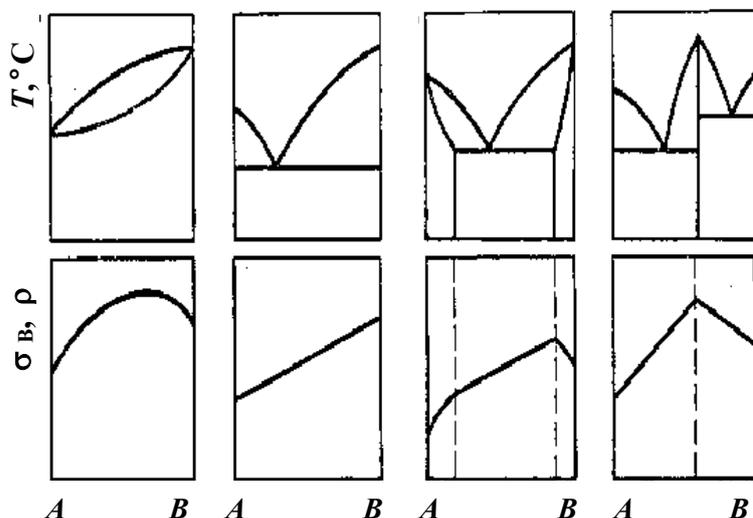


Рис. 2.11. Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния

3. В твердых растворах с ограниченной растворимостью в интервале концентраций, отвечающих однофазным твердым растворам, свойства изменяются по криволинейному закону, в двухфазной области – по линейному закону. Крайние точки отражают свойства чистых фаз, предельно насыщенных твердых растворов, образующих данную смесь.

4. При образовании химических соединений точка концентрации компонентов соответствующих химическому соединению отвечает максимуму на кривой.

свойства чистых фаз, предельно насыщенных твердых растворов, образующих данную смесь.

4. При образовании химических соединений точка концентрации компонентов соответствующих химическому соединению отвечает максимуму на кривой.

2.3. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Компоненты и фазы. Железо – металл серебристо-белого цвета. Температура плавления – $1539\text{ }^{\circ}\text{C}$, плотность – $7,87\text{ г/см}^3$. Атомный радиус – $0,127\text{ нм}$, ионный Fe^{2+} – $0,078\text{ нм}$, Fe^{3+} – $0,064\text{ нм}$. Имеет две полиморфные модификации: α -железо (Fe_α) с ОЦК решеткой до $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ γ -железо (Fe_γ) с ГЦК решеткой, существующее в интервале $911\text{-}1392\text{ }^{\circ}\text{C}$. Период решетки α -железа – $0,286\text{ нм}$, γ -железа – $0,365\text{ нм}$. До температуры $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка Кюри) железо ферромагнитное. Железо со многими элементами образует твердые растворы: с металлами – замещения, с углеродом, азотом и водородом – внедрения.

Углерод – неметалл. Атомный радиус $0,077\text{ нм}$; ковалентные радиусы: $0,077$, $0,067$ и $0,060\text{ нм}$ в одинарной, двойной и тройной связях; ионный радиус C^{4+} – $0,015\text{ нм}$. Имеет модификации: *графит* – со слои-

стой решеткой, алмаз – с кубической решеткой и фуллерен. Плотность графита – $1,5-2,2 \text{ г/см}^3$, температура возгонки – $3500 \text{ }^\circ\text{C}$. У гексагонального α -графита атомы каждого слоя располагаются над и под центрами шестиугольников (рис. 2.12). Положение слоев повторяется через один. Каждый слой сдвинут относительно другого в горизонтальном направлении на $0,142 \text{ нм}$. У ромбоэдрического β -графита каждый четвертый слой повторяет первый; в чистом виде не встречается. Метод синтеза

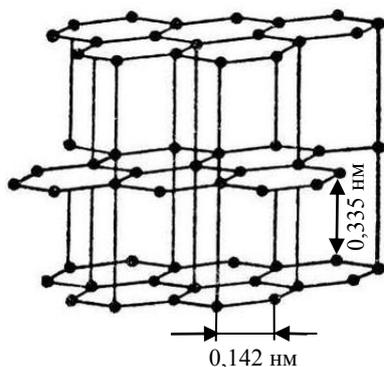


Рис. 2.12. Решетка графита

алмазов – взрыв графита со скоростью детонации $7-8 \text{ км/с}$, при давлении $20-30 \text{ ГПа}$ ($1 \text{ ГПа} = 10^4 \text{ атм.}$), температура – около $4000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Феррит (Ф) – твердый раствор внедрения углерода в α -железе (рис. 2.13,а). Минимальная растворимость углерода при комнатной температуре – $0,006 \%$ (точка Q на рис. 2.14), максимальная – $0,02 \%$ при $727 \text{ }^\circ\text{C}$ (точка P). Выше $1392 \text{ }^\circ\text{C}$ существует высокотемпературный феррит с

растворимостью углерода $0,1 \%$ при $1499 \text{ }^\circ\text{C}$. Свойства феррита близки к свойствам железа. Обладает малой твердостью (130 HB), высокой пластичностью ($\delta = 30 \%$), магнитен до температуры $768 \text{ }^\circ\text{C}$.

Аустенит (А) – твердый раствор углерода в γ -железе (рис. 2.13,б) имеет минимальную растворимость углерода $0,8 \%$ при $727 \text{ }^\circ\text{C}$ (точка S на рис. 2.14), максимальную – $2,14 \%$ при $1147 \text{ }^\circ\text{C}$ (точка E). Аустенит прочнее феррита (твердость 250 HB), парамагнитен.

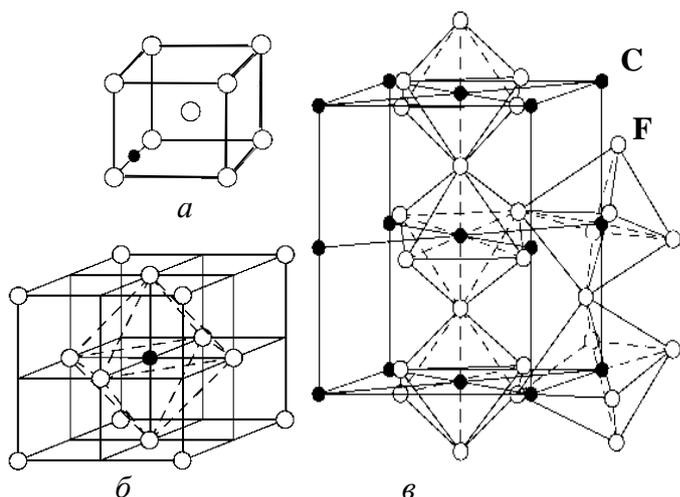


Рис. 2.13. Кристаллические решетки: а – феррита; б – аустенита; в – цементит

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа Fe_3C) содержит $6,69 \%$ углерода. Решетка состоит из октаэдров (рис. 2.13,в), оси которых наклонены друг к другу. Температура плавления $1252 \text{ }^\circ\text{C}$, точка Кюри – $210 \text{ }^\circ\text{C}$, плотность –

$7,82 \text{ г/см}^3$. Цементит – метастабильная фаза: при нагревании разлагается на железо и углерод. Твердость – 800 HB . *Цементит первичный (Ц_I)*

выделяется из жидкой фазы в виде крупных пластинчатых кристаллов, *вторичный* (Ц_{II}) – из аустенита в виде сетки вокруг зерен аустенита (при дальнейшем охлаждении вокруг зерен перлита), *третичный* (Ц_{III}) – из феррита в виде мелких включений, но их химические и физические свойства одинаковы.

Преобразования в сплавах системы Fe–C. Сплавы железа, содержащие более 6,69 % углерода, не имеют практического применения. Рассматривается только левая часть диаграммы (рис. 2.14). Линия ACD – ликвидус системы, линия $AECF$ – солидус. На линии AC начинается, а на линии AE заканчивается кристаллизация аустенита. На линии CD начинается кристаллизация цементита первичного.

На линии ECF при постоянной температуре 1147 °C идет эвтектическое превращение: расплав с содержанием 4,3 % углерода превращается в эвтектическую смесь аустенита и цементита первичного: $\text{Ж} \rightarrow \text{A} + \text{Ц}_I$ – *ледебурит* ($\text{Л}_{4,3}$).

На линии GS начинается, на линии PG заканчивается превращение аустенита в феррит, обусловленное полиморфным превращением $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$. На линии ES начинается выделение Ц_{II} из аустенита, обусловленное снижением предельной растворимости углерода в Fe_γ .

На линии PSK при температуре 727 °C идет *эвтектоидное превращение*. Аустенит с 0,8 % углерода превращается в эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного: $\text{A}_{0,8} \rightarrow \text{Ф} + \text{Ц}_{II}$ – *перлит* ($\text{П}_{0,8}$). Полированный, протравленный шлиф имеет перламутровый блеск.

На линии PQ начинается выделение Ц_{III} из феррита, т. к. уменьша-

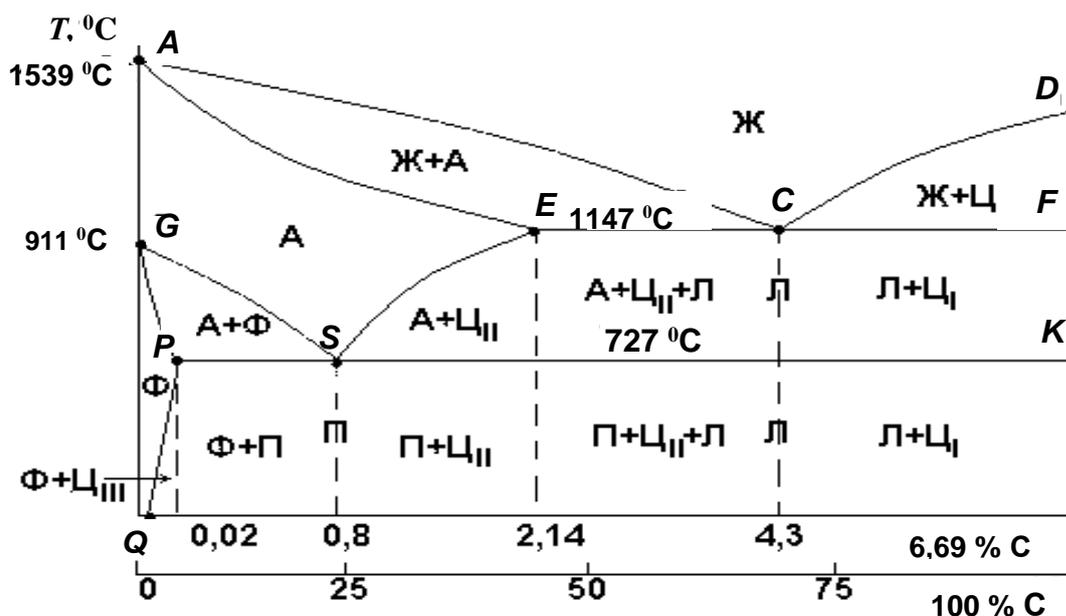


Рис. 2.14. Диаграмма состояния сплавов железо–углерод

ется растворимость углерода в Fe_{α} при снижении температуры.

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы *железо–цементит* (критические точки), обозначают буквой *A* (от французского *arret* – остановка): A_1 – линия *PSK* ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) – превращение $\text{П} \leftrightarrow \text{А}$; A_2 – линия, соответствующая точке Кюри ($768\text{ }^{\circ}\text{C}$); A_3 – линия *GS* (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – превращение $\text{Ф} \leftrightarrow \text{А}$; A_{cm} – линия *SE* – переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве, – начало выделения Ц_{II} (иногда обозначается A_3).

При нагреве и охлаждении превращения совершаются при различных температурах. Для обозначения процесса нагревания добавляют букву (*c*) – A_{c1} , охлаждения – букву (*r*) – A_{r1} .

Структуры железоуглеродистых сплавов. Сплавы системы *железо–цементит* по содержанию углерода делятся на техническое железо, стали и чугуны.

1. Железо с содержанием углерода до 0,02 % называют *техническим*. Микроструктура сплава содержит зерна феррита при содержании углерода до 0,006 % (рис. 2.15,а). При увеличении углерода до 0,02 % по границам и внутри зерен феррита расположены зерна Ц_{III} .

2. *Стали* – сплавы железа с содержанием углерода 0,02-2,14 %. Они кристаллизуются с образованием аустенита. Микроструктура сталей формируется при перекристаллизации аустенита. По содержанию углерода и структуре стали делятся на: *доэвтектоидные*, структура – $\text{Ф}+\text{П}$ (рис. 2.15,б); *эвтектоидные*, структура – П (рис. 2.15,в); *заэвтектоидные*, структура – $\text{П}+\text{Ц}_{\text{II}}$, цементит располагается в виде сетки вокруг зерен перлита (рис. 2.15,г).

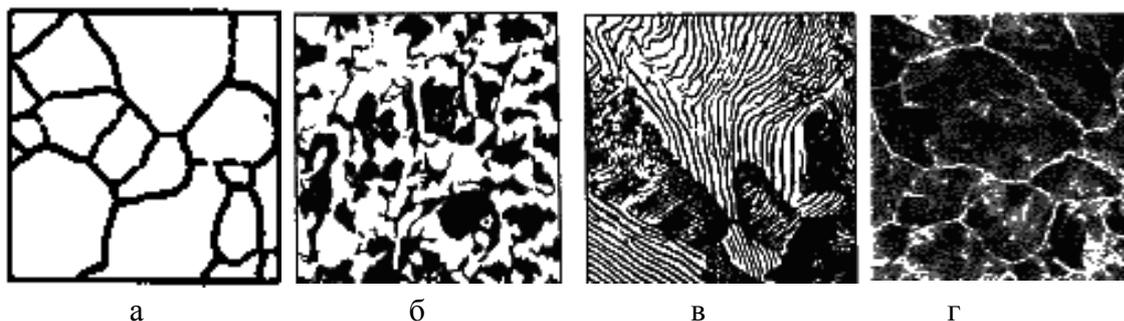


Рис. 2.15. Микроструктуры технического железа и сталей:

а – железо; б – доэвтектоидная; в – эвтектоидная; г – заэвтектоидная стали

3. Сплавы с содержанием углерода от 2,14 до 6,69 % кристаллизуются с образованием легкоплавкой эвтектики (ледебурита) и называются белыми *чугунами*. Они имеют высокую твердость и хрупкость, излом серебристо-белый. По количеству углерода и структуре белые чугуны

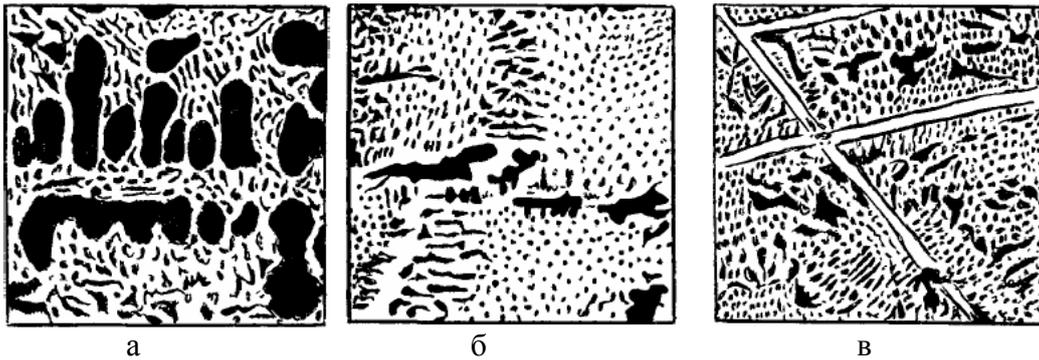


Рис. 2.16. Микроструктуры белых чугунов:

а – доэвтектические; б – эвтектические; в – заэвтектические

(рис. 2.16) делятся на: *доэвтектические*, структура – П+Л+Ц_п; *эвтектические* – Л; *заэвтектические* – Л+Ц_г. Фазовый состав сталей и чугунов при нормальных температурах одинаков: феррит и цементит. Однако свойства сталей и белых чугунов значительно отличаются.

2.4. Углеродистые стали

Углеродистые стали – сплавы железа с углеродом (стали) с общим содержанием остальных примесей не более 1 %. Свойства сталей определяются количеством углерода (рис. 2.17) и содержанием примесей,

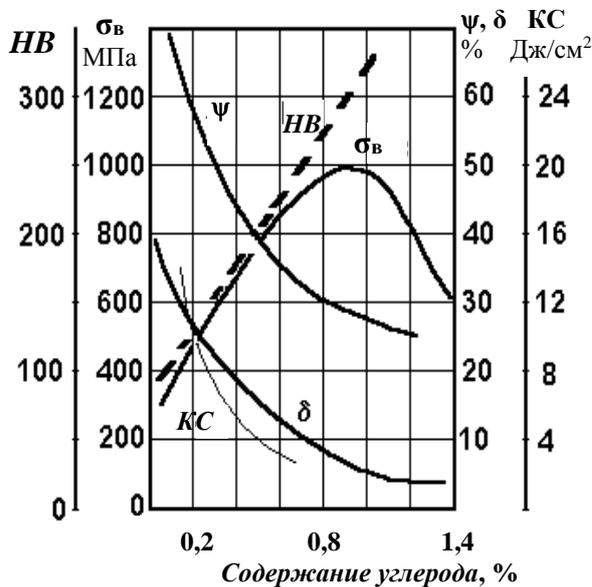


Рис. 2.17. Влияние углерода на свойства стали

которые взаимодействуют с железом и углеродом. С ростом содержания углерода количество цементита увеличивается, феррита – уменьшается. Прочность сталей повышается до содержания углерода около 1 %, затем уменьшается, так как в структуре образуется грубая сетка цементита. Увеличение содержания углерода повышает порог хладноломкости, снижает ударную вязкость, ухудшает обрабатываемость давлением. Низкоуглеродистые стали при обработке резанием дают невысокое качество поверхности, но

хорошо свариваются и штампуются в холодном состоянии.

Влияние примесей

1. *Постоянные примеси*: марганец, алюминий, кремний, сера, фосфор. Марганец, кремний и алюминий добавляют в сталь для раскисления при выплавке, они являются технологическими примесями. Содержание марганца и алюминия не превышает 0,5-0,8 %. Марганец повышает прочность. Алюминий дегазирует металл и повышает плотность слитка. Содержание кремния не превышает 0,4 %. Кремний растворяется в феррите и увеличивает предел текучести и предел прочности.

Фосфор попадает в сталь при ее выплавке из чугуна. Содержание фосфора в сталях – 0,025-0,045 %. Растворяясь в феррите, он искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности, но снижает пластичность и вязкость; повышает температуру перехода стали в хрупкое состояние (20-25 °С на 0,01 % Р) – явление *хладноломкости*.

Сера также попадает в сталь при ее выплавке из чугуна. Содержание серы в сталях – 0,025-0,06 %. Сера с железом образует сульфид FeS, который, в свою очередь, образует с железом (с аустенитом) легкоплавкую эвтектику (988 °С). При нагреве эвтектика плавится, нарушаются связи между зернами. При деформации в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается – явление *красноломкости*. Сера снижает ударную вязкость и пластичность, ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

2. *Скрытые примеси* – газы (азот, кислород, водород) попадают в сталь при выплавке и находятся в раковинах и трещинах. Водород приводит к образованию *флокенов* – тонких трещин округлой формы серебристого цвета. Азот и кислород входят в виде неметаллических включений нитридов (Fe₂N) и окислов (FeO, SiO₂, Al₂O₃), которые являются концентраторами напряжений и снижают предел выносливости и вязкость; в виде твердых растворов, которые повышают порог хладноломкости и снижают сопротивление хрупкому разрушению.

3. *Случайные примеси*: хром, никель, вольфрам и др. попадают в сталь из металлического лома (скрапа) при выплавке.

Классификация и маркировка углеродистых сталей

1. По содержанию углерода: низкоуглеродистые – до 0,25 %, среднеуглеродистые – 0,3-0,6 % и высокоуглеродистые – выше 0,7 %.

2. По структуре: доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные.

3. По качеству (содержанию серы и фосфора): P,S ≤ 0,06-0,07 % – стали обыкновенного качества; P,S ≤ 0,03-0,04 % – качественные стали; P,S ≤ 0,025 % – высококачественные стали.

4. По способу выплавки в: мартеновских печах; кислородных конверторах; электрических печах (электродуговых, индукционных и др.).

5. По назначению: общего назначения; конструкционные – для изготовления деталей машин и механизмов; инструментальные – для изготовления инструментов; специальные – стали с особыми свойствами.

Маркировка углеродистых сталей.

Стали общего назначения обыкновенного качества. Стали маркируют буквами «Ст» и цифрой, показывающей условный номер марки стали. Изготавливают 7 марок (Ст0,..., Ст6). Индексами указывается степень раскисления стали, если она отличается от спокойной: *кп* – кипящая, *пс* – полуспокойная. С увеличением номера марки возрастает содержание углерода (Ст4 – 0,2-0,3 % С), т. е. увеличивается предел прочности, но снижается пластичность стали. Из сталей обыкновенного качества изготавливают горячекатаный прокат: балки, швеллеры, уголки, прутки, а также листы, трубы и поковки. С повышением содержания углерода свариваемость ухудшается. Стали с высоким содержанием углерода (Ст5, Ст6) применяют для строительных конструкций, не подвергаемых сварке.

Конструкционные качественные стали поставляют с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Степень раскисления – спокойная. Стали маркируются двухзначным числом, указывающим содержание углерода в сотых долях процента.

Инструментальные качественные стали маркируются буквой У и числом, указывающим содержание углерода в десятых долях процента. Сталь марки У8 содержит углерода – 0,8 %.

Высококачественные углеродистые стали маркируются аналогично качественным: в конце марки ставят букву А для обозначения высокого качества стали (У10А, 50А).

Конструкционные качественные стали делятся на три группы.

Низкоуглеродистые стали 05кп, 08, 07кп, 10, 10кп обладают высокой прочностью и высокой пластичностью: $\sigma_{\text{в}} = 340$ МПа, $\delta = 30$ %. Стали используют без термической обработки для малонагруженных деталей, ответственных сварных конструкций, а также для деталей машин, упрочняемых цементацией.

Среднеуглеродистые стали 30, 35,..., 55 применяют после нормализации, улучшения и поверхностной закалки для деталей во всех отраслях промышленности. Стали имеют более высокую прочность, но низкую пластичность: $\sigma_{\text{в}} = 500-600$ МПа, $\delta = 21-16$ %.

Высокоуглеродистые стали (0,6-0,85 % С) 60, 65,..., 85 обладают высокой прочностью, износостойкостью и упругими свойствами. Из этих сталей изготавливают пружины и рессоры, шпиндели, замковые шайбы, прокатные валки и т. д.

2.5. Чугуны

Чугун отличается от стали составом (более высокое содержание углерода и примесей) и технологическими свойствами (хорошие литейные свойства, низкая пластичность). В *белом чугуна* большая часть углерода находится в связанном состоянии в виде цементита, излом имеет белый цвет и металлический блеск. В *сером чугуна* большая часть углерода находится в свободном состоянии в виде графита (в связанном состоянии – до 0,8 %), излом серого цвета. Наиболее распространены чугуны с содержанием 2,4-3,8 % С.

Графитизация – процесс образования графита в чугунах. Образование графита происходит непосредственно из жидкой фазы вместо цементита при очень медленном охлаждении, либо из твердой фазы при термическом разложении цементита. Особенно сильно на устойчивость цементита влияют *графитизирующие элементы* – кремний и магний, способствующие его распаду на феррит и свободный углерод (графит). Изменяя содержание кремния от 0,5 до 5 %, можно получать чугуны, различные по структуре и свойствам

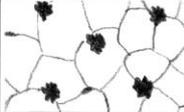
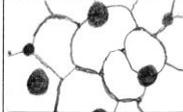
Структура металлической основы (твердость)	Тип чугуна и форма графита		
	Серый с пластинчатым графитом	Ковкий с хлопьевидным графитом	Высокопрочный с шаровидным графитом
Перлит (250 НВ)			
Перлит и феррит (200 НВ)			
Феррит (150 НВ)			
δ, %	0,2-0,5	5-10	10-15

Рис. 2.18. Микроструктуры чугунов

Графит улучшает обрабатываемость чугуна резанием. Чугун имеет хорошие антифрикционные свойства, так как графит обеспечивает смазку поверхностей трения. Пустоты, заполненные графитом, гасят вибрации; детали не чувствительны к поверхностным концентраторам напряжений (проточки, отверстия, переходы в сечениях).

Серый чугун. Изделия получают литьем. Графитовые пластинчатые включения способствуют разупрочнению чугуна. Около графитовых

Металлическая основа чугунов похожа на структуру эвтектоидной или доэвтектоидной стали. Чугун – сталь, пронизанная включениями графита. В зависимости от геометрической формы графита чугуны делят на: *серый* – с пластинчатым, *ковкий* – с хлопьевидным, *высокопрочный* – с шаровидным графитом (рис. 2.18).

включений при деформации концентрируются напряжения, которые тем больше, чем они острее. Серый чугун имеет низкие механические свойства при испытании на растяжение, но высокие – на сжатие. Изготавливают детали, которые подвергаются сжимающим и изгибающим нагрузкам: зубчатые колеса, гильзы и блоки цилиндров, поршневые кольца, подшипники скольжения. Серые чугуны содержат: до 3,7 % С; 1-5 % Si; 0,2-0,8 % Mn; 0,1-0,3 % P; до 0,15 % S. Обозначаются индексом СЧ и значением предела прочности ($\sigma_B = 150$ МПа): СЧ 15.

Ковкий чугун. Название условное, пластическому деформированию не подвергают. Получают при отжиге белых доэвтектических чугунов состава: 2,2-2,8 % С; 0,7-1,5 % Si; 0,2-1,0 % Mn; менее 0,2 % P и 0,1 % S. Структура белого чугуна формируется при быстром охлаждении тонкостенных отливок. Последующий длительный отжиг (до 2 суток) приводит к разложению цементита и образованию хлопьевидного графита.

Ферритный ковкий чугун получают при очень медленном охлаждении после отжига при 760-720 °С (режим (а) на рис. 2.19). Цементит, входящий в перлит и ледебурит, полностью разлагается. Структура: зерна феррита и графита, излом темный. Мягкий материал (150 НВ, $\delta = 6$ %) с удовлетворительной прочностью ($\sigma_B = 300$ МПа).

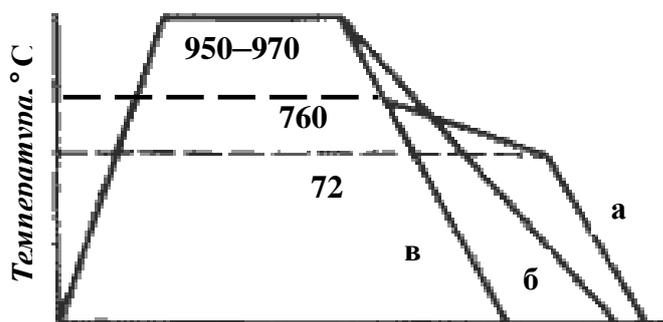


Рис. 2.19. Отжиг ковкого чугуна

Феррито-перлитный ковкий чугун получают при ускоренном охлаждении по режиму (б). Структура: зерна перлита и феррита, графит.

Перлитный ковкий чугун получают при быстром охлаждении (режим (в)). Структура: перлит, малое

количество графита. Излом светлый.

Ковкий чугун по механическим свойствам занимает промежуточное положение между серым и высокопрочным. Применяется для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. Обозначается КЧ и значениями предела прочности ($\sigma_B = 300$ МПа) и относительного удлинения ($\delta = 6$ %): КЧ 30–6.

Высокопрочный чугун получают при модифицировании серого чугуна алюминием, щелочными или щелочноземельными металлами (обычно магнием до 0,05 % от массы отливки), ферросилицием. Чугуны могут иметь ферритную, феррито-перлитную и перлитную металлическую основу. Механические свойства высокие, что вызвано отсутствием

неравномерности распределения напряжений в металлической основе из-за шаровидной формы графита. Изготавливают ответственные детали: тонкостенные отливки, шаботы молотов, коленчатые валы, зубчатые колеса и др. Чугуны содержат: 3-4 % С; 1-3 % Si; 0,3-0,8 % Mn; 0,1 % P; 0,03 % S. Высокопрочный чугун с пределом прочности 420 МПа и относительным удлинением 12 % обозначается ВЧ 42-12.

Наряду с шаровидным графитом высокопрочные чугуны содержат графит *вермикулярной* (червякообразной) формы в виде изогнутых лепестков, размеры которых меньше пластинок серого чугуна. По механическим свойствам и износостойкости этот чугун занимает промежуточное положение между серым и высокопрочным чугунами. Используется для деталей подвергаемых циклическим нагрузкам и частым сменам температур.

Отбеленные и другие чугуны. *Отбеленные чугуны* – отливки, поверхностный слой которых состоит из белого чугуна, сердцевина – серый или высокопрочный чугун. Этот слой получают на толстостенных деталях при литье в металлические или земляные формы. В поверхностном слое много твердого (950-1000 НВ) хрупкого цементита, который хорошо сопротивляется износу. Чугуны используются для изготовления прокатных валов, вагонных колес с отбеленным ободом, шаров для шаровых мельниц. Состав: 3-4 % С; 0,6-0,9 % Si; 0,4-0,6 % Mn.

Легированные чугуны. Легирующие элементы влияют на металлическую основу чугунов, размеры и форму графитовых включений. Легированные чугуны подвергаются термической обработке для обеспечения необходимых свойств. Для деталей, работающих в условиях абразивного износа, используются белые чугуны, легированные хромом, хромом и марганцем, хромом и никелем. Для деталей, работающих в условиях износа при высоких температурах, используют высокохромистые и хромоникелевые чугуны.

Коррозионностойкие чугуны часто легируют никелем (0,7-1,5 %), хромом (0,2-0,6 %), молибденом (0,3-0,6 %) и медью (0,2-0,5 %).

Высоколегированные чугуны содержат до 12-18 % кремния (в их структуре образуются кремнистые сплавы – ферросилициды). Чугуны используются для изготовления деталей насосов, оборудования для концентрированных азотной и серной кислот и др.

3. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ

Любая термическая обработка металла состоит из комбинации четырех основных превращений.

1. Превращение перлита в аустенит $P \rightarrow A$ происходит при нагреве выше критической температуры A_{c1} (см. рис. 3.1).

2. Превращение аустенита в перлит $A \rightarrow P$ происходит при охлаждении ниже критической температуры A_{f1} .

3. Превращение аустенита в мартенсит $A \rightarrow M$ происходит при быстром охлаждении.

4. Превращение мартенсита в перлит $M \rightarrow P$ идет при температурах, ниже температуры A_1 .

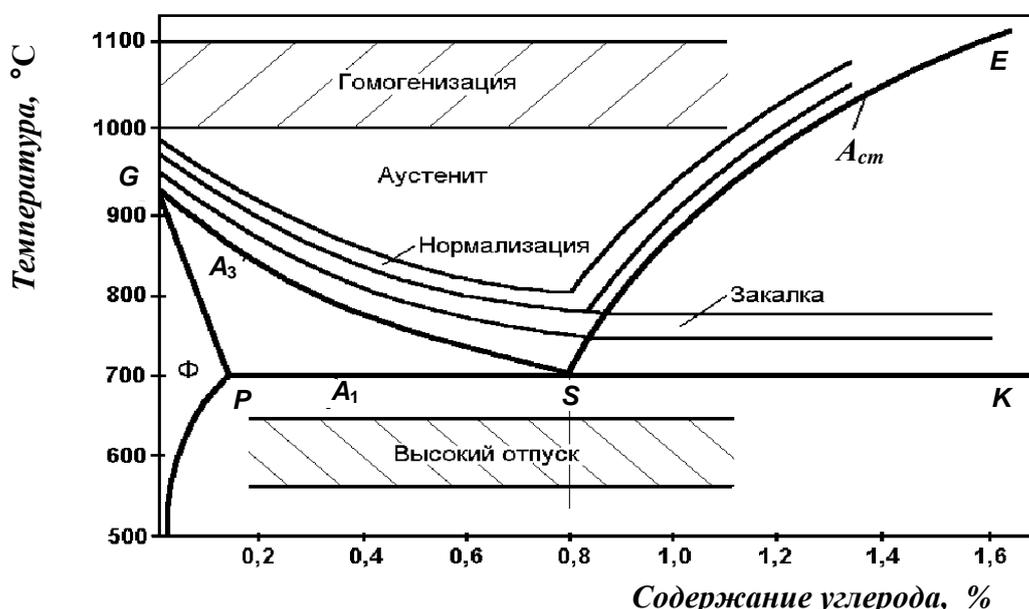


Рис. 3.1. Диапазон оптимальных температур нагрева стали при различных видах термообработки

3.1. Механизмы основных превращений

1. Превращение перлита в аустенит сопровождается превращением $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ и растворением цементита в аустените, основанном на диффузии углерода.

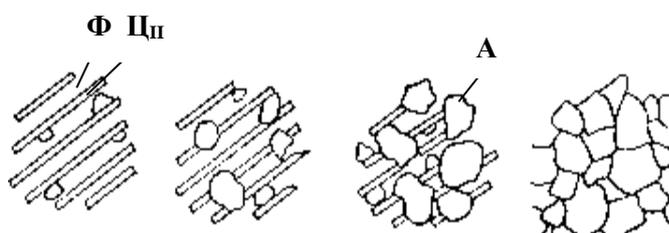


Рис. 3.2. Механизм превращения перлита в аустенит

превращением $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ и растворением цементита в аустените, основанном на диффузии углерода. Превращение начинается с зарождения зерен аустенита (рис. 3.2) на поверхности раздела *феррит-цементит* (решетка Fe_α пере-

страивается в Fe_γ) и заканчивается, когда весь цементит растворится в аустените. Мелкие зерна аустенита растут при повышении температуры и времени выдержки.

Перегрев стали – рост зерна аустенита при нагреве выше $900\text{ }^\circ\text{C}$. При последующем охлаждении укрупненного аустенита образуются крупные пластинчатые или игольчатые кристаллы феррита – *видманштеттова* структура, которая характеризуется пониженными механическими свойствами. Перегрев исправляют повторным нагревом до оптимальных температур с медленным охлаждением.

Пережог – окисление границ зерен при нагреве стали близко к температуре плавления. Пережог – неисправимый брак.

2. Диффузионное превращение аустенита в перлит имеет место при малой степени переохлаждения (рис. 3.3) и связано с диффузией избыточного углерода, растворенного в Fe_γ .

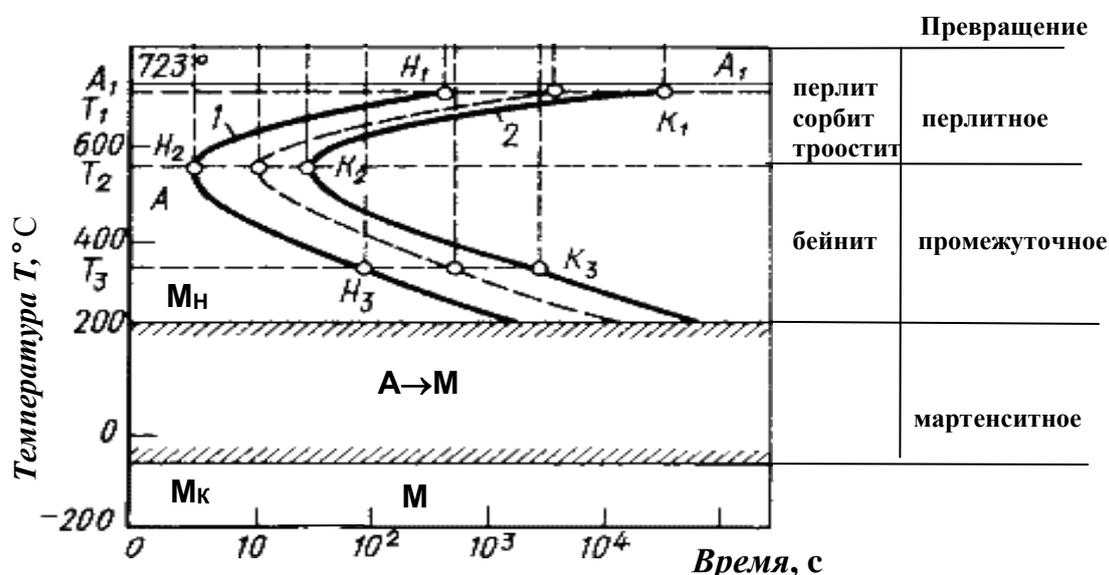


Рис. 3.3. Диаграмма изотермического превращения аустенита

Образование зародышей цементита облегчено на границах аустенитных зерен (рис. 3.4). Пластинка цементита растет и удлиняется за счет диффузии углерода из прилегающих областей, из которых образуются пластинки феррита. Рост колоний перлита продолжается до столкновения с колониями, растущими из других центров.

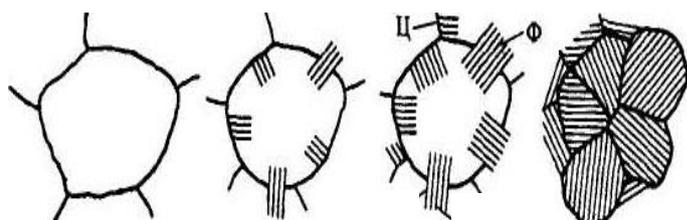


Рис. 3.4. Схема роста перлитных колоний:
Ф – феррит; Ц – цементит

Строение и свойства перлита зависят от температуры, при которой происходит процесс его образования. При увеличении сте-

пени переохлаждения увеличивается количество зародышей новой фа-

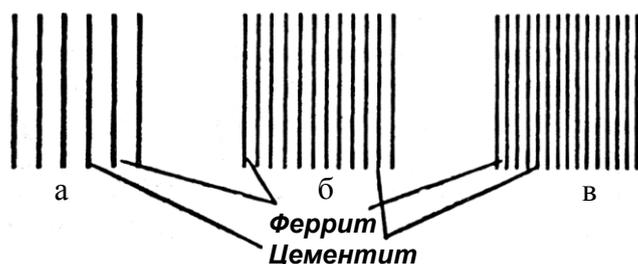


Рис. 3.5. Схема феррито-цементитных структур: а – перлит; б – сорбит; в – троостит

структуры (Δ), в зависимости от которой продукты распада аустенита имеют различное название (рис. 3.5).

Перлит ($\Delta = 0,7$ мкм) образуется при переохлаждении до температуры $650-700$ °С (см. рис. 3.3) или охлаждении со скоростью $V = 30$ °С/с. Твердость $180-250$ НВ.

Сорбит ($\Delta = 0,25$ мкм) образуется при переохлаждении до температуры $600-650$ °С или охлаждении с $V = 60$ °С/с. Структура характеризуется высокой пластичностью и ударной вязкостью, достаточной упругостью и прочностью. Твердость до 350 НВ.

Троостит ($\Delta = 0,1$ мкм) образуется при переохлаждении до температуры $550-600$ °С или охлаждении с $V = 150$ °С/с. Структура характеризуется высоким пределом упругости, малой вязкостью, пластичностью. Твердость $350-450$ НВ.

3. Промежуточное превращение аустенита в бейнит. При температурах ниже 550 °С диффузия атомов железа в аустените подавлена, атомы углерода обладают достаточной подвижностью. В переохлажденном зерне аустенита происходит перераспределение атомов углерода. Участки аустенита, обогащенные углеродом, превращаются в цементит игольчатой формы. Участки аустенита, обедненные углеродом (для них температура начала мартенситного превращения M_H лежит выше реальной температуры переохлажденного аустенита) превращаются в мартенсит ($0,1-0,2$ % углерода). Структура, образующаяся при изотермическом превращении аустенита (температурный интервал превращения – $300-500$ °С), состоит из цементита и малоуглеродистого мартенсита и называется *бейнит* (рис. 3.3).

4. Бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит имеет место при высокой степени переохлаждения (рис. 3.3), когда процессы диффузии углерода подавлены. Горизонтальные линии M_H и M_K на рис. 3.3 показывают начало и конец бездиффузионного превращения аустенита в мартенсит, сопровождаемого превращением Fe_γ в Fe_α .

зы: чередующихся пластинок феррита и цементита. С ростом числа пластинок уменьшаются как их размеры, так и расстояния между ними. Расстояние между соседними пластинками феррита и цементита определяет *дисперсность*

Минимальная скорость охлаждения (V_k), при которой аустенит переохлаждается до температуры M_H без диффузии углерода и превращается в мартенсит, называется *критической скоростью*.

При такой скорости охлаждения диффузионные процессы не успевают пройти: углерод аустенита остается в решетке Fe_α . Кубическая решетка искажается и превращается в тетрагональную (рис. 3.6,а).

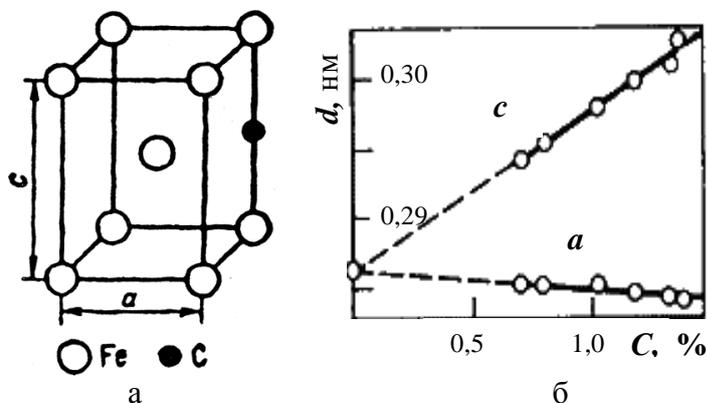


Рис. 3.6. Тетрагональная ячейка мартенсита (а) и влияние углерода на ее параметры (б)

Образуется *мартенсит* – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в Fe_α . Искажение решетки характеризуется *степенью тетрагональности* ($c/a > 1$), пропорциональной содержанию углерода (рис. 3.6,б).

При искажении решетки железа атомами углерода возникают большие напряжения. Следствие компенсации напряжений – большая плотность дислокаций и высокая твердость мартенсита (до 65 HRC).

5. Особенности мартенситного превращения.

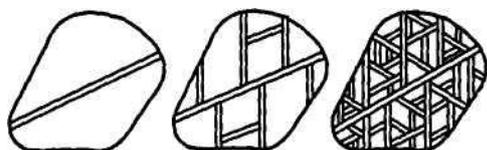


Рис. 3.7. Образование мартенситных пластин в одном аустенитном зерне

1. *Ориентированность и высокая скорость роста кристаллов мартенсита.* Кристаллы мартенсита имеют пластинчатую форму. Со скоростью ~ 5000 м/с (близкой к скорости звука в стали) они быстро растут до границ зерна аустенита (рис. 3.7), либо ближайшего дефекта. Последующие пластинки расположены под углами 60 или 120° к первым.

2. *Полное мартенситное превращение возможно при непрерывном охлаждении до окончания превращения.* Температуры начала и конца мартенситного превращения зависят только от содержания углерода (рис. 3.8). Для сталей с содержанием углерода выше

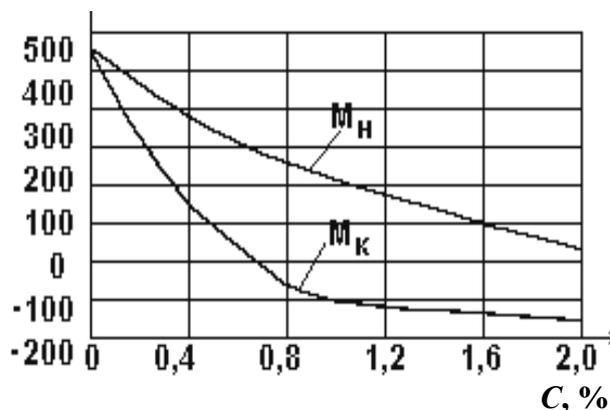


Рис. 3.8. Температуры начала и конца мартенситного превращения

0,6 % температура M_K уходит в область отрицательных температур. При закалке до комнатной температуры превращение $A \rightarrow M$ происходит не полностью. В структуре стали имеется нестабильный остаточный аустенит ($A_{ост}$). Его количество тем больше, чем ниже температура M_K : при содержании углерода 0,6-1,0 % – до 10 % остаточного аустенита, при содержании углерода 1,5 % – до 50 %.

3. *Бездиффузионный характер превращения аустенита в мартенсит.* При превращении Fe_γ в Fe_α атомы железа смещаются на расстояния, меньше межатомных; диффузии углерода нет. На рис. 3.9,а показаны две элементарные ячейки аустенита. Атомы железа показаны кружками. Атомы углерода растворены в аустените по типу внедрения. Они занимают октаэдрические пустоты на серединах ребер и центрах объемов, которые отмечены крестиками. В ГЦК решетке аустенита можно мысленно выделить тетрагональную решетку мартенсита (на рис. 3.9 показана жирными линиями).

Для мартенситного превращения характерно то, что растущие кристаллы мартенсита *когерентно* связаны с кристаллами исходной фазы аустенита. Два кристалла считаются когерентными, если они соприкасаются по поверхности раздела, которая является общей для их кристаллических решеток. Перестройка решетки аустенита происходит по

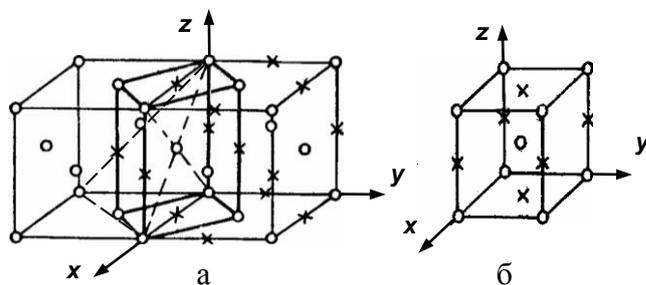


Рис. 3.9. Схема превращения аустенита (а) в мартенсит (б)

кристаллографическим плоскостям, которые по строению и параметрам близки к определенным плоскостям решетки мартенсита. Такими плоскостями могут являться: в решетке аустенита – плоскость семейства (111), в левой ячейке аустенита она показана пунктиром (рис. 3.9,а); в реш-

етке мартенсита – плоскость семейства (110). При нарушении когерентности перестройка аустенита в мартенсит нарушается, рост кристаллов мартенсита прекращается.

4. *Обратное превращение мартенсита в перлит* происходит при нагреве закаленных сталей и связано с диффузией углерода.

В зависимости от состава сплава, температуры образования кристаллы мартенсита имеют различную морфологию и структуру.

Пластинчатый (игольчатый) мартенсит образуется в высокоуглеродистых сталях с низкими значениями температур M_n и M_K . Кристаллы мартенсита представляют собой широкие пластины, в плоскости

шлифа они имеют вид игл (рис. 3.10,а), содержат большое число микродвойников, образующих *зоны повышенной травимости (мидрибы)*.

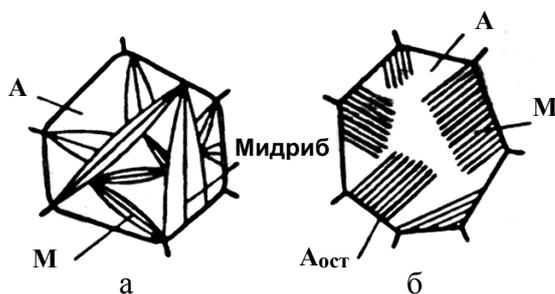


Рис. 3.10. Схема образования мартенсита:
а – пластинчатого (иглолистчатого);
б – пакетного (реечного)

Пакетный (реечный) мартенсит характерен для низко- и среднеуглеродистых, а также конструкционных легированных сталей. Тонкие параллельные пластины мартенсита, присоединенные одна к другой и разделенные малоугловыми границами, образуют пакет.

Толщина пластин мартенсита колеблется от 0,2 до 2,2 мкм, плотность дислокаций – 10^{10} - 10^{12} см⁻². В легированных сталях внутри пакетов между пластинами мартенсита присутствуют прослойки остаточного аустенита (рис. 3.10,б).

3.2. Отжиг стали

Отжиг – разупрочняющая термическая обработка. Режим назначают в соответствии с диаграммами состояния и изотермического распада аустенита. Скорость нагрева тем выше, чем меньше легированность стали, однороднее структура, проще конфигурация детали. Оптимальная скорость нагрева – 1 мин на 1 мм сечения детали, время выдержки – 20 % от времени нагрева. Среда нагрева в печи оказывает на сталь различное действие: окисляющее (O₂, CO₂, H₂O); восстанавливающее (CO, CH₄); обезуглероживающее (O₂, H₂); науглероживающее (CO, CH₄); нейтральное (азот, инертные газы). Для всех видов отжига характерно медленное охлаждение – 20-200 °С/час.

Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг применяется для устранения внутрикристаллической ликвации и выравнивания химического состава сплава. Кроме того, при нагреве растворяются избыточные карбиды. В основе всех процессов лежит диффузия. Температура нагрева зависит от температуры плавления $T_n = 0,8 T_{пл}$. Длительность – 8-20 часов. Скорость охлаждения выбирают таким образом, чтобы полностью успели пройти обратные диффузионные превращения. Отжигу подвергают отливки, поковки, прокат из средне- и высокоуглеродистых легированных сталей с целью улучшения обрабатываемости резанием.

Полный отжиг проводится для доэвтектоидных сталей для исправления структуры при их нагреве на 30-50 °С выше критической температуры A_{C3} (рис. 3.2), т. е. до *однофазного* аустенитного состояния. При

нагреве образуется мелкозернистый аустенит, после охлаждения сталь имеет мелкозернистую структуру.

Неполный отжиг проводится для заэвтектоидных сталей при нагреве на 30-50 °С выше критической температуры A_{C1} (см. рис. 3.2), т. е. до двухфазного состояния. В структуре сохраняется цементит вторичный, который при отжиге приобретает сферическую форму (сфероидизация). Неполный отжиг обязателен для инструментальных сталей.

Циклический или маятниковый отжиг применяют, если после неполного отжига цементит остается пластинчатым. После нагрева выше температуры A_{C1} следует охлаждение до 680 °С, затем снова нагрев до 750-760 °С и медленное охлаждение. В результате отжига получают зернистый цементит.

Рекристаллизационный отжиг применяется для снятия наклепа после холодной пластической деформации. Температура нагрева: $T_p = 0,4 T_{пл}$. Продолжительность зависит от габаритов изделия.

Отжиг для снятия напряжений, возникающих в неравномерно охлаждающихся отливках и поковках, в сварных соединениях, в деталях после обработки резанием. Температура нагрева выбирается в зависимости от вида предыдущей обработки и находится в широком диапазоне: $T_n = 160-700$ °С. Продолжительность зависит от габаритов изделия.

Нормализация – разновидность отжига, при котором сталь нагревают до аустенитного состояния на 30-50 °С выше A_{C3} (или A_{cm}) с охлаждением на воздухе. Твердость и прочность после нормализации несколько выше, чем после отжига. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. Для среднеуглеродистых сталей нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки с высоким отпуском. При таком режиме термической обработки изделие меньше подвергается короблению, исключаются закалочные трещины.

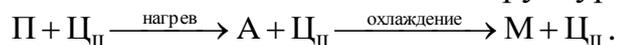
3.3. Закалка и отпуск

Конструкционные и инструментальные стали подвергают закалке для *максимального* повышения прочности и твердости. Основные параметры при закалке – температура нагрева и скорость охлаждения. Продолжительность нагрева зависит от нагревательного устройства, на 1 мм сечения затрачивается: в электрической печи – 1-1,5 мин., в пламенной печи – 1 мин., в соляной ванне – 0,5 мин.

Закалка из однофазного состояния (полная закалка) с нагревом на 30-50 °С выше критической температуры A_{C3} (линия GS на рис. 3.1) применяется для доэвтектоидных сталей. Изменение структуры стали:

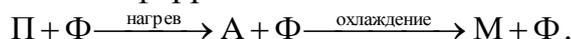


Закалка из двухфазного состояния (неполная закалка) с нагревом на 30-50 °С выше критической температуры A_1 (линия SK на рис. 3.1) применяется для заэвтектоидных сталей, которые предварительно подвергают отжигу для сфероидизации цементита. Карбиды округлой формы не вызывают снижения вязкости. Изменение структуры стали:

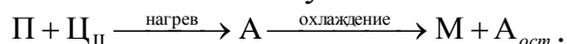


После охлаждения в структуре остается вторичный цементит, который повышает твердость и износостойкость режущего инструмента.

Неполная закалка доэвтектоидных сталей недопустима, поскольку в структуре остается мягкий феррит:



Полная закалка заэвтектоидных сталей недопустима, поскольку в структуре остается много остаточного аустенита:



Охлаждение при закалке. Скорость охлаждения определяется охлаждающей средой, формой изделия и теплопроводностью стали. Режим охлаждения должен исключить возникновение повышенных закалочных напряжений, которые могут привести к короблению и растрескиванию деталей сложной формы.

Оптимальный режим: максимальная скорость охлаждения в интервале температур A_1 – M_H для предотвращения распада переохлажденного аустенита в области перлитного превращения; минимальная – в интервале температур мартенситного превращения M_H – M_K с целью снижения термических напряжений. Охлаждающие среды: вода, технические масла, растворы солей и растворы полимеров, расплавы металлов и щелочей. Для легированных сталей с высокой устойчивостью аустенита используют минеральное масло (нефтяное), обеспечивающее небольшую скорость охлаждения, достаточную для мартенситного превращения.

Закаливаемость – способность стали приобретать высокую твердость при закалке. Закаливаемость определяется содержанием углерода, если менее 0,2 %, то степень упрочнения невелика.

Прокаливаемость – способность стали получать закалку на определенную глубину. Глубина закаленного слоя – расстояние от поверхности до середины слоя, в структуре которого имеются одинаковые объемы мартенсита и троостита. Чем выше степень легированности стали, тем меньше критическая скорость охлаждения и выше прокаливаемость. **Критический диаметр** – максимальное сечение детали, прокаливаемое в данном охладителе на глубину, равную радиусу изделия.

Способы закали. В зависимости от формы, массы и марки стали применяют разные способы закали (рис. 3.11).

Закалка в одном охладителе (V_1). Охлаждающая среда: вода – для крупных изделий из углеродистых сталей, масло – для небольших деталей простой формы из углеродистых и легированных сталей. Недостаток – большие закалочные напряжения.

Закалка в двух охладителях или прерывистая (V_2). Деталь быстро охлаждают в одном охладителе (вода) до 300°C и медленно в другом (масло). Применяется для закали инструмента. Недостаток – сложно определить момент переноса детали из одной среды в другую.

Ступенчатая закалка (V_3). Нагретое изделие помещают в охлаждающую среду (расплавы солей или металлов), температура которой на $30\text{--}50^\circ\text{C}$ выше точки M_H и выдерживают некоторое время, необходимое для охлаждения детали и выравнивания температуры по сечению. После выдержки охлаждают с малой скоростью (в масле или на воздухе).

Изотермическая закалка (V_4) отличается от ступенчатой большим временем выдержки в охлаждающих средах при температуре, соответствующей промежуточному превращению (выше линии M_H).

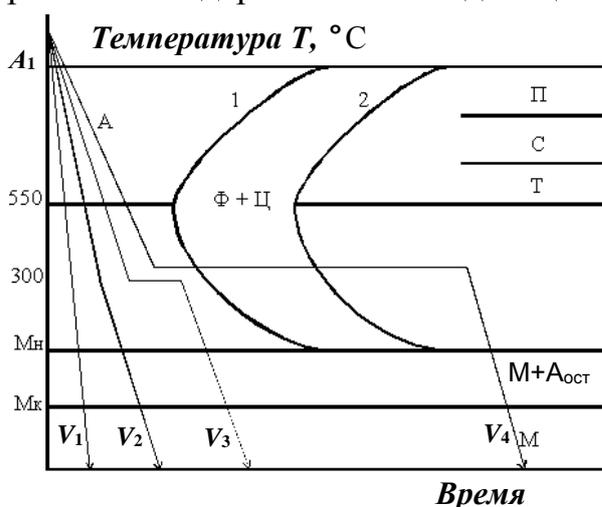


Рис. 3.11. Способы закали

Обеспечивается полное превращение переохлажденного аустенита в бейнит. Структура характеризуется высокой прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Применяется для ответственных изделий из легированных сталей.

Закалка с самоотпуском. Нагретые изделия помещают в охлаждающую среду, выдерживают до неполного охлаждения

и вытаскивают. Поверхностные слои изделия повторно прогреваются за счет внутренней теплоты до требуемой отпускной температуры, затем деталь охлаждается повторно, т. е. выполняется закалка, совмещенная с отпуском. Применяется способ для изделий, которые должны сочетать высокую твердость на поверхности и высокую вязкость в сердцевине (инструменты ударного действия: молотки, зубила).

Обработка стали холодом. Высокоуглеродистые и легированные стали имеют температуру окончания мартенситного превращения M_K значительно ниже 0°C . После закали до комнатной температуры в

стали сохраняется остаточный аустенит, снижающий твердость. Для его устранения проводят охлаждение при низких температурах до ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Обычно используют сухой лед. Обработку холодом проводят сразу после закалки, чтобы не допустить стабилизации аустенита. Прирост твердости – 1-4 HRC. Далее сталь подвергают низкому отпуску. Обработку холодом проводят на деталях шарикоподшипников, точных механизмов, измерительных инструментов.

Отпуск – заключительная термическая обработка закаленной стали с целью получения требуемых эксплуатационных свойств детали и уменьшения внутренних напряжений. Температуру выбирают, исходя из нужного уровня вязкости, пластичности и твердости стали.

Низкий отпуск – температура нагрева $150\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Остаточный аустенит превращается в мартенсит по бейнитному превращению. В мартенсите происходит перераспределение углерода. При $150\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ выделяется ϵ -карбид с ГПУ решеткой (Fe_2C), который имеет когерентную границу. При $200\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуются пластинки карбидов Fe_3C размером $80\text{x}200\text{ нм}$ и толщиной несколько атомных диаметров с когерентными либо полукogerентными границами. Пластинки растут, толщина увеличивается до $200\text{-}400\text{ нм}$, длина – более 1 мкм , границы становятся некогерентными. Наблюдается снижение тетрагональности решетки и внутренних напряжений. Структура стали – *мартенсит отпуска* – мелкие карбиды и мартенсит с высокой и низкой концентрацией углерода. Проводится для инструментальных сталей, для сталей после поверхностной закалки и цементации.

Средний отпуск – температура нагрева до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из решетки Fe_α выделяется избыточный углерод, карбиды приобретают строение цементита, растут, форма приближается к игольчатой. Структура стали – *троостит отпуска* – сочетает высокую упругость и твердость 40-45 HRC. Используется для изделий типа пружин, рессор, торсионов.

Высокий отпуск – температура нагрева свыше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменение фазового состава стали не происходит, микроструктура изменяется за счет роста и сфероидизации цементита. Наблюдается растворение мелких и рост крупных карбидных частиц. При $550\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется структура *сорбит отпуска*, сочетающая высокую пластичность и ударную вязкость при достаточной твердости. Используется для деталей машин, испытывающих ударные нагрузки. При нагреве стали до $650\text{-}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ получают грубую феррито-цементитную смесь – *перлит отпуска* (зернистый перлит).

Улучшение стали – термическая обработка, включающая закалку и высокий отпуск конструкционных сталей.

4. ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Упрочнение методом пластической деформации

Местной упрочняющей обработке подвергаются детали различных форм, размеров и назначений, изготовленные из различных конструкционных материалов – сталей, чугунов, алюминиевых и титановых сплавов и т. п. Панели, профили, дуги упрочняют на специальных (вибрационных, барабанных или дробеструйных) установках с последующим дополнительным упрочнением отдельных, особо ответственных или не упрочненных участков. Цилиндры, балки, коленчатые валы обычно упрочняются поверхностным наклепом по всей поверхности и по отдельным, заранее определенным участкам. Местному поверхностному упрочнению подвергают зоны концентрации напряжений (отверстия, шлицы, резьбы, пазы), а также те участки, которые недоступны при упрочнении на специальных установках.

В качестве параметров, определяющих способ и технологию упрочнения, принимают форму изделия, тип упрочняемой поверхности и требования к шероховатости. Предложена приоритетность применения тех или иных методов обработки (выделено курсивом) для деталей различных групп сложности:

1 группа деталей: плоскости сплошные и с вырезами и выступами – *обработка дробью*, накатывание, обработка механическими щетками;

2 группа: отверстия круглого и произвольного сечения – *раскатывание*, дорнование, чеканка, обработка дробью;

3 группа: сложные поверхности (несквозные, глубокие отверстия; окантовки и ребра жесткости; резьбовые и шлицевые поверхности) – *обработка дробью*, накатывание, обработка механическими щетками;

4 группа: сопряженные поверхности (пересечения плоских, сложных или цилиндрических поверхностей, фаски, скосы) – *обработка дробью*, накатывание, обработка механическими щетками, чеканка.

Дробеструйная обработка осуществляется на установках, выбрасывающих стальную или чугунную дробь диаметром 0,2-4 мм. Происходит пластическая деформация металла на глубину 0,01-0,4 мм. Упрочняют детали в канавках, на выступах. Обрабатывают изделия типа пружин, рессор; звенья цепей, гусениц; поршни; зубчатые колеса.

При *обработке роликами (раскатывание, накатывание)* деформация осуществляется давлением ролика из твердого металла на поверхность обрабатываемого изделия. При усилиях на ролик, превышающих предел текучести обрабатываемого материала, происходит наклеп на

нужную глубину. Обкатка роликами применяется при обработке шеек валов, проволоки, при калибровке труб, прутков. Не требуется специальное оборудование, можно использовать токарные или строгальные станки. Глубина упрочненного слоя при обкатке достигает 1,5 мм.

4.2. Упрочнение методом поверхностной закалки

При поверхностной закалке нагревается до температуры закалки только поверхностный слой детали с последующим быстрым охлаждением. Толщина закаленного слоя определяется глубиной нагрева.

Закалка токами высокой частоты. Способ разработан В.П. Вологдиным (рис. 4.1). Если в переменное магнитное поле, создаваемое проводником-индуктором, поместить металлическую деталь, то в ней будут индуцироваться вихревые токи, вызывающие нагрев металла. Чем больше частота тока, тем тоньше получается закаленный слой. Обычно используются машинные генераторы с частотой 5-15 кГц и ламповые генераторы с частотой до 1 МГц. Глубина закаленного слоя – до 5 мм. Индукторы изготавливаются из медных трубок, внутри которых циркулирует вода, благодаря

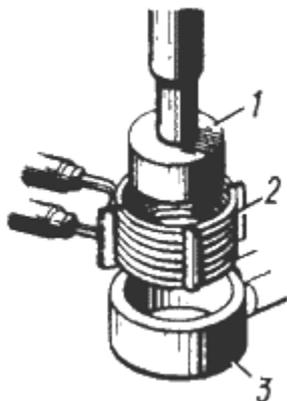


Рис. 4.1. Схема процесса закалки ТВЧ

чему они не нагреваются. Форма индуктора соответствует внешней форме изделия, при этом зазор между индуктором и поверхностью изделия должен быть равномерный и минимальный.

Боковая поверхность детали 1 нагревается в индукторе 2 в течение 3-15 с. Затем деталь опускается в охлаждающее устройство – *спрейер* 3, через отверстия которого на нагретую поверхность разбрызгивается жидкость. Высокая скорость нагрева смещает фазовые превращения в область более высоких температур. Поэтому температура закалки при нагреве ТВЧ должна быть выше, чем при обычном нагреве.

После охлаждения формируется структура мелко-игольчатого мартенсита. Твердость повышается на 2-4 *HRC* по сравнению с обычной закалкой, возрастает износостойкость. Перед закалкой ТВЧ изделие подвергают нормализации, после – низкому отпуску. Метод используется для изделий из сталей с содержанием углерода 0,4-0,6 %.

Преимущество метода: высокая производительность; отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности; отсутствие закалочных трещин; возможность автоматизации процесса; возможность закалки отдельных участков детали. **Недостаток** – высокая стоимость.

Газопламенная закалка. Нагрев осуществляется газо- или керосино-кислородным пламенем с температурой 3000-3200 °С. Структура поверхностного слоя после закалки – мартенсит или мартенсит и феррит. Толщина закаленного слоя – 2-4 мм, твердость – 50-56 HRC. Метод применяется для закалки крупных изделий, имеющих сложную поверхность (косозубые шестерни, червяки), для закалки стальных и чугунных прокатных валков. Используется в массовом и индивидуальном производстве, при ремонтных работах. Недостатки: невысокая производительность; сложность регулирования глубины закаленного слоя и температуры нагрева (возможность недогрева или перегрева).

4.3. Химико-термическая обработка

Для упрочнения поверхностного слоя деталей (твердости, износостойкости) производят его диффузионное насыщение различными элементами. Процесс изменения химического состава, свойств поверхности изделия под действием температуры и окружающей среды заданного состава называется *химико-термической обработкой*.

Химико-термическая обработка деталей применяется в промышленности с целью повышения: поверхностной твердости, износостойкости, антизадириных свойств, усталостной прочности. Для резкого повышения сопротивления абразивному изнашиванию перспективны процессы борирования, азотирования, диффузионного хромирования, позволяющие получить в поверхностном слое бориды железа, карбиды хрома или другие химические соединения металлов, отличающиеся высокой твердостью. Целью химико-термической обработки является также защита поверхности деталей от коррозии в агрессивных средах (силицирование, хромирование) и образования окалины (алитирование).

Обычно деталь помещают в среду, богатую элементом, который диффундирует в металл. При этом происходят следующие процессы: диссоциация (деление) молекул на атомы, адсорбция (осаждение) их на поверхности и диффузия (проникновение) в глубь материала.

Диссоциация – химическая реакция обратимого распада молекул и образования атомов диффундирующего элемента. Термическая диссоциация происходит при повышении температуры, электролитическая – при растворении электролитов (расщепление молекул электролита на ионы), фотохимическая – при действии света. Количественной характеристикой служит *степень диссоциации* – отношение числа распавшихся молекул к общему числу.

Адсорбция. Физическая адсорбция возникает за счет ван-дер-ваальсовых взаимодействий. Характеризуется обратимостью и умень-

шением адсорбции при повышении температуры. Химическая адсорбция (хемосорбция) осуществляется путем химического взаимодействия. Она обычно необратима. В отличие от физической, является локализованной, молекулы не могут перемещаться по поверхности. Повышение температуры способствует ускорению ее протекания.

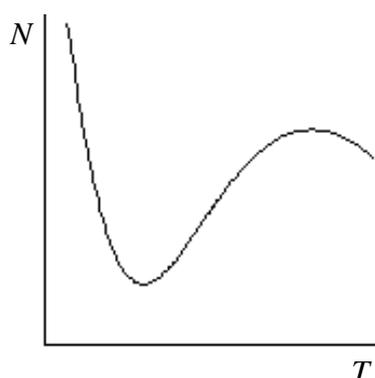


Рис. 4.2. Зависимость количества адсорбированных атомов от температуры

Например, кислород на металлах при низких температурах адсорбируется по законам физической адсорбции. При повышении температуры начинает протекать химическая адсорбция. С некоторой температуры увеличение химической адсорбции начинает перекрывать падение физической адсорбции, поэтому температурная зависимость адсорбции имеет четко выраженный минимум (рис. 4.2).

Диффузия – проникновение атомов вглубь материала. На поверхности концентрация диффундирующего элемента наибольшая, по мере удаления от поверхности концентрация падает. Глубина проникновения атомов – толщина насыщенного слоя. Количественно процесс диффузии характеризуется *коэффициентом диффузии D* (количеством атомов, продиффундировавших через площадку в 1 см² в течение 1 с при перепаде концентраций по обе стороны площадки, равном единице), имеющим размерность – см²·сек⁻¹. Зависимость *D* от температуры имеет вид:

$$D = A \cdot \exp(-E_a / k T),$$

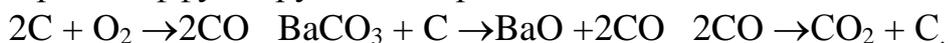
где *A* – коэффициент, зависящий от типа кристаллической решетки; *E_a* – энергия активации диффузии (эВ); *T* – абсолютная температура (К); *k* – постоянная Больцмана (0,8617·10⁻⁴ эВ/К). Из уравнения следует, что коэффициент диффузии очень сильно зависит от энергии активации: чем больше *E_a*, тем меньше *D*.

Продолжительность процесса химико-термической обработки определяется требуемой толщиной диффузионного слоя. При постоянных параметрах процесса (температура и др.) увеличение толщины слоя во времени подчиняется параболическому закону: $y \sim (\tau)^{1/2}$. Где *y* – толщина слоя, τ – продолжительность процесса. Чем больше толщина уже имеющегося слоя, тем меньше он увеличивается за то же время. В приповерхностных слоях концентрация диффундирующего элемента будет возрастать более медленно, чем на глубине. Уже внедрившиеся атомы будут служить тормозом дальнейшей диффузии следующих атомов.

Особенности диффузии в металлах объясняются кристаллическим строением. Если растворимость диффундирующего вещества в металле мала, то диффузия наблюдается преимущественно по границам зерен. В случае значительной растворимости диффундирующего элемента в основном металле роль пограничных слоев повышенной растворимости уменьшается. В момент фазовых превращений диффузия протекает гораздо быстрее.

Цементация – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей атомами углерода. Цель – достижение высокой твердости и износостойкости поверхности детали в сочетании с ее вязкой серединой. На цементацию поступают механически обработанные детали с припуском на шлифование 50-100 мкм (стали с содержанием углерода 0,1-0,2 %). Осуществляется процесс цементации при высокой температуре (900-950 °С), когда сталь находится в аустенитном состоянии (α -железо растворяет не более 0,02 % углерода). Детали помещаются в среду определенного состава – карбюризатор.

В качестве *твердого карбюризатора* используют смесь древесного угля с добавлением катализаторов: 20-25 % BaCO_3 и 3,5-5,0 % CaCO_3 . При термическом разложении карбюризатора образуется атомарный углерод, который диффундирует в поверхностный слой металла:



Длительность процесса – от 5 до 24 часов, глубина науглероженного слоя составляет от 0,4 до 2,5 мм. Чем дольше процесс, тем на большую глубину происходит насыщение поверхности стали углеродом.

Более высокопроизводительный процесс – *цементация в газообразном карбюризаторе* с углеродосодержащими газами (метан, пары керосина и т. п.). В специальных печах газы термически разлагаются с образованием атомарного углерода, который диффундирует в сталь. Процесс длится 3-5 часов, глубина слоя – 0,8-1,2 мм. Распределение углерода в поверхностном слое после цементации неравномерное: поверхностная заэвтектоидная зона (содержание углерода более 0,9 %, структура перлит + вторичный цементит); эвтектоидная зона (содержание углерода около 0,8 %, структура перлит); доэвтектоидная зона (содержание углерода менее 0,7 %, структура перлит + феррит), плавно переходящая в структуру сердцевины.

При длительной выдержке, при высокой температуре сталь становится крупнозернистой (особенно при цементации в твердых карбюризаторах). После цементации проводят термическую обработку с целью упрочнения поверхностного слоя и измельчения зерна (рис. 4.3).

Менее ответственные детали подвергают закалке от температуры цементации с последующим низким отпускком. Подстуживание снижает

внутренние напряжения, обработка холодом уменьшает количество остаточного аустенита в цементованном слое. Если требуются повышенные механические свойства, то охлаждение после цементации производят медленно, а закалка осуществляется при повторном нагреве с последующим низкотемпературным (150-200 °С) отпуском. Особый случай – сквозная цементация тонких штампованных деталей из низкоуглеродистой стали (детали пишущих машин, роликовых цепей и т. п.).

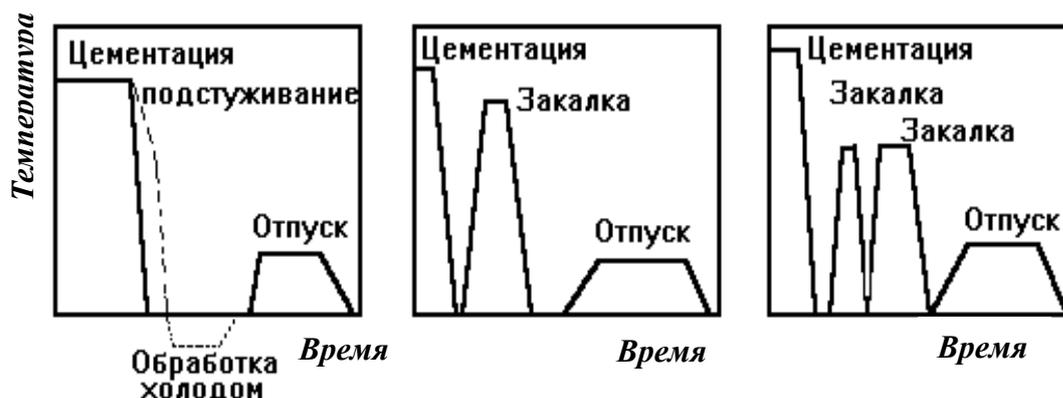
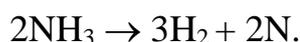


Рис. 4.3. Режимы термической обработки цементованных деталей

Азотирование – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей атомами азота. При азотировании достигается более высокая твердость (70-72 HRC) и износостойкость, чем при цементации, увеличивается коррозионная стойкость стали в атмосфере и усталостная прочность. Высокая твердость азотированного слоя сохраняется при нагреве до 500 °С, цементованного – до 200 °С. Осуществляется азотирование при 500-550 °С в атмосфере аммиака, который разлагается с образованием атомарного азота, диффундирующего в поверхность металла:



Азот образует с железом и легирующими элементами нитриды (Fe_4N , Fe_2N , CrN , MoN , AlN), которые имеют более высокую твердость, чем карбиды железа. Мелкие частицы нитридов (толщиной до 2-4 нм) являются эффективным препятствием для движения дислокаций. Скорость диффузии при низких температурах мала, процесс азотирования идет медленно. Слой глубиной 0,1-0,8 мм при 500-550 °С образуется за время от 3 до 90 часов. Операция азотирования является заключительной в технологическом процессе и заменяет операцию отпуска. Проводится после полной механической обработки и закалки. Азотированию подвергаются конструкционные, среднеуглеродистые стали, легированные хромом, алюминием и другими элементами (38ХМЮА).

Нитроцементация – одновременное диффузионное насыщение поверхностного слоя деталей азотом и углеродом. По своим свойствам нитроцементированный слой занимает промежуточное положение между цементацией и азотированием. Процесс нитроцементации осуществляется в газовой смеси (светильный газ, метан) или жидкой среде. Длительность газовой нитроцементации – от 2 до 12 часов. После необходима упрочняющая термическая обработка – закалка и низкотемпературный отпуск. В структуре слоя образуются мартенсит, карбонитридные и нитридные мелкие частицы. Твердость достигает 67-68 HRC.

Температура и продолжительность обработки влияют на концентрацию и соотношение элементов в поверхностном слое (рис. 4.4). При

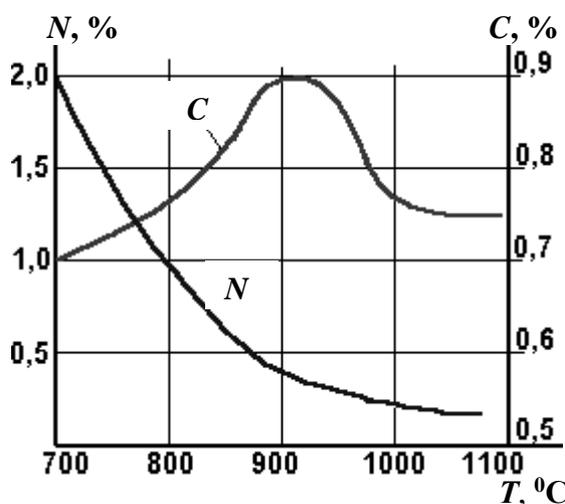


Рис. 4.4. Влияние температуры газовой нитроцементации на содержание азота и углерода в поверхностном слое

высокотемпературной обработке (820-850 °C) получают слои 1,5-2,0 мм, в которых много углерода, но мало азота. При низкотемпературной (530-570 °C) – слои тоньше, в них много азота, но мало углерода. Низкотемпературный процесс, идущий в жидкой среде, называют *цианированием*. Нитроцементации подвергают детали, инструмент, изготовленные из легированных сталей. Режим обработки и глубину упрочненного слоя выбирают в зависимости

от условий работы, действующих нагрузок, срока службы.

Диффузная металлизация – диффузионное насыщение стали различными элементами. При жидкостной металлизации деталь погружают в расплав металла, при твердой и газовой – насыщение происходит с помощью летучих соединений хлора с металлами ($AlCl_3$, $CrCl_3$, $SiCl_4$).

Алимирование (насыщение алюминием) применяют для повышения стойкости деталей против газовой коррозии в водяном паре, на воздухе, в сероводороде и топочных газах при повышенных температурах. Алимированию подвергают малоуглеродистую нелегированную сталь, жаропрочные сплавы на никелевой основе. Способы алимирования – в твердой среде (порошковых смесях), в расплаве, напыление расплавленного алюминия. Твердые смеси содержат от 30 до 90 % порошка железоалюминиевого сплава с небольшим количеством окиси алюминия и 1-2 % хлористого аммония. Процесс проводится при 750-1050 °C в те-

чение 1-20 часов. Глубина слоя – 0,02-0,7 мм, содержание алюминия в поверхностном слое – 15-65 %. Алитирование в расплаве алюминия (с добавлением кремния) осуществляется погружением деталей в ванну с температурой 720-850 °С, время выдержки 25-45 мин. Затем проводят диффузионный отжиг 1-2 часа при 950 °С. Глубина слоя – 0,3-0,5 мм.

Хромирование направлено на повышение твердости и коррозионной стойкости. Производится при 800-1300 °С в порошковых смесях, в состав которых входят: Cr или FeCr, 1-3 % NH₄Cl или NH₄I, остальное – Al₂O₃. Перед хромированием детали подвергаются шлифовке, возможна предварительная цементация. При изготовлении штампового инструмента после хромирования производится притирка. Увеличение размеров при хромировании – 0,01-0,03 мм на сторону.

Борирование повышает твердость и износостойкость. Осуществляется при температуре 920-950 °С в жидких средах (электролизное; в расплаве буры с карбидом бора), в газообразных средах и твердых смесях. Борированные детали (штулки буровых насосов, струйных сопел, звеньев цепей пил) подвергаются закалке токами высокой частоты. Время борирования в жидких средах и газах – от 2 до 20 часов, в порошках – 6 часов. Глубина борированного слоя составляет 0,2 мм.

Сульфоцианирование улучшает антифрикционные свойства и повышает усталостную прочность деталей, обрабатываются поршневые кольца, гильзы цилиндров, чугунные вкладыши, зубчатые и червячные колеса. Процесс происходит в течение 1,5-2 часов при 560-580 °С. В зависимости от марки материала и состава ванны получают обогащенный серой, азотом и углеродом слой глубиной 0,05-0,1 мм.

Силицирование применяется для деталей химического и нефтяного машиностроения с целью повышения коррозионной стойкости при работе в морской воде, серной, соляной, азотной кислотах и других агрессивных средах. Осуществляется при 950-1000 °С в газовых и жидких средах, в вакууме и порошкообразных смесях в течение 10-50 часов. Силицирование понижает предел прочности, ударную вязкость.

Титанирование проводится при 950-1300 °С в твердых смесях, жидких и газообразных средах с целью получения поверхностных слоев, стойких в различных агрессивных средах. Продолжительность – 0,2-6 часов, глубина слоя – от 0,02 до 0,45 мм; до 1,5 мм – при обработке ферротитановым порошком. Титанированные железные листы обладают высокой коррозионной стойкостью и хорошо свариваются.

5. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Легированные стали – стали, содержащие дополнительные компоненты (легирующие элементы – хром, никель, кремний, марганец, вольфрам, молибден, ванадий и др.), для получения требуемых свойств.

Некоторые элементы имеют большее сродство к кислороду, сере, фосфору, чем железо и образуют *неметаллические включения*: оксиды (MnO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5), сульфиды (MnS), фосфиды (Fe_3P). Количество этих включений в обычных промышленных сталях невелико.

Легирующие элементы, имеющие большее сродство к углероду, чем железо, образуют простые и сложные карбиды.

Кремний, алюминий, медь, никель, магний, не образуют карбидов. Находятся в сталях в твердых растворах (в аустените или в феррите). При определенных условиях снижают устойчивость других карбидов.

Такие элементы как серебро и свинец нерастворимы в стали и содержатся в виде *металлических включений*. Предельная растворимость меди – 1,0 %. Поэтому стали легированные серебром, свинцом (кроме автоматных сталей) и медью (более 1,0 %) промышленного использования не имеют.

В процессе длительного нагрева выше 900 °С происходит рост зерен аустенита – *перегрев* стали. Легирующие элементы в той или иной мере уменьшают склонность к росту зерен аустенита. Наиболее сильно тормозят укрупнение зерен аустенита – V, Ti, Al, Zr; в меньшей степени – W, Mo, Cr; почти не влияют – Ni, Si.

1. Влияние малых концентраций легирующих элементов

В небольшом количестве легирующие элементы замещают атомы железа в твердых растворах (аустенит, феррит, мартенсит, цементит) и влияют на их свойства и температурные интервалы существования.

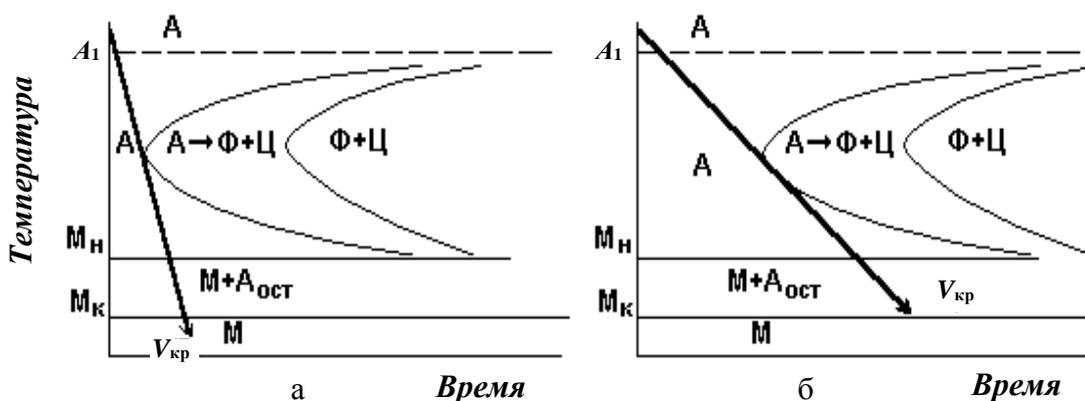


Рис. 5.1. С-образные диаграммы для сталей:
а – углеродистой; б – легированной эвтектоидной

Большинство легирующих элементов замедляет распад переохлажденного аустенита на феррито-цементитную смесь за счет замедления скорости диффузии углерода. Некоторые элементы (Mn, Ni, Si) не изменяют форму кривых на C-образной диаграмме (см. рис. 5.1,а). При введении Cr, W, V, Ti на C-образной диаграмме изменяется как форма кривых, так и сами кривые смещаются вправо по оси времени (рис. 5.1,б). Это приводит к уменьшению критической скорости охлаждения при закалке и позволяет упрочнять более массивные изделия по сравнению с изделиями, изготовленными из углеродистых сталей. Прокаливаемость углеродистых сталей – 10-15 мм, легированных сталей – до 100-200 мм и больше. Наиболее эффективно повышает прокаливаемость введение одновременно нескольких элементов: Cr–Mo, Cr–Ni, Cr–Ni–Mo и др.

Попадая в феррит, легирующие элементы (кремний, марганец и никель) растворяются по типу замещения, и существенно повышают прочность стали. При введении 4 % Si твердость феррита (60-80 HB) возрастает до 200 HB. Меньшее влияние оказывают Mo, W и Cr.

При нагреве легированный мартенсит более устойчив, чем нелегированный. Это влияние легирующих элементов на мартенсит используется при создании жарочных сталей.

Легирующие элементы, имеющие большее, чем у железа сродство к углероду, замещают атомы железа в цементите с образованием легированного цементита: например $(\text{FeMn})_3\text{C}$ вместо Fe_3C . Однако если марганец может заместить в решетке цементита все атомы железа с образованием карбида – $(\text{Mn})_3\text{C}$, то хром – 25 %, молибден – 3 %, вольфрам – 1 %. Более сильные карбидообразующие элементы (Ti, Nb, V, Zr) мало растворяются в цементите и образуют специальные карбиды.

2. Влияние больших концентраций легирующих элементов

Карбидообразующие элементы. Большинство легирующих элементов имеют высокую степень сродства к углероду и способны образовывать карбиды. К ним относятся переходные металлы с не полностью построенной 4s-электронной оболочкой (Fe–Mn–Cr–Mo–W–Nb–Zr–Ti). Чем меньше электронов на оболочке, тем устойчивее образующийся карбид. По сравнению с карбидами, имеющими сложные кристаллические решетки (Fe_3C , Mn_3C , Cr_7C_3), карбиды, имеющие простые решетки (Mo_2C , WC, VC, NbC) имеют более высокую твердость, разлагаются и растворяются в аустените при более высоких температурах, медленнее растут. Сталь с такими карбидами более износо- и теплостойкая. Под закалку ее нагревают до более высоких температур.

Некоторые легирующие элементы, вводимые в большом количестве, могут образовывать *интерметаллические соединения* (Fe_2W ,

Co₇W₆, Ni₃Ti и др.), что оказывает большое влияние на формирование структуры и свойства высоколегированных сталей.

3. Влияние на температуру превращения Fe_α→Fe_γ

Аустенитообразующие элементы (Cu, N, особенно Ni, Mn, Co) расширяют температурную область существования легированного аустенита, т. е. могут существовать твердые растворы с высокой предельной растворимостью элементов в ГЦК решетке железа до комнатной температуры и ниже. Такие сплавы называют *аустенитными сталями*.

Ферритообразующие элементы (Cr, Si, Al, Mo, V, Ti, W, Nb Zr) расширяют температурную область существования легированного феррита. Твердые растворы с ограниченной растворимостью легирующих элементов в ОЦК решетке железа (обычно 1-2 %, для хрома – до 12 %), устойчивы в широком температурном интервале – до линии солидуса. Такие сплавы называют *ферритными сталями*.

4. Влияние на растворимость углерода в γ-железе

Легирующие элементы оказывают влияние на эвтектоидную концентрацию углерода (точка *S* диаграммы состояния Fe–C) и предельную растворимость углерода в γ-железе (точка *E* диаграммы). Примеси Ni, Co, Si, W, Mo, Cr и Mn сдвигают точки *S* и *E* в сторону меньшего содержания углерода, V, Ti и Nb – большего содержания.

Наиболее распространены стали, содержащие следующие элементы.

Хром – повышает коррозионную стойкость и твердость, способствует образованию тугоплавких окислов. Относится к недефицитным легирующим компонентам, что определяет его широкое использование (до 0,3 % в низко-, 0,7-3,5 % – в средне- и 9-35 % – в высоколегированных хромистых и хромоникелевых сталях).

Марганец – повышает предел текучести, но делает сталь чувствительной к перегреву. Для измельчения зерна вводятся карбидообразующие компоненты. Марганец используется как заменитель никеля (до 1,5 %). В значительных количествах (11-14 % в сталях типа Г13Л) обеспечивает высокую вязкость, износостойкость и повышенную степень наклепа. Относится к дешевым легирующим элементам.

Никель (0,2-35,0 %) – сильно повышает вязкость, хладостойкость, коррозионную стойкость, пластические и прочностные свойства сталей, измельчает зерна. Дефицитный дорогостоящий элемент.

Кремний (1,5-2,0 %) – дешевый, не образующий карбидов элемент, значительно повышает жидкотекучесть, тормозит снижение прочности при отпуске, но ухудшает свариваемость, повышает порог хладноломкости при содержании свыше 1 %.

Молибден (0,15-0,8 %) **и вольфрам** (0,18-1,8 %) – относят к дорогим карбидообразующим элементам. Увеличивают твердость и прочность

стали при ударных нагрузках и высоких температурах, измельчают зерно, повышают стойкость к отпуску, увеличивают прокаливаемость.

Титан (0,02-1,0 %) **и ванадий** (0,05-0,8 %) – относятся к сильным карбидообразующим элементам, повышающим прочность и вязкость. Вводятся в стали, содержащие хром, марганец, никель для измельчения зерна. При повышенном содержании образуют карбиды, трудно растворимые при нагреве, которые снижают прокаливаемость; располагаясь по границам зерен способствуют развитию хрупкого разрушения.

Бор (0,002-0,005 %) – используется для *микролегирования сталей* с целью увеличения прокаливаемости. Микролегирование бором эквивалентно 1,0 % никеля; 0,5 % хрома и 0,2 % молибдена.

5.1. Маркировка легированных сталей

Легирующие элементы в сталях обозначаются заглавными буквами русского алфавита. Цифры после букв указывают процентное содержание соответствующего элемента (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Маркировка легированных конструкционных сталей

Буква	Элемент	Буква	Элемент	Буква	Элемент
А	азот	К	кобальт	Т	титан
Б	ниобий	Н	никель	Ф	ванадий
В	вольфрам	М	молибден	Х	хром
Г	марганец	П	фосфор	Ц	цирконий
Д	медь	Р	бор	Ч	редкоземельный
Е	селен	С	кремний	Ю	алюминий

Буква А, стоящая перед началом марки, обозначает марку автоматной стали с повышенным содержанием серы, свинца или селена для улучшения обработки резанием. Буква А, стоящая в середине марки, обозначает легирующий элемент – азот. В конце марки буква А ставится для обозначения высококачественных легированных сталей с пониженным содержанием серы и фосфора.

В обозначении легированных конструкционных сталей в начале марки указывается двухзначное число, показывающее содержание углерода в сотых долях процента. Далее перечисляются легирующие элементы. Число, следующее за обозначением элемента, показывает его содержание в процентах. Если число не стоит, то содержание элемента не более 1,5 %. Например, сталь марки 15Х25Н19ВС2 содержит 0,15 % углерода, 25 % хрома, 19 % никеля, до 1,5 % вольфрама и 2 % кремния.

В обозначении легированных инструментальных сталей в начале марки указывается однозначное число, показывающее содержание углерода в десятых долях процента. Если углерода более 1 %, то число не указывается. Например: стали Х12М, ХВГ. Далее перечисляются легирующие элементы, с указанием их содержания в процентах.

Некоторые стали имеют нестандартные обозначения, которые указываются в начале марки: быстрорежущие инструментальные стали начинаются с буквы Р, автоматные – с буквы А, шарикоподшипниковые – с буквы Ш, электротехнические – с буквы Э, строительные – с буквы С.

5.2. Классификация легированных сталей

По химическому составу стали делятся в зависимости от того, какими элементами она легирована: хромистая, хромоникелевая и т.д.

По количеству легирующих элементов стали подразделяют на: низко- (до 2,5 %), средне-(2,5-10 %) и высоколегированные (выше 10 %).

По структуре стали делятся на классы: ферритный, перлитный, бейнитный, мартенситный, аустенитный и ледебуритный (карбидный). При охлаждении легированных сталей из аустенитного состояния можно получить различные структуры – перлит, мартенсит, аустенит. Обусловлено это тем, что С-образные кривые под влиянием большинства легирующих элементов смещаются вправо по оси времени (см. рис. 5.1), температуры мартенситного превращения: M_H и M_K – в область более низких температур. *Стали перлитного класса* обычно низколегированные (30Х, 55С2), *мартенситного* – среднелегированные (40Х13, Р6М5), *аустенитного* – высоколегированные (120Г13, 55Х20Г9АН4).

По назначению стали делятся на: конструкционные, инструментальные и стали с особыми физическими и химическими свойствами.

Конструкционные легированные стали – низко- (0,1-0,25 %) и среднеуглеродистые (0,3-0,6 %). Легирующие элементы добавляют для увеличения прокаливаемости (Cr, Mn, Mo), снижения порога хладоломкости (Ni). Обозначения в конце марки: ПП – сталь повышенной прокаливаемости, Л – литейная, К – сталь для котлов и др.

Строительные делят на стали для сварных металлоконструкций и арматурные для армирования железобетонных конструкций.

Свариваемые строительные стали предназначены для изготовления конструкций мостов, ферм, котлов, газо- и нефтепроводов и т. д. Отличительное их технологическое свойство – хорошая свариваемость, которая зависит от содержания углерода (не более 0,25 %). Обычно ис-

пользуют низколегированные, низкоуглеродистые стали: 09Г2С, 17ГС, 15ГФ, 14Г2АФД, 10ХСНД и др.

Главный недостаток углеродистых свариваемых строительных сталей (Ст0, Ст2) – низкая хладостойкость. Проблема повышения прочности и надежности при эксплуатации в Сибири и районах крайнего Севера решается с помощью применения низколегированных сталей (18Г2С, 25Г2С, 35ГС), упрочненных и неупрочненных.

Арматурные строительные стали предназначены для изготовления: ненапряженных железобетонных конструкций – стали обыкновенного качества (Ст3, Ст5); предварительно напряженных – средне- и высокоуглеродистые стали в горячекатаном состоянии, упрочненные.

Автоматные стали специально созданы для изготовления деталей в массовом производстве (например, крепежные изделия). Изготовление деталей должно быть высокотехнологичным, производительным, с высокими требованиями по размерам и чистоте поверхности. От материала не требуются высокие механические свойства. Стали содержат (0,08-0,45 %) углерода, повышенное количество серы (0,1-0,3 %), фосфора (0,05 %), марганца (0,7-1,0 %), а также селен, кальций, свинец. Стали маркируют буквой А и цифрами, обозначающими содержание углерода в сотых долях процента: А12, А20, А30. Присутствие свинца (0,15-0,3 %) обозначается буквой С (АС11, АС14), кальция – буквой Ц (АЦ45Х, АЦ40Г2), селена – буквой Е (А35Е).

Сера находится в виде неметаллических включений – сульфидов, которые нарушают сплошность металла в зоне резания и способствуют получению легко ломающейся стружки. Фосфор повышает твердость и прочность, что также способствует образованию хрупкой стружки и получению обработанной поверхности высокого качества.

В легированных автоматных сталях повышенной обрабатываемости, включения свинца, селена, теллура и кальция играют роль смазки и препятствуют схватыванию инструмента с материалом заготовки. Это облегчает образование и отделение стружки. Для увеличения скорости резания свинец заменяют селеном.

Для получения высоких механических свойств автоматные стали, дополнительно легируют марганцем, кремнием, хромом, молибденом: (АС30ХМ, АС38ХГМ).

Конструкционные стали общего назначения (в том числе цементуемые, улучшаемые, азотируемые)

Углеродистые стали применяются при изготовлении мелких деталей, что связано с их низкой прокаливаемостью. От материала не требуются высокие механические свойства. Повышение механических свойств достигается с помощью оптимального легирования.

Для изготовления деталей, подвергаемых цементации или нитроцементации, используются малоуглеродистые (до 0,25% С) низко- и среднелегированные стали. Легирование хромом (стали 15Х, 20Х) позволяет применять после цементации закалку в масло вместо закали в воду. Это уменьшает коробление и образование трещин. Увеличение степени легирования хромом, дополнительное легирование никелем, молибденом, вольфрамом увеличивает прокаливаемость крупногабаритных изделий (стали 20ХН, 12ХНЗА, 18Х2Н4ВА, 30ХМА).

Улучшаемые стали – основным методом упрочнения изделий по всему сечению является улучшение (закалка с высоким отпуском). *Первая группа* – углеродистые стали (Ст35, 40, 45, 50), которые прокаливаются насквозь при диаметре до 12 мм. Они применяются для изготовления изделий малых сечений. *Вторая группа* – хромистые стали (30Х, 40Х), у которых критический диаметр при закалке в масле составляет 15-30 мм. *В третью группу* входят стали типа 30ХМ, 40ХГ, 30ХГТ, 30ХГС, у которых критический диаметр 30-60 мм. *Четвертая группа* – стали типа 40ХН, 40ХНМ – 35-70 мм. *Пятая группа* – комплексно легированные стали, например, 38ХНЗМФА – до 200 мм.

Азотируемые стали относятся к группе улучшаемых сталей, поскольку в процессе азотирования они подвергаются нагреву до температур, соответствующих высокому отпуску.

Высокопрочные стали (предел прочности более 1500 МПа) – это комплексно-легированные мартенситостареющие стали (МСС) и стали с пластичностью, наведенной превращениями (ПНП-стали).

МСС марки 03Н18К9М5Т (0,03 % С) после закали имеют структуру безуглеродистого мартенсита. Упрочнение происходит при распаде мартенсита и выделении дисперсных включений типа Ni_3Ti , Fe_2Mo и др. Это явление называется старением мартенсита, сталь – *мартенситостареющей*. Стали применяют в самолето- и ракетостроении, криогенной технике и при повышенных температурах (до 450 °С).

ПНП-стали – стали аустенитного класса. После закали сталь марки 30Х9Н8М4Г2С2 имеет аустенитную структуру, т. к. точка начала мартенситного превращения лежит ниже 0 °С. Последующая пластическая деформация при 400-600 °С вызывает явления наклепа и выделение карбидов, что упрочняет сталь. Область применения: силовые детали авиационных конструкций, броневой лист и др.

Рессорно-пружинные стали предназначены для изготовления пружин, упругих элементов и рессор различного назначения. Они должны обладать высоким сопротивлением к малым пластическим деформациям, при достаточной пластичности и вязкости. Для получения

этих свойств сталь должна содержать более 0,5-0,7 % углерода и быть подвергнута термической обработке – закалке и среднему отпуску или деформационному упрочнению (наклепу).

Углеродистые стали 65Г, 70, 75 и У10 применяют для пружин малого сечения, закаливаемых в масле и испытывающих невысокие напряжения. Кремнистые стали 55С2, 60С2А, 70С3А имеют высокие пределы текучести и упругости, поскольку кремний повышает прокаливаемость. Стали типа 50ХА, 50ХФА, 55ХГР обладают повышенной усталостной прочностью при рабочих температурах до 300 °С.

Стали для шариковых и роликовых подшипников. Для изготовления тел качения и подшипниковых колец малых сечений используют хромистую сталь ШХ15, больших сечений – сталь повышенной прокаливаемости – ШХ15СГ. Сталь ШХ15 содержит около 1 % углерода и 1,5 % хрома. Сталь ШХ15СГ содержит также повышенное количество марганца (1 %) и кремния (0,5 %). Термическая обработка подшипниковых сталей состоит из закалки от температуры 850 °С и низкотемпературного отпуска. Достигается твердость не ниже 62 HRC. Подшипники, работающие в агрессивных средах, изготавливаются из нержавеющей сталей с высоким содержанием хрома (95Х18, 110Х18).

Инструментальные стали предназначены для изготовления различных инструментов: режущего, штампового и мерительного. Режущий инструмент работает в условиях высоких контактных нагрузок и трения с обрабатываемым металлом. Для обеспечения требуемой точности изготовления геометрия и свойства режущей кромки не должны изменяться в процессе работы. Материал инструмента должен обладать высокой твердостью (60 HRC), износостойкостью и достаточной ударной вязкостью, чтобы сохранять геометрию режущей кромки и сопротивляться разрушению при динамических нагрузках.

При резании происходит нагрев режущей кромки инструмента. Поэтому основное требование, предъявляемое к инструментальным материалам – теплостойкость (красностойкость) – способность сохранять твердость и режущие свойства при длительном нагреве. По назначению и теплостойкости выделяют несколько подгрупп сталей:

а) для режущего инструмента, работающего с небольшим разогревом до 350 °С (стали ХМФ, 9ХС);

б) для режущего инструмента, работающего в тяжелых условиях, с разогревом до 500-650 °С (быстрорежущие стали Р18, Р9, Р6М5);

в) для штампов холодного деформирования (стали ХВГ, Х6ВФ);

г) для штампов горячего деформирования (стали ХВ4Ф, Х12МФ);

д) для измерительного инструмента (стали 9Х1, 9ХВГ) и т.д.

Быстрорежущие стали применяются для изготовления инструмента, работающего при значительном нагружении и нагреве (600 °С) режущих кромок. Стали легированы карбидообразующими элементами: вольфрамом, молибденом, хромом, ванадием.

Маркируются буквой «Р» (rapid – быстрый), числом, показывающим содержание вольфрама, буквами и цифрами, указывающими дополнительные легирующие элементы и их количество. В марках быстрорежущих сталей не указывают углерод (более 1 %), хром (более 4 %), ванадий (более 2 %), молибден до 1 %. Например, P18, P9K5 и др.

После прокатки иликовки быстрорежущие стали подвергают отжигу для снижения твердости и повышения обрабатываемости резанием. Сталь выдерживают при 800-850 °С до полного превращения аустенита в перлитно-сорбитную структуру с избыточными карбидами. Высокую твердость и теплостойкость при удовлетворительной прочности и вязкости инструменты из быстрорежущих сталей приобретают после закалки и многократного отпуска.

При нагреве под закалку необходимо обеспечить максимальное растворение в аустените труднорастворимых карбидов вольфрама, молибдена и ванадия. Такая структура увеличивает прокаливаемость и позволяет получить после закалки высоколегированный мартенсит с высокой теплостойкостью. Температура закалки – 1220-1280 °С.

Для предотвращения образования трещин и деформации инструмента из-за низкой теплопроводности стали нагрев под закалку проводят с одним или двумя промежуточными прогревами в расплавах солей. Инструменты простой формы закаливают в масле, сложной – в расплавах солей (KNO_3 , $NaNO_3$) при 250-400 °С.

После закалки структура быстрорежущей стали состоит из высоколегированного мартенсита (0,3-0,4 % углерода), нерастворенных при нагреве избыточных карбидов, остаточного аустенита (20-30 %). Последний снижает твердость, режущие свойства инструмента и его присутствие недопустимо.

При последующем отпуске из остаточного аустенита выделяются дисперсные карбиды, легированность аустенита уменьшается, и он претерпевает мартенситное превращение. Обычно применяют трехкратный отпуск при 550-570 °С в течение 45-60 мин. Число отпусков может быть сокращено после обработки стали холодом, в результате которой уменьшается содержание остаточного аустенита. Обработке холодом подвергают инструменты простой формы. Твердость после закалки 62-63 HRC, после отпуска она повышается до 63-65 HRC.

Для дальнейшего повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости режущих инструментов применяют цианирование,

азотирование, обработку паром и другие технологические операции поверхностного упрочнения. Их выполняют после окончательной термообработки, шлифования и заточки инструментов.

Стали для ударных инструментов должны обладать повышенной вязкостью для предупреждения поломок и выкрашивания режущих кромок инструмента. Необходимые свойства обеспечиваются соответствующим легированием. Хромокремнистые стали (4ХС, 6ХС) прокаливаются насквозь при диаметре 50-60 мм (охлаждение в масле), хромовольфрамкремнистые (5ХВ2СФ, 6ХВ2С) – до 70-80 мм. Предназначены: для изготовления пневматического инструмента (зубил, обжимок); вырубных, обрезных и чеканочных штампов, работающих с повышенными ударными нагрузками; рубильных ножей, штемпелей, клейм; прошивочного, деревообрабатывающего инструмента. Для повышения износостойкости инструмента проводят химико-термическую обработку (азотирование, нитроцементация), обеспечивающую увеличение поверхностной твердости без заметного снижения сопротивления хрупкому разрушению.

Стали и сплавы с особыми физическими свойствами

Стали и сплавы, работоспособность которых оценивается как по механическим, так и по теплофизическим, магнитным, электрическим и другим свойствам. **Прецизионные сплавы** – металлические сплавы с особыми физическими свойствами (магнитными, электрическими, тепловыми, упругими) или сочетанием свойств, уровень которых в значительной степени обусловлен точностью химического состава, отсутствием примесей, тщательностью изготовления и обработки.

Жаропрочные стали – стали, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах. Материал должен иметь достаточную прочность и плотные окисные пленки, защищающие его от дальнейшего окисления. Стали применяются для изготовления деталей топливной аппаратуры, паровых котлов, турбин, ракет, двигателей внутреннего сгорания и др. Для деталей, работающих под нагрузкой при температурах до 650 °С, применяются стали легированные хромом, молибденом, ванадием (15ХН, 12Х2МФБ). Изделия, работающие при 650-750 °С, изготавливают из высоколегированных сталей марок 40Х14Н14В2Н, 40Х12Н8Г8МФБ. При температурах выше 750 °С в качестве жаропрочных материалов используются сплавы на основе никеля или кобальта, до 1500 °С – на основе молибдена, до 2500 °С – на основе вольфрама.

Жаростойкие стали – материалы, работающие в ненагруженном состоянии при высоких температурах. От них требуется хорошее сопротивление окислению в газовых средах при высоких температурах. До

560-600 °С окалина состоит из плотного слоя оксидов Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . Выше 600 °С происходит их растрескивание. Высокотемпературный оксид FeO имеет рыхлую структуру *вюстита*, что облегчает доступ кислорода к металлу. Для обеспечения необходимой жаростойкости вводят хром, алюминий, кремний, никель. Эти металлы образуют на поверхности изделий прочные окисные пленки (Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$). Количество вводимых элементов зависит от требуемого уровня жаростойкости и определяется рабочими температурами изделий. Основной легирующий элемент – хром. Рабочие температуры стали 15X5М (5 % хрома) – до 650 °С, стали 12X17 (17 % хрома) – до 900 °С. *Высокохромистые стали* с ферритной структурой (15X25Т, 15X28 и др.) и аустенитные *хромоникелевые стали* (20X23Н18 и др.) имеют более высокую жаростойкость.

Нержавеющие стали – коррозионно-стойкие материалы. Большое количество деталей, изделий работает в агрессивной среде: влажная атмосфера, морская вода, пар, растворы солей, щелочей, кислот и т. п. Под действием среды поверхностный слой металла может разрушаться (ржаветь). Хром – основной легирующий элемент, защищающий сталь от коррозии (пороговое значение – 12,5 % и более). При этом электрохимический потенциал железа повышается и становится положительным, что препятствует электролитическому растворению (коррозии). Стали с 13 % хрома (20X13, 40X13 и др.) имеют хорошую коррозионную стойкость в таких средах, как водяной пар, вода, некоторые органические кислоты. Для повышения коррозионной стойкости количество хрома увеличивается до 17-28 % (стали марок 12X17, 95X18, 15X25Т).

Очень высокую коррозионную стойкость имеют стали аустенитного класса (12X18Н10Т, 17X20Н9Т). Эти стали при закалке можно перевести в однофазное состояние (аустенит), что положительно сказывается на сопротивлении межкристаллитной коррозии.

Износостойкие стали предназначены для работы в условиях интенсивного трения. Чем выше твердость и чем больше содержится твердых карбидов, тем выше сопротивление материала истиранию. Эти стали, как правило, высокоуглеродистые и легированы карбидообразующими элементами: Cr, V, W, Ti (стали X12, ХВГ, ХВ4Ф и др.). Типичный представитель – высокомарганцовистая высокоуглеродистая *сталь Гадфильда* (120Г13). При содержании 13 % марганца точки M_H и M_K на С-образной диаграмме (см. рис. 5.1) смещены в область отрицательных температур. Поэтому при закалке сохраняется аустенитная структура. Последующая пластическая деформация при температурах 400-600 °С вызывает явления наклепа и выделение карбидов, что эффективно

упрочняет сталь. Из высокомарганцовистых сталей изготавливают изделия, работающие в условиях износа с одновременным действием высоких давлений и ударных нагрузок: железнодорожные стрелки, гусеничные траки, детали камнедробилок.

Электротехнические стали.

К *магнитомягким материалам* относят железо, нелегированные и легированные электротехнические стали.

Технически чистое железо содержит (0,02-0,04 %) углерода, остальных примесей не более 0,6 % и обладает хорошими магнитными свойствами. Улучшение магнитных свойств достигается очищением от углерода и примесей электролизом, а также термическим разложением в вакууме карбонила $\text{Fe}(\text{CO})_5$ с последующим спеканием порошка железа. Из-за сложной технологии карбонильное и электролитическое железо используется в изделиях малого размера.

Нелегированные электротехнические стали изготавливаются по той же технологии, что и техническое железо. Для электротехнической промышленности стали поставляются с гарантированными магнитными свойствами различного сортамента, в том числе тонкий лист. Низкое удельное электрическое сопротивление увеличивает тепловые потери на перемагничивание, что ограничивает их применение.

Легированные электротехнические стали. Для увеличения удельного электрического сопротивления, стали легируют кремнием, который образует с железом твердый раствор. Стали с содержанием кремния более 4 % хрупкие, что затрудняет получение тонколистового проката.

Низколегированные электротехнические стали (1-2 % Si) используются для изготовления статоров, роторов и якорей электродвигателей небольшой мощности. Стали с содержанием кремния 3-4 % – для сердечников силовых трансформаторов и статоров мощных электрических машин. Сплавы с большой магнитной проницаемостью предназначены для магнитопроводов слаботочных приборов в электро- и радиотехнике.

Магнитотвердые сплавы – материалы для постоянных магнитов. Для их перемагничивания требуется значительная напряженность магнитного поля обратного направления. Маломощные магниты изготавливаются из углеродистых сталей У10, У12 со структурой отпущенного мартенсита. Высокие магнитные свойства имеют хромистые и хромистокобальтовые стали, содержащие 1 % С и 4,5-5,5 % Cr и Со. Более высокими характеристиками обладают сплавы Fe–Ni–Al, называемые *альни*: 20-25 % Ni, 11-13 % Al и не более 0,05 % С. Одни из лучших магнитотвердых сплавов на железной основе – *альнико*, содержат 15-20 % Ni, 20-25 % Со, 9-11 % Al, 4-5 % Cu. Обозначаются ЮНДК.

Сплавы с заданными упругими свойствами. Обычно в металлах модуль упругости уменьшается с повышением температуры. В сплавах системы Fe–Ni с элинварным эффектом модуль упругости повышается или остается постоянным с ростом температуры до 200 °С, что позволяет корректировать работу приборов, в которых они используются в качестве упругих элементов. Например, сплав *элинвар*: 45-43 % Ni, 5-6 % Cr, 2-3 % Ti, 0,8-1 % Al, остальное Fe (марка сплава – 44НХТЮ).

Сплавы с заданным коэффициентом линейного расширения. В электровакуумной технике для пайки и сварки со стеклом широко применяется сплав – *ковар*: 29 % Ni, 18 % Co, остальное Fe (марка – 29НК). Сплав имеет коэффициент линейного расширения α такой же, как термостойкое стекло в интервале температур от -70 до 420°С. Сплав *суперинвар*: 32% Ni, 4 % Co, 0,7 % Cu, остальное Fe (марка – 36НКД) открыт Ш. Гийомом в 1899 году. Сплав имеет минимальный температурный коэффициент линейного расширения α (10^6 °С⁻¹) в интервале температур от –60 до +100 °С. Эффект исчезновения теплового расширения при нагревании этого материала объясняется большими магнито-стрикционными явлениями объемного характера. *Магнитострикция* – изменение размеров и объема материала (ферромагнетика) под влиянием внутреннего магнитного поля.

Сплавы с большим электросопротивлением предназначены для работы в качестве нагревательных элементов и должны обладать высокой жаростойкостью. Сплав *нихром* состоит из 55-78 % Ni, 15-23 % Cr, 1,5 % Mn, остальное Fe. Нихромы обладают высокой технологичностью, легко протягиваются в тонкую проволоку и прокатываются в тонкую ленту. *Фехрали, хромали* – жаростойкие сплавы системы Fe–Cr–Al содержат: до 0,1 % C, 12-15 % Cr, 3-5 % Al, 0,7 % Mn, 0,6 %, Ni, остальное Fe. Эти сплавы могут работать в окислительной среде при высоких температурах. Они менее технологичные, более хрупкие и твердые, чем нихромы, но намного дешевле.

Многокомпонентные сплавы Fe–Cr–Al–Si–Mn–Zr–Ti–Y и др. имеют основу, близкую к фехралям (Fe–Cr–Al). Легирование различными элементами Si, Mn, Zr, Y и др., технологические особенности при изготовлении помогли производителям избавиться от основных недостатков, присущих фехралям и хромалиям.

6. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Цветные сплавы – сплавы на основе титана, алюминия, магния, меди. Они являются более дорогими и дефицитными по сравнению с черными металлами, однако область их применения в технике непрерывно расширяется. Особенно перспективны материалы, которые дают возможность снизить массу конструкций при повышении прочности и жесткости. Высокая коррозионная стойкость цветных металлов обусловлена образованием на поверхности металла плотной пленки оксида. Эта пленка обладает хорошим сцеплением с металлом благодаря близости их удельных объемов и предохраняет металл от дальнейшей коррозии. При нагреве цветных металлов выше некоторой предельной температуры они становятся химически активными элементами.

6.1. Титан и его сплавы

Титан – легкий металл серебристо-белого цвета с температурой плавления 1671 °С. Полиморфные модификации: до 882 °С устойчива α -фаза с ГПУ решеткой с периодами $a = 0,296$ нм, $c = 0,472$ нм; выше 882 °С – β -фаза с ОЦК решеткой ($a = 0,332$ нм при 900 °С). Плотность α -фазы при комнатной температуре – 4,5 г/см³. Механические свойства титана ($\sigma_b = 300$ МПа, твердость 100 НВ) сильно зависят от его чистоты и состояния. Чистый титан сохраняет высокую пластичность ($\delta = 20$ %, $\psi = 50$ %) при охлаждении до температуры жидкого гелия (–269 °С), но при попадании всего 0,03 % водорода, 0,2 % азота или 0,7 % кислорода титан теряет способность к пластической деформации.

Титановые сплавы. Компоненты сплава образуют с титаном твердые растворы замещения и изменяют температуру $\alpha \rightarrow \beta$ превращения.

Элементы, повышающие температуру $\alpha \rightarrow \beta$ превращения, называются *α -стабилизаторами* (рис. 6.1,а). Практическое значение имеет только легирование алюминием. Это сплавы средней прочности, они не упрочняются термической обработкой, имеют отличные литейные свойства, хорошо свариваются. Низколегированные α -сплавы и технический титан поддаются листовой штамповке в холодном состоянии.

Элементы, понижающие температуру превращения $\alpha \rightarrow \beta$, называются *β -стабилизаторами* (рис. 6.1,б). Некоторые β -стабилизаторы образуют интерметаллические соединения: при охлаждении β -фаза претерпевает эвтектоидное превращение: $\beta \rightarrow \alpha + \text{TiMe}$ (рис. 6.1,в). Сплавы на основе β -структуры пластичны (поддаются холодной листовой штамповке), хорошо свариваются. После старения приобретают высо-

кую прочность, но выше 300 °С становятся хрупкими. *Нейтральные стабилизаторы* (рис. 6.1,г) не влияют на фазовый состав сплавов.

Двухфазные сплавы ($\alpha+\beta$) – большая группа промышленных титановых сплавов, отличающихся более высокой пластичностью, чем α -

T, °C

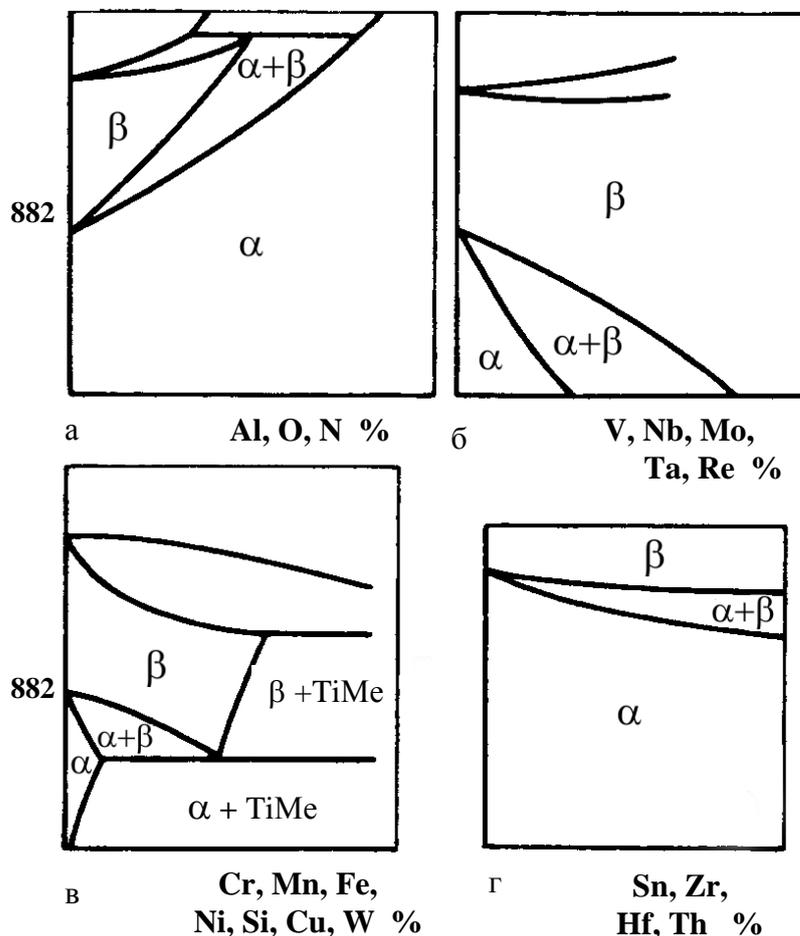


Рис. 6.1. Влияние легирующих элементов на полиморфизм титана:

а – α -стабилизаторы; б – изоморфные β -стабилизаторы;
в – изоморфные β -стабилизаторы; г – нейтральные

стабилизаторы. Могут термически упрочняться, обладают высокой жаропрочностью, но плохо свариваются. Для повышения износостойкости сплавы подвергают цементации или азотированию. Основной недостаток титановых сплавов – плохая обрабатываемость резанием и низкие антифрикционные свойства. По способу производства различаются деформируемые и литейные сплавы. Титановые сплавы широко применяются в ракетно- и авиастроении (корпуса двигателей, сопла, детали крепежа). В химическом производстве (компрессоры, клапаны, криогенная техника). В судостроении (гребные винты, обшивка морских судов).

6.2 Алюминий и его сплавы

Алюминий – легкий ($\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$) металл серебристо-белого цвета с температурой плавления 660 °С. Полиморфных превращений не име-

ет, кристаллизуется с образованием ГЦК решетки ($a = 0,404$ нм.) Механические свойства отожженного алюминия ($\sigma_b = 60$ МПа, твердость 20-25 НВ) зависят от чистоты и состояния. Постоянные примеси, присутствующие в алюминии: Fe, Si, Cu, Zn, Ti. Алюминий особой чистоты содержит менее 0,001 % примесей и предназначен для исследовательских целей. Из алюминия высокой чистоты (0,005-0,05 % примесей) изготавливают фольгу, токопроводящие и кабельные изделия, изделия для химической промышленности. Алюминий технической чистоты (0,15-1 % примесей) применяется для элементов конструкций и деталей, не несущих нагрузки. Алюминий обладает хорошей тепло- и электропроводностью, высокой пластичностью, легко обрабатывается давлением, сваривается газовой и контактной сваркой, плохо обрабатывается резанием, имеет большую литейную усадку (6 %).

Обобщенная диаграмма сплавов цветных металлов представлена на рис. 6.2. По технологическим свойствам сплавы подразделяются на деформируемые 1 (не упрочняемые 1а или упрочняемые термической обработкой 1б) и литейные 2.

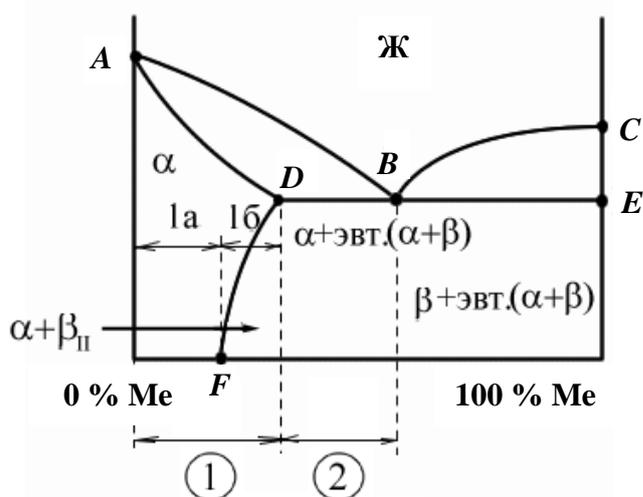


Рис. 6.2. Диаграмма состояния сплавов:
1а – деформируемые неупрочняемые сплавы;
1б – деформируемые упрочняемые сплавы;
2 – литейные сплавы

вочный алюминиевый сплав; АЛ – литейный сплав; В – высокопрочный сплав). Далее указывается условный номер сплава и обозначение, характеризующее состояние сплава (Т – термически обработанный (закалка плюс старение); М – мягкий (отожженный); Н – наклепанный).

Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой. Сплавы систем Al-Mn и Al-Mg применяются вместо чистого алюминия, когда его прочность недостаточна. Магний (0,5-5 %) действует только как упрочнитель, добавка марганца и хрома (1 %) повышает кор-

Алюминиевые сплавы.

Механические свойства алюминия можно повысить за счет легирования основными элементами: Cu, Mg, Mn, Zn, Si, а также Ti, Be, Ni, Fe. Легирующие элементы образуют с алюминием твердые растворы ограниченной растворимости и химические соединения. Сплавы маркируются аналогично легированным сталям. Сначала указывается тип сплава (Д – дуралюмин; А – технический алюминий; АК – ко-

розионную стойкость. Дополнительное упрочнение сплавы могут получать в результате наклепа (деформации в холодном состоянии). Для повышения пластичности проводят термическую обработку. Сплавы типа АМц, АМг ($\sigma_b = 110$ МПа, $\delta = 20$ %) применяются в отожженном состоянии и после наклепа для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, средненагруженных конструкций, требующих высокого сопротивления коррозии.

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой. Это многокомпонентные сплавы. В состав вводят различные элементы для повышения механической прочности (Cu, Mg, Zn), жаропрочности (Fe), коррозионной стойкости (Mn). Термическая обработка сплавов – закалка и старение (естественное или искусственное). *Старение* – выдержка при комнатной или повышенной температуре (ниже линии DF).

Линия DF на рис. 6.2 – линия предельной растворимости компонентов. Закалка проводится с температуры выше DF , охлаждение – со скоростью выше критической; результат – образование пересыщенного твердого раствора легирующего элемента в решетке основы. На этапе старения, за счет процессов диффузии, атомы легирующего элемента образуют зоны с повышенной концентрацией компонента и мелкодисперсные интерметаллические частицы, которые играют роль барьеров для движения дислокаций. Таким образом, упрочнение сплавов происходит как за счет легирования основы, так и распада пересыщенного твердого раствора. Для дополнительного упрочнения используют наклеп, выполняя его между закалкой и старением.

Дуралюмины – сплавы системы Al–Cu–Mg, в которые дополнительно вводят марганец для повышения коррозионной стойкости. Например, сплав Д16 ($\sigma_b = 540$ МПа, $\delta = 11$ %). Дуралюмины применяются для изготовления деталей и элементов конструкций средней и повышенной прочности, требующих высокой надежности и долговечности при переменных нагрузках. Особенно широкое применение они находят в авиастроении, автомобилестроении, строительстве.

Авиаль – сплавы системы Al–Mg–Si уступают дуралюминам по прочности, но обладают лучшей пластичностью в холодном и горячем состояниях. Например, сплав АВ ($\sigma_b = 260$ МПа, $\delta = 15$ %) обрабатывается резанием (после закалки и старения) и сваривается контактной и аргонодуговой сваркой, обладает высокой сопротивляемостью коррозии. Из него изготавливают элементы конструкций (листы, трубы, профили и т. д.), несущие умеренные нагрузки.

Ковочные сплавы системы Al–Mg–Si–Cu отличаются высокой пластичностью и хорошими литейными свойствами, позволяющими получить качественные слитки для последующей обработки давлением.

Сплав АК6 используют для деталей сложной формы со средней прочностью, изготовление которых требует высокой пластичности в горячем состоянии. Сплав АК8 ($\sigma_b = 480$ МПа, $\delta = 10$ %) применяется для изготовления тяжело нагруженных штампованных деталей (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Химический состав упрочняемых алюминиевых сплавов

Сплавы	Марка	Химический состав, %						
		Cu	Mg	Si	Zn	Fe	Mn	Ni
Дуралюмин	Д16	3,8–4,9	1,2–1,8	< 0,5	< 0,3	< 0,5	0,3–0,9	0,1
Авиаль	АВ	0,2–0,6	0,4–0,9	0,5–1,2	< 0,2	< 0,5	0,1–0,3	–
Ковочные	АК6	1,8–2,6	0,4–0,8	0,7–1,2	< 0,3	< 0,7	0,4–0,8	< 0,1
Жаропрочные	АК2	3,5–4,5	0,4–0,8	0,5–1,0	< 0,3	0,5–1,0	< 0,2	1,8–2,3
Высокопрочные	В95	1,4–2,0	1,8–2,8	–	5–7	–	0,2–0,6	–

Жаропрочные алюминиевые сплавы имеют сложный химический состав, их дополнительно легируют железом, никелем и титаном. Например, сплав Д20 ($\sigma_b = 400$ МПа, $\delta = 12$ %) используется для изготовления деталей, работающих при температуре до 300 °С.

Высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu. При увеличении содержания цинка и магния прочность сплавов повышается, пластичность и коррозионная стойкость снижаются. Добавки марганца и хрома улучшают коррозионную стойкость. Например, сплав В95 ($\sigma_b = 560$ –600 МПа, $\delta = 8$ %) хорошо обрабатывается резанием и сваривается точечной сваркой. Применяется в самолетостроении и судостроении для тяжело нагруженных конструкций.

Литейные алюминиевые сплавы. Сплавы для фасонного литья должны иметь высокую жидкотекучесть, небольшую усадку, малую склонностью к образованию горячих трещин и пористости в сочетании с хорошими механическими свойствами и сопротивлением коррозии.

Силумины – сплавы систем Al–Si, Al–Si–Mg, содержащие 10–13 % кремния, отличаются высокими литейными свойствами, отливки – большой плотностью. Силумины делятся на двойные (легируемые только Si) и специальные (с небольшими добавками – Mg, Cu, Mn, Ni и др.). Легирование магнием и медью повышает эффект упрочнения при старении. Титан и цирконий измельчают зерно. Марганец повышает антикоррозионные свойства. Никель и железо повышают жаропрочность. Сплавы системы Al–Si типа АЛ2, АЛ9 ($\sigma_b = 200$ МПа) легко обрабатываются резанием. Термической обработкой упрочняются только специальные силумины, которые применяются для изготовления средне- и крупногабаритных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания и т. д.

Высокопрочные жаропрочные сплавы систем Al–Cu–Mn, Al–Cu–Mn–Ni, Al–Si–Cu–Mn. Широко применяется сплав АЛ1 ($\sigma_b = 260$ МПа). Из него изготавливают поршни, головки цилиндров и другие детали, работающие при повышенных температурах. Из сплава АЛ19 системы Al–Cu – детали, работающие в условиях высоких статических и ударных нагрузок при температурах до 300 °С.

Коррозионностойкие сплавы систем Al–Mn и Al–Mn–Zn имеют низкие литейные, повышенные механические свойства и хорошую обрабатываемость резанием. Сплавы АЛ8 ($\sigma_b = 350$ МПа, $\delta = 10$ %), АЛ13 и АЛ22 предназначены для отливок, работающих во влажной атмосфере (судостроение, авиация).

Гранулированные алюминиевые сплавы. Плавлением трудно, иногда невозможно получить сплавы из металлических и неметаллических компонентов, не смешивающихся в расплавленном виде (железо-свинец, вольфрам-медь и т. д.). Метод порошковой металлургии позволяет изготовить материалы с особыми физическими характеристиками и структурой, не только в виде заготовок и полуфабрикатов, но и в виде готовых изделий, не требующих дальнейшей обработки резанием. Эти материалы имеют более высокие механические свойства, чем аналогичные материалы, получаемые плавлением.

Спеченные алюминиевые сплавы (САС) получают методом порошковой металлургии. Частицы имеют диаметр от нескольких микрон до миллиметров и характеризуются малой ликвацией. Высокая скорость охлаждения частиц (100 °С/с) достигаемая, например, распылением жидкого металла струей нейтрального газа, позволяет получать аномально пересыщенные твердые растворы: предельная растворимость легирующих элементов увеличивается в 2,5-5 раз. Особый интерес представляют САС с элементами, которые практически нерастворимы в алюминии при обычных условиях. Сплавы представляют собой алюминиевую матрицу с равномерно распределенными дисперсными включениями второй фазы. В процессе технологической операции горячего прессования (400-450 °С) из пересыщенного твердого раствора выпадают дисперсные частицы интерметаллидных фаз, которые и увеличивают прочность при нормальных и повышенных температурах. Прочность материалов при повышенном содержании переходных металлов достигает 800 МПа, предел текучести – 330 МПа.

Спеченная алюминиевая пудра (САП) упрочняется дисперсными частицами окиси алюминия, нерастворимой в алюминии. При размол пудры в шаровых мельницах (в атмосфере азота с регулируемым содержанием кислорода) на ее частицах образуется тончайшая пленка окислов алюминия. Различают САП по содержанию Al_2O_3 . Помол осу-

ществляется с добавкой стеарина, по мере его улетучивания происходит срашивание мелких частиц в более крупные конгломераты, в результате образуется не воспламеняющаяся на воздухе тяжелая пудра. Пудру брикетируют (в холодном и горячем виде), спекают и подвергают дальнейшей деформации – прессованию, прокатке, ковке. По коррозионной стойкости САП не уступает чистому алюминию.

Прочность САС на 50 % выше прочности САП. САС обладает высокой прочностью при температурах 300-500 °С и не изменяет своих свойств даже после длительного (до 10000 часов) прогрева при 500 °С. При добавлении небольшого количества железа и никеля (до 1,5 %) САП способна длительно работать в паровоздушной среде при температурах до 350 °С. Листовая САП сваривается контактной (точечной и роликовой) и аргонодуговой сваркой, легко обрабатывается резанием.

6.3. Магний и его сплавы

Магний – легкий ($\rho = 1,74 \text{ г/см}^3$), блестящий серебристо-белый металл с температурой плавления 650 °С, тускнеющий на воздухе вследствие образования на поверхности окисной пленки. Магний имеет ГПУ решетку с периодами: $a = 0,320 \text{ нм}$, $c = 0,520 \text{ нм}$. Механические свойства литого магния: $\sigma_{\text{в}} = 115 \text{ МПа}$, $\delta = 8 \%$.

Магниевые сплавы. Вследствие высокой химической активности выбор металлов, пригодных для легирования магния, невелик. Сначала применялись сплавы систем Mg–Al–Zn и Mg–Mn. Прогресс в расширении систем магниевых сплавов обусловлен открытием модифицирующего и рафинирующего действия циркония: сплавы типа Mg–Zr–Zn, Mg–Zr–(редкоземельный элемент). Широкое применение получили сплавы на основе системы Mg–Th, сверхлегкие сплавы системы Mg–Li.

Сплавы делят на *литейные* (МЛ) для производства фасонных отливок и *деформируемые* (МА) для производства полуфабрикатов прессованием, прокаткой, ковкой и штамповкой. Сплавы упрочняются закалкой и искусственным старением. Закалку проводят от 380-420 °С, старение при 260-300 °С в течение 10-24 часов. Особенностью является длительная выдержка при нагреве под закалку: от 4 до 24 часов. Детали из магниевых сплавов обладают высокой удельной прочностью и широко используются в самолето- и ракетостроении. Сплавы хорошо обрабатываются резанием (детали оптических приборов с очень тонкими стенками и мелкой резьбой), но чувствительны к знакопеременным нагрузкам: поэтому при конструировании деталей следует избегать резких переходов сечения, острых надрезов, пазов.

Деформируемые магниевые сплавы. Магний плохо деформируется при нормальной температуре: в гексагональной решетке скольжение происходит по одной плоскости базиса. При повышении температуры до 200-450 °С возникает скольжение по дополнительным кристаллографическим плоскостям, технологическая пластичность большинства сплавов становится высокой. Поэтому все операции по обработке давлением магниевых сплавов проводят при температурах 360-520 °С и обязательно при малых скоростях деформации. Исключение – сплавы с 10-14 % Li, которые имеют ОЦК решетку и допускают обработку в холодном состоянии. Из деформируемых сплавов изготавливают детали автомашин, самолетов, прядильных и ткацких станков. Все сплавы обладают хорошей свариваемостью.

Литейные магниевые сплавы. Отливки получают всеми известными способами литья (литьем в землю, в кокиль, под давлением). Во избежание горения заливаемого металла, в состав формовочных земель вводят защитные присадки; кокили окрашивают специальными красками, в состав которых входит борная кислота. При затвердевании магниевые сплавы дают большую линейную усадку.

Отливки из сплавов с цирконием имеют более мелкозернистую структуру и высокие механические свойства, чем отливки из сплавов, легированных алюминием. Необходимы меры, предотвращающие загорание сплава при плавлении и разливке. Изготавливают детали двигателей, приборов и др., работающих при температурах до 300 °С.

6.4. Медь и ее сплавы

Медь – металл красного цвета, имеет ГЦК решетку с периодом $a = 0,361$ нм. Плотность – 8,96 г/см³, температура плавления – 1083 °С. Характерное свойство меди – высокая тепло- и электропроводность, поэтому она находит широкое применение в тепло- и электротехнике. Механические свойства чистой меди низкие; в качестве конструкционного материала применяется редко. Повышение механических свойств достигается созданием сплавов на основе меди.

Первая группа – элементы (металлы), растворимые в твердой меди: Al, Fe, Ni, Zn, Ag, Au, Pt, Cd, Sb. В качестве примера приведена диаграмма состояния системы Cu–Zn (рис. 6.3). Вторая группа – элементы, нерастворимые в меди в твердом состоянии и образующие с ней легкоплавкие эвтектики: Pb, Bi. Третья – неметаллические и полуметаллические элементы, образующие с медью химические соединения: P, As, O, S, Se, Te. Различают две группы медных сплавов: латуни и бронзы.

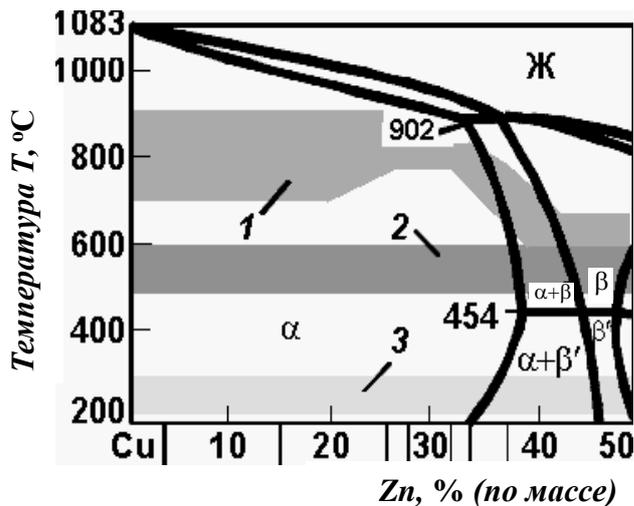


Рис. 6.3. Диаграмма состояния Cu-Zn и температурные интервалы:
 1 – нагрева для обработки давлением; 2 – рекристаллизационного отжига; 3 – отжига для уменьшения остаточных напряжений

Из однофазных латуней путем деформирования в холодном состоянии изготавливают ленту, проволоку, гильзы патронов. Из двухфазных латуней путем деформирования в горячем состоянии (выше 500 °С) изготавливают листы, прутки и другие заготовки.

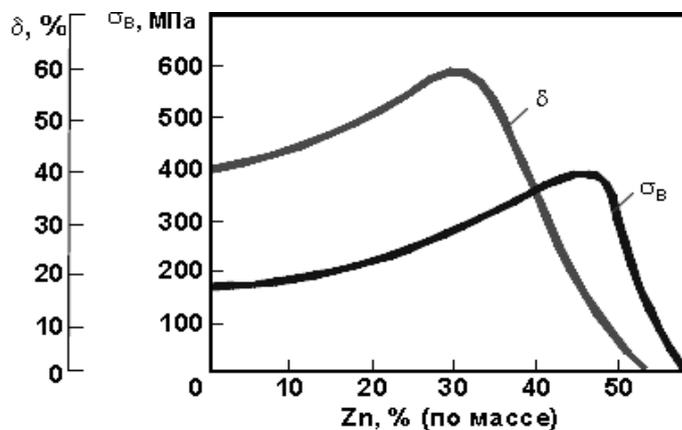


Рис. 6.4. Влияние цинка на механические свойства меди

Кремнистые однофазные латуни – материал для конструкций, работающих при отрицательных температурах (до –183 °С).

Бронзы – сплавы меди с другими элементами, в которых цинк не является основным. По способу изготовления различают деформируемые и литейные бронзы.

Оловянные бронзы образуются из ряда твердых растворов и склонны к ликвации из-за большого температурного интервала кристаллизации. Сплавы с содержанием олова более 5 % имеют в структуре

Латуни – сплавы меди с цинком и другими элементами. Максимальная пластичность латуни достигается при 30 % Zn, максимальная прочность – при 43 % Zn (рис. 6.4). Медь с цинком образует твердые растворы: α -, β -, γ -, ε - (рис. 6.3). Широко используются только однофазные (α -твердый раствор) и двухфазные ($\alpha+\beta$ -фазы) латуни. По способу изготовления различают деформируемые и литейные латуни. Из однофазных латуней путем деформирования

Обрабатываемость резанием повышается добавкой свинца («автоматная латунь»). Латуни имеют хорошую коррозионную стойкость; ее можно повысить добавлением олова («морская латунь»). Добавка никеля и железа повышает механическую прочность. Литейные латуни не склонны к ликвации, отливки имеют высокую

легкоплавкую фазу. Такая структура является благоприятной для деталей с хорошими антифрикционными свойствами (подшипники скольжения). Мягкая фаза обеспечивает прирабатываемость, твердая – износостойкость бронзы. Литейные бронзы имеют малую объемную усадку (1 %) и используются в художественном литье, для изготовления отливок пароводяной арматуры и антифрикционных деталей: втулок, венцов червячных колес, вкладышей подшипников. Для повышения жидкотекучести добавляется фосфор. Деформируемые оловянные бронзы (менее 6 % олова) обладают высокими механическими, антикоррозионными, антифрикционными свойствами и используются в различных отраслях промышленности. Изготавливают прутки, трубы, ленту, проволоку.

Алюминиевые бронзы применяют как заменители оловянных бронз. Сплавы с содержанием алюминия до 9,4 % имеют структуру однофазного α -твердого раствора, до 15,6 % – сплавы двухфазные ($\alpha+\gamma$ -фазы). Оптимальные свойства имеют алюминиевые бронзы с 5-8 % Al. При 10-11 % Al сильно снижается пластичность бронзы. Сплавы с содержанием 8-9,5 % Al можно закалывать для повышения прочности. Преимущества: большая плотность отливок, высокая механическая прочность и жаропрочность, низкая склонность к хладноломкости и внутрикристаллической ликвации. Недостатки: большая усадка, склонность к образованию столбчатых кристаллов при кристаллизации и росту зерна при нагреве, спонтанный отпуск при медленном охлаждении, недостаточная коррозионная стойкость. Для устранения недостатков сплавы легируют марганцем, железом, никелем, свинцом. Из алюминиевых бронз литьем и обработкой давлением изготавливают малогабаритные ответственные детали типа шестерен, втулок, фланцев. Штамповкой изготавливают медали и разменную монету.

Кремнистые бронзы не магнитны и морозостойки, превосходят оловянные бронзы по коррозионной стойкости и механическим свойствам, имеют высокие упругие свойства. Сплавы хорошо свариваются и подвергаются пайке. Благодаря высокой устойчивости к щелочным средам и сухим газам, их используют для производства сточных труб, газо- и дымопроводов.

Свинцовые бронзы используют как высококачественный антифрикционный материал. По сравнению с оловянными бронзами имеют более низкие механические и технологические свойства.

Бериллиевые бронзы – сплавы меди с 2-5 % бериллия – высококачественный материал для изготовления пружин. Растворимость бериллия в меди с понижением температуры резко уменьшается. Это явление используют для получения высоких упругих и прочностных свойств изделий за счет дисперсионного твердения твердого раствора. При закалке

от 800 °С до комнатной температуры фиксируется пересыщенный твердый раствор бериллия в меди. Старение проводят при 300-350 °С.

6.5. Другие цветные металлы и сплавы

Бериллий и его сплавы. Бериллий – легкий (1,845 г/см³), пластичный ($\delta = 140 \%$) металл светло-серого цвета. Температура плавления – 1287 °С. До 1250 °С имеет ГПУ решетку, выше – ОЦК. Бериллий чрезвычайно токсичен. Механические свойства бериллия зависят от чистоты металла, технологии производства, размера зерна. Пластичный бериллий (содержание примесей 10⁻⁴ %) получают электролизом с последующей зонной плавкой. Бериллий обладает уникальным сочетанием физических и механических свойств. По удельной прочности и жесткости, удельной теплоемкости он превосходит все другие металлы. Бериллий отличается высокой электро- и теплопроводностью. Недостатки – высокая стоимость, сложность переработки, а также низкая хладостойкость и ударная вязкость (ниже 5 Дж/см²). Бериллий плохо обрабатывается резанием. Поэтому для производства заготовок применяют метод порошковой металлургии. Соединения деталей из бериллия получают с использованием пайки, дуговой сварки в аргоне или в вакууме, для предотвращения взаимодействия металла с кислородом.

Сплавы бериллия. Размеры атома бериллия очень малы – 0,226 нм. Поэтому введение даже небольшого количества примесей (например, 0,001 % Si) приводит к значительным искажениям кристаллической решетки бериллия и сильному охрупчиванию металла. Поэтому легирование бериллия возможно только элементами, которые образуют с бериллием механические смеси с минимальной взаимной растворимостью. В сплавах бериллия с алюминием (24-43 % Al) твердые частицы бериллия равномерно распределены в пластичной алюминиевой матрице. Например, сплав *локеллой* (62 % Be) фирмы «Локхид» (США) имеет следующие механические свойства: $\sigma_b = 600$ МПа, $\delta = 1 \%$. Для увеличения прочности в сплавы Be–Al дополнительно вводят магний и серебро – элементы, растворимые в алюминиевой матрице. Сплавы бериллия с серебром (до 60 %) дополнительно легируют литием и лантаном.

Цинк и его сплавы. Цинк – синевато-белый металл, температура плавления 419 °С, плотность 7,13 г/см³, решетка – ГПУ. Полиморфных превращений не имеет. Чистый цинк обладает высокой пластичностью ($\delta = 50 \%$), низкой прочностью ($\sigma_b = 150$ МПа). При 100-150 °С цинк пластичен и легко прокатывается в листы и фольгу толщиной до сотых долей миллиметра. При 250 °С становится хрупким. Основные примеси

– свинец, железо, кадмий. Половина производимого цинка расходуется на защитные антикоррозионные покрытия для сталей.

Сплавы на основе цинка характеризуются невысокой температурой плавления, хорошей жидкотекучестью, легко обрабатываются давлением и резанием, хорошо паяются и свариваются. Основные примеси – алюминий (до 5-10 %) и медь (до 5 %). Маркируются буквами Ц (цинк), А (алюминий), М (медь) и цифрами, показывающими содержание элементов в процентах. Сплав ЦАМ4-3 содержит 4 % Al и 3 % Cu.

Свинец и его сплавы. *Свинец* – металл голубовато-серого цвета, температура плавления 327 °С, плотность 11,3 г/см³, решетка ГЦК. Полиморфных превращений не имеет. Свинец обладает высокой пластичностью ($\delta = 60\%$) и очень низкой прочностью ($\sigma_{\text{в}} = 13$ МПа). Чистый свинец хорошо поглощает гамма и рентгеновские лучи, поэтому его широко применяют для изготовления защитных экранов и контейнеров для хранения радиоактивных веществ. Много свинца расходуется на защитные оболочки электрических кабелей, для производства аппаратуры, стойкой в агрессивных средах.

Сплавы на основе свинца. Введение Fe, Te, Cu, Sb, Sn, Cd и Ca в небольших количествах, не снижает коррозионную стойкость свинца, но увеличивает его прочность, твердость и антифрикционные свойства, а при нагреве – предел ползучести и длительную прочность. Сплавы с теллуrom (0,03-0,06 %), медью (0,04-0,08 %) и сурьмой (0,5-2 %) используются как материалы для облицовки кислотоупорной аппаратуры и трубопроводов. Для оболочек электрических кабелей применяют сплавы с теллуrom (0,04-0,06 %), кальцием (0,03-0,07 %), оловом (1-2 %) и сурьмой (0,4-0,8 %). Благодаря хорошим литейным свойствам свинцовые сплавы применяются для отливок малого сечения и сложной формы. Для перфорированных пластин свинцовых аккумуляторов используют сплав свинца с сурьмой повышенной прочности (6-9 %).

Олово и его сплавы. *Олово* – металл с температурой плавления 232°С. Характеризуется высокой пластичностью ($\delta = 90\%$) и низкой прочностью ($\sigma_{\text{в}} = 17$ МПа). *Белое олово* (β -олово) с тетрагональной решеткой и плотностью 7,3 г/см³ устойчиво до 18 °С, ниже – начинается полиморфное превращение белого в *серое олово* (α -олово) с решеткой подобной алмазу и плотностью 5,85 г/см³. Превращение сопровождается увеличением объема на 25 %, олово разрушается, рассыпаясь в серый порошок («оловянная чума»). Скорость превращения $\beta \rightarrow \alpha$ зависит от степени переохлаждения; сначала она мала и достигает максимального значения (0,004 мм/ч) при температуре минус 32 °С. Олово марок О1

(99,9 % Sn) и O2 (99,56 % Sn) используется для лужения, O3 (98,35 % Sn) и O4 (96,25 % Sn) – для пайки.

Тугоплавкие металлы и сплавы. Тугоплавкими называют металлы с температурой плавления выше 2200 °С: вольфрам (3422 °С), рений (3180 °С), тантал (3014 °С), молибден (2623 °С), ниобий (2477 °С), гафний (2222 °С), рутений (2334 °С) и др. Металлы имеют, в основном, ОЦК решетку и не претерпевают полиморфных превращений.

Тугоплавкие металлы и их сплавы применяют как жаропрочные материалы в авиационной и космической технике. Они имеют низкую жаростойкость, поэтому возникает необходимость использования различных защитных покрытий. Металлы получают плавкой в электродуговых и электронно-лучевых печах; методами порошковой металлургии (с использованием операций прессования и спекания). Вольфрамовую проволоку диаметром до 15 мм получают предварительной проковкой заготовок с последующим волочением через алмазные фильеры. Конечный диаметр можно уменьшить до 5 мкм путем протравливания проволоки в кислоте. Вольфрам и молибден используют для изготовления нитей накаливания и электрических контактов. Рений применяется при производстве сверхточных навигационных приборов. Тантал применяется для изготовления пластин и проволоки в костной хирургии. Сплавы вольфрама с 5-20 % рения применяют для изготовления термомпар, измеряющих температуру до 3000 °С. Карбиды вольфрама, ниобия, тантала обладают высокой твердостью и износостойкостью. Изделия из сплава ниобия и тантала эксплуатируют в агрессивных средах серной или азотной кислот 2-3 года, из коррозионностойкой стали – 2-3 месяца.

Для специальных конструкционных элементов используют *псевдосплавы*, состоящие из взаимно нерастворимых компонентов с большой разницей в температурах плавления. Спеченный из порошка вольфрама пористый каркас пропитывают при 1200-1500 °С второй жидкой составляющей (фазой) – медью или серебром.

Легкоплавкие сплавы – сплавы с температурой плавления ниже температуры плавления основного компонента: олова (232 °С). Металлы с низкой температурой плавления (Pb, Cd, Bi, Zn – дополнительные компоненты) образуют с оловом сложные эвтектики. Маркируются такие сплавы буквой *Л* и цифрой, показывающей температуру плавления сплава в градусах Цельсия: (например, Л199: 8,9 % Zn и Sn). Распространен *сплав Вуда* на основе висмута Л68 (12,5 % Sn, 25 % Pb, 12,5 % Cd и 50 % Bi). Легкоплавкие сплавы используют в качестве конструкционного материала при изготовлении тепловых предохранителей, небольших отливок в пластмассовых формах и т. д.

7. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

7.1. Полимеры

Неметаллические материалы все чаще заменяют металлы. Достоинством этих материалов является сочетание необходимых химических, физических и механических свойств с низкой их стоимостью и высокой технологичностью.

В основе неметаллических материалов лежат *полимеры* – высокомолекулярные химические соединения с большой молекулярной массой (порядка 10^3), состоящие из многочисленных низкомолекулярных звеньев (*мономеров*) одинакового строения. В мономерах отдельные атомы соединены прочными ковалентными связями. Между макромолекулами полимеров действуют более слабые связи. Соединения с малым количеством звеньев называются *олигомерами*. К природным полимерам относятся: натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, шерсть и др. Наиболее распространены синтетические полимеры. Для создания которых применяются следующие мономеры: этилен, винилхлорид, винилацетат, пропилен, стирол, фенол, мочевины, меламин и формальдегид. Полимеры различают по способу образования.

Полимеризация – процесс соединения низкомолекулярных соединений в высокомолекулярные с образованием длинных цепей. Например, мономеры этилена C_2H_4 или винилхлорида C_2H_3Cl после разрыва двойных ковалентных связей образуют полимерные цепи из мономерных звеньев – полиэтилен и поливинилхлорид (рис. 7.1). Полимеризацией получают полипропилен, полистирол, полибутадиен и др.

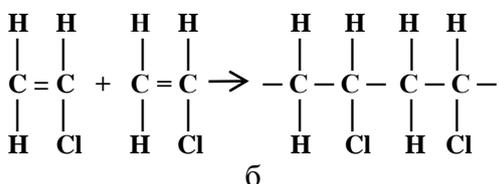
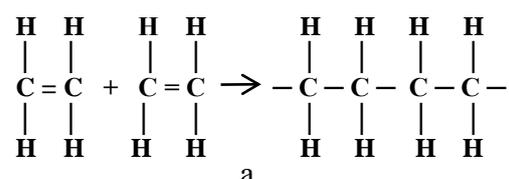


Рис. 7.1. Схема полимеризации этилена (а) и винилхлорида (б)

Полиприсоединение – реакция множественного присоединения мономеров, содержащих предельные группы, к мономерам, содержа-

Поликонденсация – ступенчатая реакция соединения большого количества одинаковых или разных мономеров в макромолекулы (поликонденсаты) с одновременным образованием побочных продуктов (вода, аммиак, хлороводород, диоксид углерода, метиловый спирт и др.). С помощью такой реакции получают полиамиды, полиэстеры, фенопласты, аминопласты, поликарбонаты, силиконы и др.

щим непредельные группы (двойные связи, активные циклы). Такие реакции протекают без выделения побочных продуктов. К ним относят получение полиуретанов, процесс отверждения эпоксидных смол.

По составу полимеры делятся на органические, элементоорганические и неорганические. Органические полимеры – наиболее обширная группа соединений – состоят из атомов углерода, водорода, кислорода, азота, серы и галогенов. В состав основных цепей элементоорганических соединений входят дополнительно атомы кремния, титана, алюминия и др. Это только синтетические полимеры. Например, основные цепи кремнийорганических соединений построены из атомов кремния и кислорода. Неорганические полимеры (силикатное стекло, керамика, слюда, асбест и др.) не содержат атомов углерода. Их основой являются оксиды кремния, алюминия, магния и др.

Своеобразие свойств полимеров обусловлено их различной структурой (рис. 7.2). Полимеры с линейной структурой (например, полиэтилен) представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки.

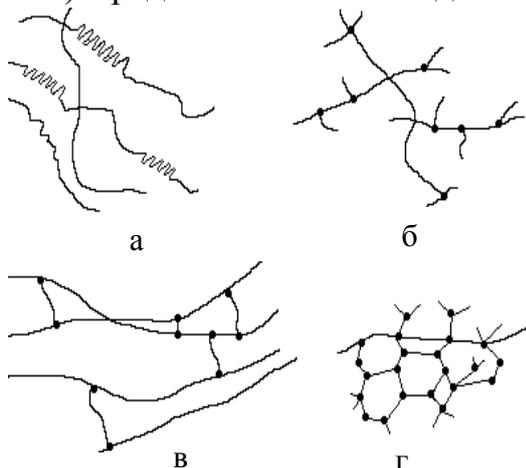


Рис. 7.2. Строение полимеров:
а – линейное; б – разветвленное;
в – с поперечными связями;
г – замкнутая структура

Для цепочек характерна гибкость, что обуславливает высокую эластичность полимеров и отсутствие хрупкости в твердом состоянии. Полимеры с линейно-разветвленной структурой (полипропилен, полиизобутилен) имеют боковые ответвления. Полимеры с лестничной структурой (кремнийорганические) состоят из двух цепей, соединенных химическими связями. При соединении макромолекул полимеров между собой в поперечном направлении образуется сетчатая структура с различной плотностью сетки. Такие полимеры с пространственной структурой обладают большой жесткостью и термостойкостью и являются основой конструкционных неметаллических материалов.

Полимеры состоят из кристаллических и аморфных областей. Кристаллическое состояние характеризуется наличием дальнего порядка в расположении макромолекул. Монокристаллы полимеров состоят из элементарных ячеек. Из них образуются более сложные структуры – ленты. Из лент строятся плоскости – основной структурный элемент кристаллического полимера. Когда образование правильных кристаллов затруднено, формируется сферолитная структура. Сферолиты состоят

из лепестков, образованных последовательным чередованием кристаллических и аморфных участков. *Аморфное состояние полимера* характеризуется ближним порядком в расположении молекул. Аморфные полимеры по строению подобны жидкостям с большим коэффициентом вязкости. Кристаллическая фаза способствует повышению механических характеристик полимера (твердости, прочности, модуля упругости), но снижает гибкость молекул. Аморфная фаза уменьшает жесткость и делает полимер более пластичным. Отношение объема кристаллической фазы к общему объему называют *степенью кристалличности*.

7.2. Пластмассы

Для получения материалов с заданными свойствами в технике часто используют не сами полимеры, а их сочетания с другими материалами органического или неорганического происхождения (металлопласты, пластмассы, полимербетоны, стеклопластики и др.).

Пластмассы (пластики) – искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ. Достоинство пластмасс: малая плотность, химическая стойкость, электро- и теплоизоляционные свойства, высокая технологичность. Недостатки: ограниченная теплостойкость, малая жесткость, вязкость, склонность к старению. В состав пластмасс входят.

1. *Связующее вещество* – синтетические смолы, реже эфиры – обязательный компонент пластмасс. Простые пластмассы состоят из одного связующего (органическое стекло, полиэтилен, полипропилен).

2. *Наполнители*: порошковые (сажа, графит, тальк, древесная мука); волокнистые (волокна хлопка, стекла, асбеста); листовые (бумага, ткань, древесный шпон). Наполнители повышают механическую прочность, снижают стоимость пластмасс и придают им нужные эксплуатационные свойства. Их содержание доходит до 70 %.

3. *Стабилизаторы* – необходимы для того, чтобы структура и свойства макромолекул полимеров не изменялись с течением времени.

4. *Пластификаторы* (до 20 %) используются для облегчения формирования пластмасс и снижения хрупкости (олеиновая кислота, стеарин).

5. *Отвердители* нужны для пластмасс на основе терморезактивных смол в качестве катализаторов процесса твердения.

6. *Специальные добавки* – красители, смазки, антистатика и др.

Термопластичные пластмассы (термопласты) могут многократно размягчаться при нагреве и снова затвердевать при охлаждении. К ним относятся полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, фторопласт, капрон, органическое стекло.

Терморезактивные пластмассы (реактопласты) при нагреве размягчаются, затем необратимо затвердевают. При повторном нагреве их можно обугливать, сжечь, но не размягчить. К ним относятся эпоксидные и фенолформальдегидные смолы, полиэфир и полиуретаны, кремнийорганические полимеры, стеклотекстолиты и стекловолокнистые.

Различия в свойствах термопластичных и терморезактивных пластмасс объясняется разным строением макромолекул полимеров. К термопластам относят полимеры с линейной структурой (см. рис. 7.2,а), к реактопластам – с замкнутой (рис. 7.2,г). Полимеры с замкнутой пространственной структурой обладают большей жесткостью и термостойкостью, чем полимеры с линейной структурой. Полимеры со структурами, показанными на рис. 7.2,б и 7.2,в, проявляют промежуточные свойства по сравнению с предельными случаями.

Механические свойства пластмасс. Деформация полимера – сумма упругой, высокоэластичной и вязкотекучей деформаций. Соотношение между составляющими общей деформации зависит от структуры материала, температуры и условий деформирования (рис. 7.3).

Высокоэластичная деформация возникает при вытягивании макромолекул под воздействием напряжений. При растяжении образца появляется шейка. Пластическое течение представляет постепенное развитие шейки по всему образцу (участок *mn* на рис. 7.3,а). Механические нагрузки допустимы только в области упругой деформации (заштрихованные области). Пластическая деформация кристаллических термопластов (рис. 7.3,а) сопровождается *рекристаллизацией*, которая состоит из трех последовательных этапов: разрушение кристаллов под действием напряжения; вытягивание молекул вдоль направления растяжения на участке с разрушенными кристаллами; образования новых, ориентированных кристаллов между параллельно ориентированными молекулами. Новые кристаллы фиксируют высокоэластичную деформацию, которая сохраняется после снятия нагрузки.

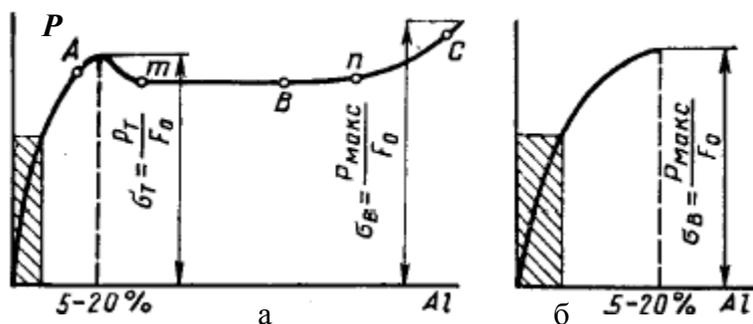


Рис. 7.3. Диаграммы растяжения пластмасс:
 а – вязкие аморфные и кристаллические термопласты; б – хрупкие термопласты, реактопласты, вязкие термопласты с ориентированной структурой.
 А, В, С – точки разрушения полимеров с разной молекулярной массой: $M_A < M_B < M_C$

Хрупкость пластмасс возрастает при увеличении количества связей и степени кристалличес-

ности полимеров. Термореактивные пластмассы не имеют области высокоэластичной деформации и разрушаются с незначительной остаточной деформацией (рис. 7.3,б). Для уменьшения хрупкости применяют пластификаторы, волокнистые наполнители.

Механические характеристики пластмасс изменяются в широких пределах и являются условными величинами, поскольку зависят от времени действия нагрузки и скорости ее приложения. Реактопласты имеют более высокие прочностные характеристики, чем термопласты. Их свойства менее зависят от температуры, чем свойства термопластов. Предел прочности стеклотекстолита – 600 МПа, по удельной жесткости и удельной прочности он превосходит, некоторые стали, сплавы титана и алюминия. Образование кристаллической структуры приводит к повышению прочности полимера: для полиэтилена низкого давления со степенью кристалличности 80-90 % разрушающее напряжение при растяжении составляет около 30 МПа, для полиэтилена высокого давления (степень кристалличности 50-60 %) – не более 16 МПа.

7.3. Композиционные материалы

Композиционные материалы относятся к новому классу легких и высокопрочных материалов с большим сопротивлением развитию трещины. Необходимый комплекс свойств определяется заранее и реализуется в процессе изготовления композиционного материала. Композиционные материалы имеют свойства, которыми не обладают отдельные компоненты. Для оптимизации свойств композитов выбирают компоненты с резко отличающимися, но дополняющими друг друга свойствами. Принцип построения композиционного материала заимствован у природы. Естественными композиционными материалами являются стволы деревьев, стебли растений, кости человека и животных.

В композиционном материале главную роль в упрочнении играют наполнители, (армирующие компоненты), их называют *упрочнителями*. Они должны обладать высокой прочностью, твердостью и высоким модулем упругости.

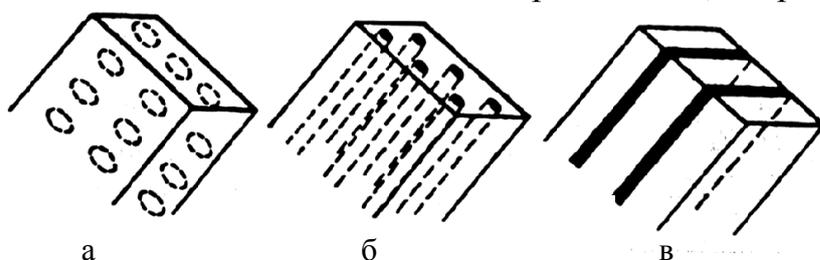


Рис. 7.4. Строение композиционных материалов:
а – дисперсноупрочненные; б – волокнистые; в – слоистые

дулем упругости. Чем выше эти характеристики у наполнителей, тем выше соответствующие свойства композиционного материала, хотя они и

не достигают характеристик наполнителя. По типу упрочняющих наполнителей композиционные материалы делят на *дисперсноупрочненные, волокнистые* и *слоистые*.

Дисперсноупрочненные материалы (см. рис. 7.4,а) содержат мелкие, равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов, которые не взаимодействуют с матрицей и не растворяются в ней вплоть до температуры плавления. Дисперсные частицы упрочняют материал за счет сопротивления оказываемого движению дислокаций, при нагружении. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между ними, тем прочнее материал. Сопротивление движению дислокаций сохраняется вплоть до температуры плавления матрицы. Поэтому данные материалы отличаются высокой жаропрочностью и сопротивлением ползучести.

В волокнистых композиционных материалах (рис. 7.4,б), арматурой могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки различного плетения. Армирование волокнистых композиционных материалов может осуществляться по одноосной, двухосной и трехосной схеме (рис. 7.5). Прочные и твердые волокна находятся в окружении металличе-

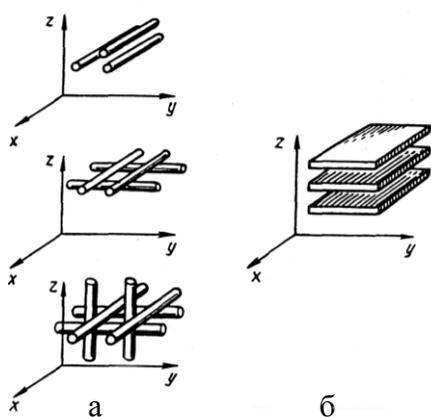


Рис. 7.5. Схемы армирования композиционных материалов: а - волокнистых; б - слоистых

ческой или пластмассовой матрицы. В качестве волокон используют прочную металлическую проволоку, металлические или керамические нитевидные кристаллы с низкой плотностью дислокаций, стеклянные и керамические нити (например, из бора или углерода). Волокна являются элементами, воспринимающими нагрузку, матрица распределяет нагрузку между волокнами, защищает их поверхность и повышает энергию распространения трещины, предупреждая разрушение хрупкого типа. Этот принцип упрочнения компози-

онного материала противоположен различным методам упрочнения металлов, когда металлическая матрица упрочняется, например, за счет выделений второй фазы. В композиционных материалах твердость матрицы благодаря наличию прочных волокон повышать не требуется.

Армирование волокнами дает большой прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо.

Слоистые композиционные материалы (рис. 7.5,б) набираются из чередующихся слоев наполнителя и материала матрицы (конструкция типа «сэндвич»). Слои наполнителя могут быть различно ориентиро-

ванны. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из материалов, с разными механическими свойствами. Для слоистых композитов обычно используют неметаллические материалы.

Для расширения комплекса свойств или усиления какого-либо свойства, композиционный материал одновременно армируют наполнителями различной формы и размеров. Так, для повышения модуля упругости композитов с полимерной матрицей, армированных стеклянными волокнами, дополнительно вводят волокна бора.

Композиционные материалы, которые содержат различные наполнители, называют *полиармированными*. Матрица связывает композицию и придает ей форму. От свойств матрицы зависят технологические режимы получения композиционных материалов и эксплуатационные характеристики: рабочая температура, плотность, сопротивление усталостному разрушению и воздействию окружающей среды.

Созданы композиционные материалы с матрицей, состоящей из чередующихся слоев различного химического состава. Такие материалы называют *полиматричными*. Например, использование в качестве матрицы, одновременно, алюминия и титана увеличивает прочность такого материала в направлении, перпендикулярном оси волокон. В качестве матриц металлических композиционных материалов используют алюминий, магний, титан, жаропрочный никель, сплавы на их основе, а также неметаллические материалы – полимеры и керамики.

Свойства и структура композиционных материалов. Свойства композитов зависят не только от свойств матрицы и наполнителя, но и от размеров армирующих волокон, схемы армирования и количества наполнителя в матрице. При упрочнении волокнами конечной длины нагрузка на них передается через матрицу с помощью касательных напряжений. С увеличением длины волокна напряжение, возникающее в нем, повышается. При определенной длине, называемой критической, напряжение достигает максимального значения и уже не меняется при дальнейшем увеличении длины волокна.

Схема армирования оказывает большое влияние на анизотропию свойств композитов. При растяжении предел прочности и модуль упругости достигают наибольших значений в направлении продольного расположения волокон, наименьших – в направлении поперечного расположения. При двухосном армировании анизотропия свойств не наблюдается. Однако по сравнению с одноосным армированием прочность вдоль оси волокон уменьшается в 3 раза.

Прочность композиционных материалов в большой степени зависит от прочности сцепления наполнителя с матрицей. Зависимость прочности композиционного материала от количества наполнителя (V)

носит линейный характер (рис. 7.6), за исключением материалов с очень низким (менее 5 %) или высоким (более 80 %) содержанием. При малом

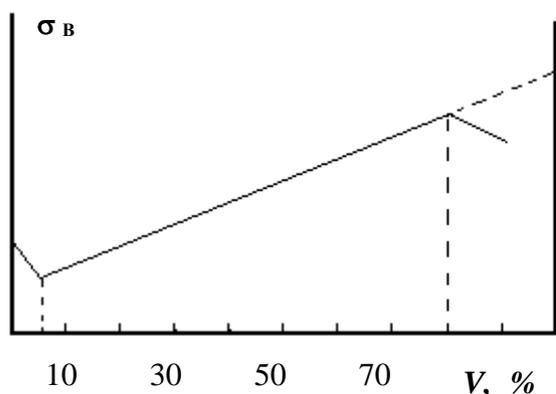


Рис. 7.6. Влияние наполнителя на прочность композиционного материала

содержании упрочнителя вязкая матрица, по сравнению с хрупким наполнителем, до разрушения испытывает большую деформацию. Это приводит к нарушению сцепления волокон наполнителя с матрицей. При большом содержании наполнителя снижение прочности композиционного материала связано с достижением предела плотности упаковки упрочнителя.

Требуемая прочность сцепления обеспечивается диффузионными процессами и химическими реакциями, протекающими на границе раздела волокон наполнителя и матрицы. Процессы протекают при изготовлении композиционных материалов, так и при их использовании. Для металлических композитов прочная связь между волокном и матрицей обеспечивается благодаря их взаимодействию с образованием тонкого слоя интерметаллидных фаз. Если между волокнами и матрицей взаимодействия нет, то на поверхность волокон наносят специальные покрытия для его обеспечения. Для композитов на неметаллической основе связь между компонентами осуществляется за счет адгезии (межмолекулярного взаимодействия). Плохой адгезией к матрице обладают высокопрочные борные, углеродные и керамические волокна. Улучшение сцепления достигается травлением волокон или вискеризацией – выращиванием монокристаллов карбида кремния на поверхности углеродных, борных и других волокон перпендикулярно их длине. На поверхности волокон после обработки образуется «ворс».

Виды армирующих материалов. Углеродные волокна получают высокотемпературной обработкой синтетических органических волокон в инертной среде. В зависимости от вида исходного продукта углеродные волокна получают в виде нитей, жгутов, лент или тканого полотна. Обычно для производства углеродных волокон используют вискозу. При нагреве синтетическое волокно разлагается с образованием лентообразных слоев углерода с гексагональной структурой.

При нагреве выше 450 °С на воздухе углеродные волокна окисляются, но в восстановительной и нейтральной атмосфере сохраняют свои механические свойства до 2200 °С. К достоинствам волокон относятся

высокая тепло- и электропроводность, коррозионная стойкость, стойкость к тепловым ударам, к недостаткам – плохая смачиваемость расплавленными материалами. Для ее улучшения на поверхность волокон наносят переходные покрытия. Например, углеродные волокна для алюминиевой матрицы покрывают боридами титана и циркония.

Борные волокна получают разложением хлорида бора в среде водорода с последующим осаждением бора из газовой фазы на горячую вольфрамовую нить диаметром 12 мкм. При долгом нагреве, после взаимодействия бора с вольфрамом, сердцевина борных волокон состоит из боридов вольфрама различного состава, в основном WB_4 . При небольшой плотности, волокна бора обладают высокой прочностью и жесткостью. При температурах выше 400 °С борные волокна окисляются, выше 500 °С – вступают в химическое взаимодействие с алюминиевой матрицей. Для повышения жаростойкости и предохранения от взаимодействия наполнителя с матрицей, на борные волокна наносят покрытия из карбида кремния, карбида или нитрида бора, толщиной 3-5 мкм.

Стекловолокно получают продавливанием стекломассы через фильеры или вытягиванием из расплава. Для него характерна высокая прочность, теплостойкость, низкая теплопроводность и высокая коррозионная стойкость.

Изготавливают два вида стекловолокна: *непрерывное* диаметром 3-100 мкм, длиной до 20 км; *штапельное* диаметром 0,5-20 мкм, длиной 0,01-0,5 м. Штапельные волокна применяют для изготовления конструкционных материалов с однородными свойствами, тепло- и звукоизоляционных материалов. Непрерывное стекловолокно – для высокопрочных композиционных материалов на неметаллической основе. Выпускают непрерывные волокна с квадратной, прямоугольной и шестиугольной формой поперечного сечения, что повышает прочность и жесткость композитов благодаря плотной упаковке в матрице.

Металлическая проволока является наиболее дешевым и технологичным упрочняющим наполнителем. В основном используют проволоку из коррозионно-стойких сталей. Большое упрочнение такой проволоки можно получить пластической деформацией при волочении, за счет явления наклепа. Высокая температура рекристаллизации легированных сталей обеспечивает проволоке, особенно из сталей аустенитного класса, сохранение прочности при высокой температуре. Для композитов с алюминиевой матрицей, армированной стальной проволокой, температура не должна превышать 550 °С, иначе в материале начинается активное взаимодействие компонентов.

Для армирования жаропрочных матриц применяют проволоку из тугоплавких металлов (Mo, W, Ta), обладающих высокой жаропрочностью (1200-1500 °С). Большой удельной прочностью при малой плотности обладает проволока из бериллия. Бериллиевую проволоку получают прессованием из литой или порошковой заготовки, заключенной в никелевую оболочку. Деформированная бериллиевая проволока имеет высокую температуру рекристаллизации (700 °С). Бериллиевую проволоку целесообразно применять для армирования матриц с малой плотностью (Al, Mg, Ti).

Нитевидные монокристаллы («усы») имеют наибольшую жесткость и прочность из всех армирующих материалов. Для них характерна малая плотность дислокаций. Доказано, что скручивание усов в процессе образования монокристаллов Al_2O_3 и SiO_2 вызвано наличием в них единственной винтовой дислокации, расположенной вдоль оси роста кристаллов.

Композиционные материалы с металлической матрицей. Получение композиционных материалов на металлической основе осуществляется: прессованием волокон в порошке, пропиткой волокон жидким металлом, предварительным осаждением материала матрицы на волокна с последующим прессованием и спеканием, горячим формованием и спеканием и другими способами. Основной проблемой является достижение равномерного смешивания волокон и матрицы.

Для полной пропитки жидкой матрицей необходима хорошая смачиваемость. Низкая смачиваемость волокон приводит к образованию пористости. Смачиваемость волокон увеличивают путем предварительного покрытия их металлами. Пропитка волокон происходит как за счет капиллярных сил, поднимающих жидкую матрицу по капиллярам между волокнами, так и при заливке волокон матрицы сверху.

Преимуществом композиционных материалов на металлической основе является большая тепло- и влагостойкость, а также более высокие значения характеристик в направлении, перпендикулярном оси армирующих волокон. Прежде всего, это модуль упругости, прочность, пластичность и вязкость разрушения.

Для матриц металлических композиционных материалов целесообразнее применять металлы и сплавы, обладающих небольшой плотностью (Al, Mg, Ti, а также их сплавы). Для матриц жаропрочных сплавов широко используют никель. Например, композит КАС-1 на основе алюминиевой матрицы, армированной стальной проволокой, отличается низкой стоимостью упрочнителя и лучшими значениями тепло- и электропроводности.

Композиционные материалы с неметаллической матрицей. В качестве матриц используются полимерные, углеродные и керамические материалы. Наибольшее распространение получили композиты на полимерной основе из эпоксидных и фенолформальдегидных смол, полиамидов и др.

Полимерные композиционные материалы получают заливкой жидкого полимера, например эпоксидной смолы, в заранее приготовленную форму с уложенным волокнистым наполнителем. Вследствие быстрого отверждения и низкого коэффициента диффузии в неметаллической матрице переходный слой между компонентами отсутствует. Связь между волокнами и матрицей осуществляется путем молекулярного взаимодействия (адгезии). Для повышения прочности связей между компонентами проводят обработку поверхности волокон: травлением, окислением, вискеризацией (осаждение нитевидных монокристаллов на поверхность волокон). Преимущества композиционных материалов с неметаллической матрицей: хорошая технологичность, низкая плотность, большая, чем у металлических композитов, удельная прочность и жесткость, высокая коррозионная стойкость. Недостатки: потеря прочности при нагреве выше 100-200 °С, низкая электропроводность.

По удельной жесткости в сочетании с хорошей удельной прочностью композиционные материалы превосходят металлы и их сплавы, что позволяет снизить массу деталей при сохранении их конструкционной прочности. Это особенно важно в самолето- и ракетостроении.

Стеклопластики являются конструкционным материалом. Из них изготавливают корпуса машин, защитные кожухи, вентиляционные трубы, контейнеры, электро- и радиомонтажные платы и др.

Фиберглас – стеклопластик, идущий на изготовление спортивного инвентаря (например, для прыжков с шестом). Углепластики используют в судо- и автомобилестроении (кузова гоночных машин, гребные винты), при изготовлении деталей авиационной техники, аппаратуры химической промышленности.

Карбоволокниты с углеродной матрицей применяют для элементов тепловой защиты, в производстве авиационных тормозных дисков, химически стойкой аппаратуры; *бороволокниты* – в авиационной и космической технике: турбинные лопатки компрессоров, лопасти вертолетных винтов тяжело нагруженные несущие валы и т. д.

Композиционные материалы с металлической матрицей используются для корпусов и камер сгорания реактивных двигателей и др.

7.3. Керамические материалы

Керамическими материалами (керамикой) называют порошковые материалы из минеральных веществ, (твердых тугоплавких соединений типа оксидов, карбидов, нитридов, боридов и др.), полученные при высокотемпературном спекании.

Основа керамики – *кристаллическая фаза*, определяющая ее свойства, область применения. Такой фазой являются оксиды (Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2), карбиды (TiC , SiC , B_4C), бориды (TiB_2 , ZrB_2), нитриды (Si_3N_4 , TiN) и др.

Аморфная фаза представляет прослойку стекловидных веществ, которая облегчает процесс изготовления материала и изделий и служит связкой для частиц кристаллической фазы. Количество аморфной (стекловидной) фазы составляет от 1 до 40 %. В некоторых видах керамики, полученных из чистых веществ, эта фаза может отсутствовать.

Наличие *газовой фазы* связано с особенностями получения изделий из порошков. Остается некоторая пористость, заполненная газами. Эта пористость может быть от 0 до 30-40 %. Так как аморфная и газовая фазы отрицательно влияют на прочностные свойства материала, то в технической керамике, работающей под нагрузкой, количество этих фаз должно быть минимально (до 1 %).

Основные свойства керамики: высокая температура плавления и рабочая температура; высокая твердость и износостойкость, жаропрочность и теплостойкость; хорошая коррозионная стойкость в различных средах; низкие пластические свойства, повышенная хрупкость; хорошие диэлектрические свойства; небольшой удельный вес ($1,8-5,0 \text{ г/см}^3$).

Большая твердость и высокие температуры плавления керамических материалов обусловлены большой силой ковалентных или ионных связей их кристаллических решеток. Высокое сопротивление деформации связано с сопротивлением кристаллической решетки движению дислокаций. Дополнительная упрочняющая обработка не требуется. Главный недостаток керамических материалов – низкие пластические свойства, низкая прочность при растяжении, поэтому при нагружении керамика разрушается хрупко. С увеличением пор хрупкость увеличивается, прочность при растяжении уменьшается. Технология изготовления изделий из керамики должна предусматривать получение материала с минимальной пористостью. Для получения прочной технической керамики используются мелкозернистые порошки с размером частиц кристаллической фазы 1-3 мкм, иногда меньше 1 мкм.

Оксидная керамика на основе оксидов различных элементов (Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 и др.). Для таких соединений характерна ионная связь, что в значительной степени определяет свойства оксидной керамики. Материалы имеют высокую твердость, огнеупорность, химиче-

скую стойкость в кислотах и щелочах, в окислительных средах, на воздухе. Температуры плавления оксидной керамики – 2000-3300 °С, рабочие температуры – 0,8-0,9 $T_{пл}$. Материал хорошо работает на сжатие, но имеет большую хрупкость. Оксидная керамика не выдерживает резких изменений температуры.

Керамика на основе глинозема Al_2O_3 наряду с высокой твердостью имеет хорошие диэлектрические свойства при нормальных и высоких температурах, химическую стойкость в газах, кислотах, расплавленных металлах. Материал, содержащий более 45 % Al_2O_3 , называется *высокоглиноземистой керамикой*, более 95 % – *корундом*. Механические, а также диэлектрические свойства такой керамики возрастают по мере увеличения содержания Al_2O_3 . Керамика на основе Al_2O_3 применяется для изготовления различных изделий: тонкостенных обтекателей радиолокационных антенн; футеровки камер сгорания ракетных двигателей; фильер для волочения проволоки; режущих инструментов, работающих с большим разогревом; подложек интегральных микросхем; электроизоляторов и др.

Керамика на основе кремнезема SiO_2 имеет хорошую коррозионную стойкость во многих средах, отличается низкой теплопроводностью и коэффициентом термического расширения. Изделия из кварца могут быстро нагреваться и охлаждаться без растрескивания. Изготавливают химически- и термостойкую посуду и другие изделия. Кварц прозрачен для видимого и ультрафиолетового излучения. Из него изготавливают колбы для ламп, стекла, оптические волокна, световоды и др. Кварц используется в электротехнической промышленности, как хороший изолятор. Материал на его основе применяется как огнеупор для футеровки печей, разливочных ковшей. Оксидную керамику используют как строительный материал: изготавливают кирпич, облицовочные плитки, черепицу, фарфоровую посуду, сантехнические изделия и т. п.

Безкислородная керамика. Материалы получают на основе тугоплавких соединений, не содержащих кислород: нитриды (Si_3N_4 , AlN), бориды (TiB_2 , ZrB_2). Эти химические соединения имеют ковалентные связи. Свойства керамики: высокая твердость и износостойкость; низкий коэффициент термического расширения, хорошая теплопроводность; стабильность механических свойств в широком диапазоне температур. Недостаток – большая хрупкость. Изготавливают нагревательные элементы электрических печей сопротивления, работающих при высоких температурах на воздухе без специальной защитной атмосферы.

Керамика на основе карбида кремния SiC (карборунд) имеет высокую твердость, жаростойкость, износостойкость, химическую и коррозионную стойкость, низкий коэффициент термического расширения.

Плотность – 3,2 г/см³. Из нее изготавливают нагреватели электрических печей, чехлы термодар, лопатки газовых турбин, шлифовальные круги.

Керамика на основе нитрида кремния Si₃N₄ отличается высокой твердостью, износостойкостью. Плотность – 3,2 г/см³, рабочая температура 1350 °С. Изготавливают детали газовых турбин, коррозионно- и жаростойкие инструменты, тигли, кристаллизаторы, детали насосов и трубопроводов. Керамика может заменить жаропрочные сплавы, содержащие дефицитные элементы (вольфрам, молибден, кобальт, никель).

Керамико-металлические материалы (керметы). Для уменьшения хрупкости в керамику вводят некоторое количество металла. Материал представляет смесь порошков тугоплавких соединений (керамическая составляющая) и металла (металлическая составляющая), спрессованную в изделие необходимой формы и спеченную при высоких температурах. Металл играет роль связки между частицами керамики и обеспечивает пластичность материала. В качестве связки используются порошки кобальта, никеля, железа, молибдена и других металлов. Чем больше металлической связки в керметах, тем выше пластические свойства, прочность при изгибе, но ниже твердость и износостойкость.

Твердые сплавы – керметы, состоящие из карбидов вольфрама, титана, тантала и кобальтовой связки. Твердые сплавы подразделяют на вольфрамсодержащие и безвольфрамовые материалы, (на основе карбида или карбонитрида титана и др., с никель-молибденовой связкой). Благодаря высокой твердости, износостойкости и теплостойкости они применяются для изготовления режущего и штампового инструмента, инструмента для бурения скважин. Хорошую коррозионную стойкость до 1100 °С имеют керметы на основе карбида хрома с никелевой связкой (11 %). Материалы хорошо работают в условиях абразивного износа, особенно в окислительных средах, но они более хрупкие, чем другие твердые сплавы, имеют меньшую прочность при изгибе. Изделия из порошковых керметов прессуют в формах при давлении 200-300 МПа и спекают при 1400-1800 °С в нейтральной или защитной атмосфере. При спекании увеличивается плотность получаемых изделий за счет уменьшения объема и пористости материала.

8. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Основой металлургического производства является двухступенчатая схема, которая состоит из доменной выплавки чугуна и различных способов его передела в сталь. При доменной плавке происходит восстановление из руды железа и некоторых примесей (фосфора, кремния, марганца). Восстановленное железо насыщается углеродом, кислородом и серой. В результате из руды в доменных печах получают чугун – сплав железа с углеродом, в который также входят примеси марганца, кремния, фосфора и серы. При переделе чугуна в сталь происходит окисление углерода и примесей и удаление их в шлак в конвертерах, мартеновских и электрических печах.

8.1. Основные сведения о производстве чугуна

Материалы. Для выплавки чугуна в доменных печах необходимы железная руда, флюсы, топливо и огнеупорные материалы.

Руда. Железо составляет более 5 % земной коры. В природе оно находится в виде окислов, входящих в состав различных минералов. Руда состоит из минералов и пустой породы (песок, глина). В руде присутствуют такие примеси как фосфор, кислород, водород и азот. Они называются вредными, поскольку ухудшают свойства выплавляемого чугуна и частично удаляются до плавки. Промышленная руда – горная порода, из которой при данном уровне развития техники экономически целесообразно извлекать металлы. Промышленное содержание железа в рудах – 30-50 %, меди – 3-5 %. Богатые железные руды – красный (Fe_2O_3) и магнитный (Fe_3O_4) железняк – содержат до 60-70 % железа. Перед плавкой руду обогащают. Пустая порода удаляется путем дробления, промывания. После обогащения железорудный концентрат подвергают окускованию двумя способами. *Агломерация* заключается в спекании при 1300-1500 °С шихты, состоящей из крупных фракций концентрата, известняка, кокса и влаги. *Окатывание* применяют для обработки тонко измельченного концентрата: во вращающихся барабанах шихта приобретает форму шариков-окатышей диаметром до 30 мм. После этого окатыши сушат и обжигают.

Флюсы. Пустая порода состоит, в основном, из кислого окисла кремния (SiO_2) и нейтрального окисла алюминия (Al_2O_3). Для нормальной плавки необходимо, чтобы соотношение кислых и основных окислов в печи было одинаковым: в этом случае образуются легкоплавкие

соединения с хорошей текучестью – шлаки. В печь загружают флюсы – обычный известняк CaCO_3 или доломитизированный с добавкой MgCO_3 . При их термическом разложении образуются основные окислы и химический состав шлака выравнивается.

Топливо. Для доменной плавки требуется твердое неспекающееся топливо, которое служит для нагрева и расплавления шихты, а также химическим реагентом для восстановления окислов железа, примесей из руды и пустой породы. Обычно применяют кокс, который получают сухой перегонкой каменного угля при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ без доступа воздуха. При нагревании из него выделяются газообразные продукты, он размягчается и превращается в пористую массу – кокс. Требования к качеству кокса: содержание золы (8-10 %), серы (до 2 %) и фосфора (до 0,2 %).

Огнеупорные материалы. Плавка ведется при высоких температурах. Внутреннюю облицовку (футеровку) печей делают из огнеупорных материалов. Они делятся на кислые, основные и нейтральные в зависимости от того, какие окислы преобладают в их составе. Динасовый кирпич на 95 % состоит из кислого кремнезема SiO_2 (огнеупорность до $1700\text{ }^\circ\text{C}$); доломитовый, магнезитовый кирпич содержат основные окислы CaO и MgO (огнеупорность до $2000\text{ }^\circ\text{C}$); нейтральный шамотный кирпич – до 40 % Al_2O_3 и 60 % SiO_2 (огнеупорность до $1750\text{ }^\circ\text{C}$).

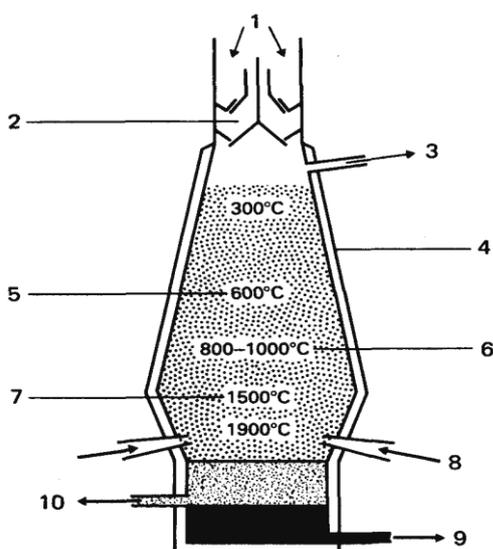
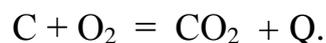


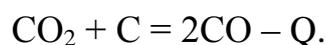
Рис. 8.1. Доменная печь:
1 – руда, известняк, кокс; 2 – загрузочный конус; 3 – колошниковый газ; 4 – кладка печи; 5 – зона восстановления оксида железа; 6 – зона образования шлака; 7 – зона горения кокса; 8 – подача нагретого воздуха через фурмы; 9 – расплавленный чугун; 10 – расплавленный шлак

Доменный процесс получения чугуна. Шихта (железорудный концентрат и марганцевая руда, кокс и флюсы) медленно опускается вниз навстречу потоку газов и постепенно нагревается (рис. 8.1).

Горение топлива. Вблизи фурм углерод кокса вступает в реакцию с кислородом воздуха и сгорает с образованием углекислого газа и выделением большого количества тепла (Q):



Температура в этой зоне печи достигает $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Углекислый газ поднимаясь вверх реагирует с новыми порциями кокса. Реакция идет с образованием угарного газа и поглощением тепла:



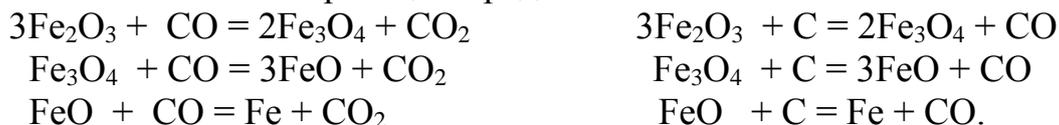
При 400-600 °С в верхней части печи окись углерода разлагается с образованием *сажистого* углерода, оседающего на шихте:



Восстановление железа. Восстановление оксидов Fe_2O_3 и Fe_3O_4 происходит путем последовательного отщепления кислорода:



Процесс восстановления железа газами (окисью углерода, водородом) называют *косвенным*, твердым углеродом – *прямым*. Окислительно-восстановительные реакции представлены ниже:



Косвенное восстановление железа начинается при прогреве шихты до 600 °С и интенсивно протекает при 750-900 °С. Из руды образуется твердое губчатое железо. Частично закись железа FeO восстанавливается сажистым углеродом и твердым углеродом кокса.

Образование чугуна происходит при температуре 1000-1100 °С путем насыщения твердого железа углеродом при взаимодействии с окисью углерода и углеродом кокса, с образованием карбида Fe_3C :

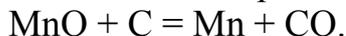


Твердое железо переходит в жидкое состояние. Стекая по кускам раскаленного кокса, дополнительно насыщается углеродом (до 4 %), кремнием, марганцем, фосфором и в жидком виде накапливается в печи.

Кремний восстанавливается твердым углеродом из пустой породы, где находится в виде SiO_2 . Реакции идут с поглощением тепла:



Марганец содержится в руде в виде окислов и карбонатов (MnO_2 , Mn_2O_3 , MnCO_3) и восстанавливается до MnO газами с выделением тепла. Далее MnO восстанавливается до Mn углеродом. Часть марганца растворяется в железе, часть в виде MnO переходит в шлак:



Одновременно идет взаимодействие марганца с твердым углеродом с образованием карбида Mn_3C , который растворяется в железе.

Фосфор содержится в руде в виде фосфатных соединений. Фосфид железа (Fe_3P) и фосфор восстанавливаются как окисью углерода, так и твердым углеродом. Они полностью растворяются в железе.

Сера присутствует в руде в виде органической серы и соединений. Она летуча, удаляется при нагреве шихты, частично, в виде S и FeS , растворяется в железе.

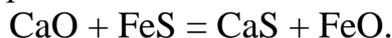
Шлакообразование. При термическом разложении известняка (флюса) образуется оксид кальция (CaO) и углекислый газ:



Оксид кальция взаимодействует с твердой пустой породой и образует шлак, который содержит силикат и алюминат кальция:



Удаление серы в шлак также происходит при взаимодействии с продуктами термического разложения известняка:



Кроме того, в шлаке содержатся окислы SiO₂, MnO, Al₂O₃, FeO а также CaS. Шлак образуется постепенно, его состав меняется по мере стекания вниз. Он легче чугуна, поэтому скапливается на поверхности чугунной ванны. По мере скопления чугун и шлак выпускают из печи. В ковшах емкостью до 140 тонн чугун транспортируется в сталеплавильный цех для передела в сталь или в литейный цех на разливочные машины. Шлак для удобства использования подвергают мокрой грануляции: под действием струи воды он рассыпается на мелкие гранулы.

Продукты доменной плавки. В доменных печах получают чугун разного химического состава. *Передельный* – используют для выплавки стали в конвертерах или мартеновских печах. Он бывает коксовый, фосфористый и высококачественный. Содержание: 4 % С; 0,3-1 % Si; 0,2-1 % Mn; 0,15-0,3 % P и 0,03-0,07 % S. По содержанию фосфора чугуны делятся на классы, по сере – на категории. *Литейный чугун* используют для производства литых деталей. Содержит до 3 % кремния для увеличения жидкотекучести. *Доменные ферросплавы* – применяют для легирования и раскисления стали. К ним относятся: доменный ферромарганец (70-75 % Mn и до 2 % Si); доменный ферросилиций (9-13 % Si и 3 % Mn); зеркальный чугун (2 % Mn и Si).

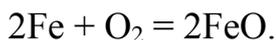
Побочные продукты доменной плавки. Гранулированный шлак используют для производства цемента, строительных кирпичей и блоков, щебня, шлаковаты и других строительных материалов. Применяются литые шлаковые изделия. Колошниковый газ содержит горючие составляющие: окись углерода и водород. После очистки от пыли используется для нагрева воздуха (в воздухонагревателях) и как топливо.

Технико-экономические показатели: коэффициент использования полезного объема печи – отношение полезного объема к среднесуточной выплавке чугуна – 0,4 м³ / тонна; расход кокса – 450-550 кг / тонна.

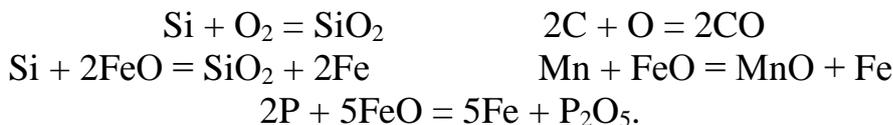
8.2. Производство стали

Сталь производят в агрегатах, использующих разные технологии выплавки: конвертеры, мартеновские печи, электропечи. От чугуна сталь отличается более низким содержанием углерода (около 2 %) и вредных примесей. Процесс превращения чугуна в сталь заключается в удалении углерода и примесей путем избирательного их окисления при продувке жидкого чугуна воздухом или кислородом. В бессемеровских и томасовских конвертерах сталь сначала выплавляли путем продувки жидкого чугуна воздухом снизу. В настоящее время применяют более производительный способ – продувка чугуна кислородом сверху.

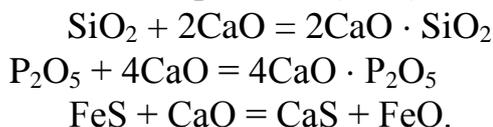
Кислородный конвертер (рис. 8.2) футерован основным огнеупорным кирпичом, имеет возможность поворачиваться относительно горизонтальной оси. Загружают его через горловину в наклонном положении: сначала стальной лом *скрап* (до 30 % от массы чугуна), потом жидкий чугун с температурой 1250-1400 °С. Конвертер возвращают в вертикальное положение. Через горловину вводят фурму, под давлением 9-14 атмосфер подают кислород с добавкой порошка флюса (извести CaCO₃). В начале процесса наиболее интенсивно окисляется железо:



Одновременно происходит окисление примесей кислородом и образующейся закисью железа:



Реакции окисления идут с выделением тепла, температура в конвертере поднимается до 2000-2500 °С. Когда температура слишком высокая – в печь загружают холодный *скрап*. Процессы шлакообразования, идут с участием продукта разложения флюса – (CaO):



Подачу кислорода заканчивают, когда содержание углерода в стали будет соответствовать норме. При избытке углерода, марганца и кремния делают дополнительную продувку кислородом.

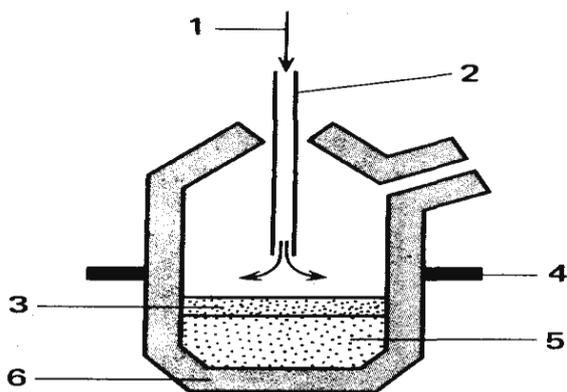
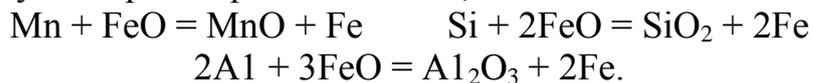
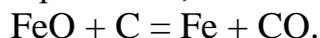


Рис. 8.2. Схема конвертера:
1 – кислород и CaO; 2 – трубка для кислородного дутья; 3 – шлак; 4 – ось; 5 – сталь; 6 – корпус

Раскисление стали. В процессе выплавки сталь насыщается кислородом и становится непригодной для обработки давлением (ковка, штамповка, прокатка): при пластическом деформировании в нагретом состоянии возможно образование трещин. Для удаления закиси FeO сталь «раскисляют». Перед ее выпуском, в конвертер или разливочный ковш добавляют ферромарганец, ферросилиций и чистый алюминий, которые образуют нерастворимые окислы, всплывающие в шлак:



Взаимодействие закиси FeO с углеродом приводит к выделению пузырьков CO и выглядит при разливке, как «кипение» стали:



По поведению при разливке, стали разделяют на кипящие, полуспокойные и спокойные. Кипящие стали раскисляют только ферромарганцем. В них частично остается закись железа, реакция раскисления продолжается до полной кристаллизации слитка. Полуспокойная сталь раскисляется ферромарганцем и небольшим количеством ферросилиция. Спокойная сталь полностью, последовательно, раскисляется ферросплавами и дополнительно алюминием. «Кипения» стали при кристаллизации, не наблюдается. В конвертерах выплавляют углеродистые и низколегированные конструкционные и инструментальные стали.

Мартеновская печь работает на газообразном (кислород, доменный или природный газ) или жидком (мазут) топливе. Для подогрева воздуха имеются два регенератора, через которые проходят горячие печные газы. Они работают поочередно. Нагретый воздух смешивается с топливом и образует факел, направленный на шихту. Футеровка печи основная или кислая. Для кислого процесса требуется чистая по сере и фосфору шихта. Большую часть сталей выплавляют с использованием основного мартеновского процесса. Он делится на скрап-процесс и скрап-рудный процессы. Первый применяется на заводах, где нет доменных печей, основная масса шихты – скрап с добавкой передельного чугуна в чушках. При скрап-рудном процессе, состав шихты – жидкий чугун (до 75 %), скрап и железная руда.

Основной мартеновский процесс делится на три этапа: плавление, кипение и раскисление. Как в кислородном конвертере, так и в мартеновской печи при плавлении чугуна и скрапа примеси кремния, марганца и фосфора окисляются кислородом печных газов и закиси железа FeO. Образующиеся оксиды SiO₂, MnO, P₂O₅, а также сера в виде FeS взаимодействуют с оксидом кальция CaO (продуктом разложения известняка) и образуют шлак. В процессе кипения ванны окисляется избыточный углерод. Для этого в печь подают некоторое количество же-

лезной руды или продувают ванну кислородом, пузырьки CO всплывают на поверхность – ванна «кипит». Шлак на поверхности ванны вспенивается, увеличивается в объеме и выливается. Реакция кипения называется главной, так как при этом происходит интенсивное перемешивание металла, выравнивается температура металла в ванне и его химический состав. Периодически делают химический анализ на содержание углерода, серы и фосфора. Затем сталь раскисляют ферросплавами и алюминием. Основным *скрап-процессом* выплавляют спокойные, углеродистые стали. При выплавке легированных сталей руду не добавляют, ферросплавы вводят после раскисления в готовую сталь в конце плавки.

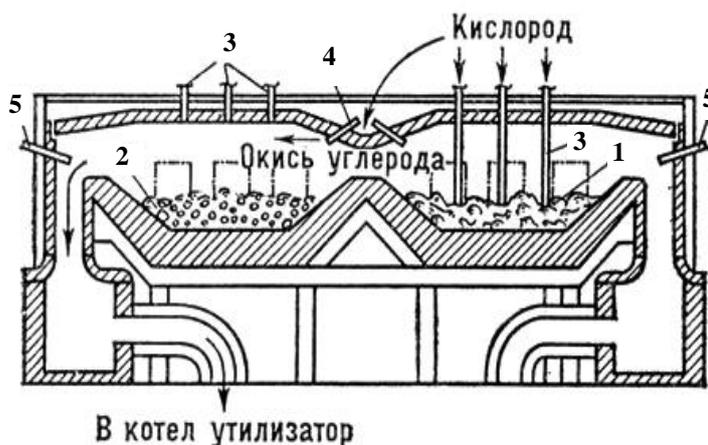


Рис. 8.3. Двухванная мартеновская печь:
1 – жидкий металл; 2 – шихта; 3 – продувочная фурма;
4 – дожигающая фурма; 5 – резервная горелка

образующиеся газы направляют в первую ванну, где жидкий металл уже выпущен и загружена холодная шихта. Производительность таких печей в 2-4 раза выше, чем однованных, расход топлива в 10-15 раз меньше.

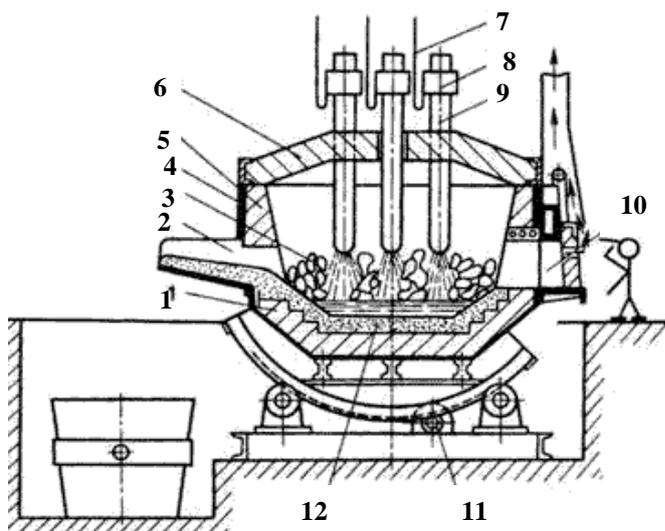


Рис. 8.4. Схема дуговой электропечи

Чаще используются двухванные печи (рис. 8.3). Тепло отходящих газов, образующихся в одной ванне при продувке жидкого металла кислородом, расходуется на нагрев холодной шихты во второй. Затем в эту ванну заливают чугун и начинают продувку,

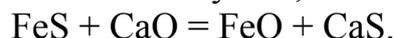
Плавка стали в дуговых электропечах. Электрические печи используют для переплава стального и чугунового металлолома в высококачественные легированные стали. Дуговые электропечи (рис. 8.4) работают на трехфазном переменном токе (напряжение – 100-600 В, сила тока до 10 кА). Источник тепла – электрическая дуга с

температурой до 6000 °С. На съемном своде, используемом для загрузки печи, установлены три цилиндрических электрода 9 из графитизированной массы, закрепленных в держателях 8, к которым подводится электрический ток по кабелям 7. Между электродами и металлической шихтой 3 горит электрическая дуга. Корпус печи имеет форму цилиндра. Снаружи он заключен в стальной кожух 4, внутри футерован основным или кислым кирпичом 1. Плавильное пространство ограничено стенками 5, подиной 12 и сводом 6. В стенке корпуса имеется рабочее окно 10 (для слива шлака, загрузки ферросплавов, взятия проб), закрытое при плавке заслонкой. Сталь выпускают по сливному желобу 2. Для наклона в сторону рабочего окна или желоба имеется привод 11.

При производстве конструкционных углеродистых сталей применяется плавка на углеродистой шихте. Она имеет много общего с основным мартеновским скрап-процессом. Состав шихты: скрап (90 %), передельный чугун или кокс для науглероживания стали, известь для образования шлака. После загрузки шихты опускают электроды, подают ток, зажигают дугу, процесс плавки начинается. На первом этапе окисляются кремний, марганец и фосфор; их оксиды взаимодействуют с флюсами и образуют шлак, который сливается. При разогреве шихты до 1500 °С добавляют руду и известь. Кислород, содержащийся в руде, окисляет углерод. Пузырьки СО, всплывая на поверхность, вызывают кипение жидкого металла. Это способствует уменьшению содержания в металле фосфора (до 0,01 %) и углерода. Образующийся шлак удаляют. Второй, восстановительный период, включает раскисление металла, удаление серы и доведение химического состава металла до заданного. При глубинном раскислении ферросплавы и алюминий добавляют в жидкую сталь, при диффузионном – в измельченном виде засыпают на поверхность шлака. В последнем случае раскисляется шлак:



Процесс протекает в шлаке и на границе шлак-металл. Содержание FeO в шлаке уменьшается; из стали FeO переходит в шлак. Оксиды (SiO₂, CO) остаются в шлаке, восстановленное железо переходит в сталь. Удаление серы обеспечивается лучше, чем в мартеновской печи:



Во время восстановительного этапа плавки периодически берут пробы, для определения химического состава стали. Для получения легированных сталей при выплавке вводят ферросплавы. Переплавом легированной шихты из отходов легированных сталей производят, например, быстрорежущую сталь. При необходимости химический состав металла корректируется.

Выплавка стали в индукционных электропечах. Эти печи бывают тигельные (рис. 8.5) и каналные. Они имеют преимущество перед дуговыми в том, что нет перегрева металла и дополнительного науглероживания стали за счет электродов. Печь состоит из огнеупорного тигля, нагревательного индуктора и съемной крышки. Индуктор выполнен

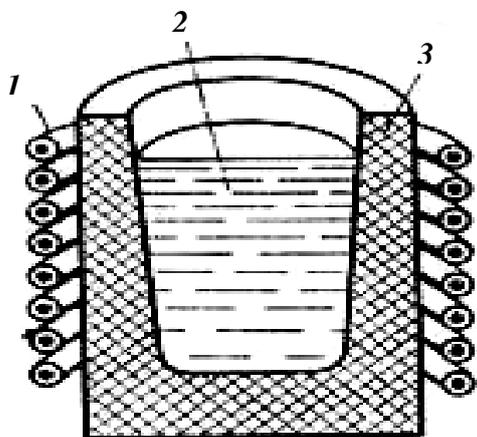


Рис. 8.5. Индукционная печь:
1 – индуктор; 2 – жидкий металл;
3 – тигель

в виде катушки индуктивности из медной трубки, охлаждаемой за счет циркуляции воды. При прохождении через катушку переменного тока высокой частоты (500-2500 Гц) генерируется переменное магнитное поле. Магнитный поток наводит во вторичном контуре (металлом загруженный в тигель) вихревые переменные токи Фуко, под действием которых металл нагревается и расплавляется. Вихревые токи создают интенсивную циркуляцию жидкого металла. За счет процессов перемешивания ускоряются химические реакции и выведение неметаллических включений, выравниваются температура и химический состав стали. Скрап и ферросплавы загружают одновременно, так как процесс плавки протекает быстро. Химический анализ расплава не делают. После расплавления шихты засыпают флюс. Раскисление стали ферросплавами и алюминием производится перед выпуском.

Индукционные печи применяются для выплавки высококачественных низкоуглеродистых и специальных легированных сталей и сплавов. Недостатки этого способа: высокая стоимость оборудования и низкая металлургическая активность шлака, который нагревается только за счет тепла металлической ванны.

Бездоменная металлургия. Получение губчатого железа в шахтных печах. На Оскольском комбинате из руд Курской Магнитной Аномалии выплавляют сталь, минуя доменный процесс. Руду обогащают и получают железнорудный концентрат (содержащий до 70 % Fe). Он измельчается, добавляется вещество для склеивания частиц концентрата в шарики – окатыши. В шахтной печи при 500-800 °С окатыши металлизируются: водород (H₂) и оксид углерода (CO) восстанавливают железо. Процесс сопровождается постепенным увеличением температуры печи до 1100 °С. Металлизированные окатыши (90-95 % Fe) поступают в сталеплавильные дуговые электропечи.

Восстановление железа в кипящем слое. Мелкозернистую руду, концентрат помещают на решетку, через которую подают водород или другой восстановительный газ под давлением. Частицы руды, совершая непрерывное движение, находятся во взвешенном состоянии. «Кипящий» слой обеспечивает хороший контакт окислов железа с газом. На тонну восстановленного железного порошка расходуется до 600 м³ Н₂.

Получение губчатого железа в капсулах-тиглях. Капсулы загружают шихтой послойно. Внутренний и наружный – восстановительные слои (измельченное твердое топливо и известняк для удаления серы). Между ними находится слой измельченной руды или концентрата. Капсулы устанавливаются на вагонетки и медленно перемещаются через печь, разогретую до 1200 °С. Восстановленное железо спекается в полуфабрикаты в виде труб, их дробят и измельчают в порошок с содержанием железа до 99 % и углерода – 0,1-0,2 %.

8.3. Разливка стали

Сталь выпускают в разливочный ковш и транспортируют к месту разливки. Из ковша сталь разливается в изложницы (чугунные формы) разного поперечного сечения. Из слитков квадратного сечения получают сортовой прокат (двутавровые балки, швеллеры, уголки, рельсы). Слитки прямоугольного сечения прокатывают в листы, слитки круглого сечения идут для производства труб, многогранные – для поковок.

Для разливки спокойных сталей применяются изложницы, расширяющиеся кверху (рис. 8.6,а), с прибыльными надставками, футерованными огнеупором. Жидкая сталь в прибыли питает затвердевающий слиток, что уменьшает глубину усадочной раковины и отходы при ее обрезке. Размеры изложниц зависят от назначения слитка. Для разливки кипящих сталей применяют изложницы, расширяющиеся книзу. Если сталь заливается в изложницу из ковша сверху, то образуется много брызг, которые в виде капель застывают на стенках и снижают качество поверхности слитка.

Для разливки легированных и высококачествен-

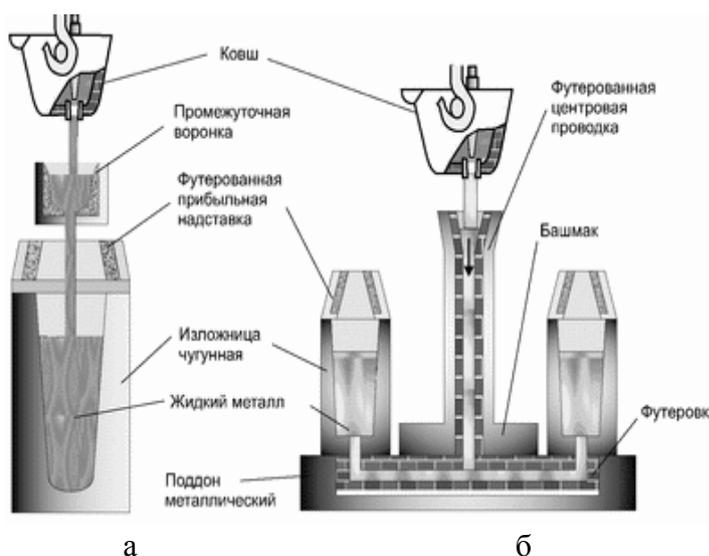


Рис. 8.6. Разливка стали в изложницы:
а – сверху; б – сифоном

ных сталей применяется сифонная схема, когда заполняется одновременно несколько изложниц (рис. 8.6,б). Изложницы устанавливают на поддоне, в центре которого находится футерованный литник. Жидкая сталь из ковша по каналу поступает в нижнюю часть изложниц, заполнение происходит снизу без разбрызгивания металла.

При непрерывной разливке (рис. 8.7) жидкая сталь через промежуточный ковш подается в

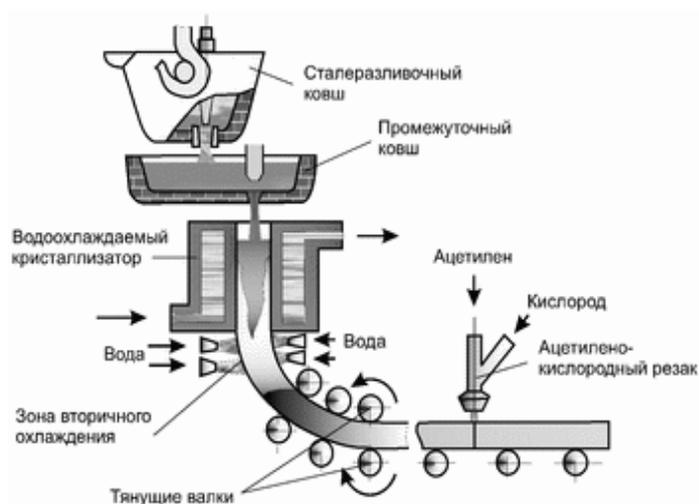


Рис. 8.7. Схема непрерывной разливки

точный ковш подается в изложницу без дна – кристаллизатор. В его нижнюю часть вводят стальную штангу – затравку, на которой затвердевает металл. Затравка при помощи валков движется вниз и вытягивает твердеющий слиток. Полное затвердевание происходит в зоне вторичного охлаждения – в спрейере. Далее слиток перемещается в зону газовой резки на мерные заготовки.

Слитки не имеют усадочных раковин и поступают на станы сортовой прокатки, минуя блюминги и слябинги.

Способы повышения качества стали. Выплавленная любым способом сталь содержит газы, вредные примеси и неметаллические включения, снижающие качество стали. Для дополнительной очистки стали, чаще всего, используют следующие технологические приемы:

1. *Продувка стали в ковше инертными газами.* Пузырьки газа поглощают, а затем выводят из стали неметаллические включения и растворенные в ней и водород, азот и кислород.

2. *Обработка стали синтетическим шлаком.* Способ позволяет удалять газы, неметаллические включения, серу. Шлак содержит окислы кальция (55 %), алюминия (40 %), кремния и магния. Его предварительно расплавляют и заливают в пустой ковш. Затем, с определенной высоты в ковш выливают сталь. Интенсивное перемешивание стали и шлака способствует полному завершению всех химических реакций.

Такой же эффект достигается при продувке стали шлакообразующей смесью, состоящей из порошков извести и плавикового шпата.

3. *Очистка стали вакуумированием.* При уменьшении атмосферного давления растворимость газов уменьшается. Сталь «закипает» и пу-

зырьки выделяющихся газов (водород, азот и кислород) увлекают за собой неметаллические включения.

4. *Повторный переплав стали.* К таким способам относятся: электрошлаковый переплав, переплав в вакуумно-дуговой печи, переплав в электронно-лучевой печи и др. Дополнительная очистка достигается жидким шлаком или вакуумированием.

9. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Литейное производство – процесс получения деталей требуемой конфигурации, из расплавленного металла. Жидкий металл заполняет внутреннюю полость специальной литейной формы, имеющую конфигурацию будущей отливки. При охлаждении металл затвердевает и сохраняет форму этой полости. Литье часто единственный способ изготовления крупногабаритных деталей сложной конфигурации с большой массой. Литейная технология применяется и в случае, когда материал (например, чугун) не пластичен и не поддается обработке давлением (ковке, штамповке и др.).

Различными способами литья получают около 50 % всех деталей. Большая часть отливок изготавливается литьем в песчано-глинистые формы. Остальные способы литья относят к *специальным*: литье по выплавляемым моделям, в оболочковые формы, литье в кокиль (в металлические формы), под давлением, центробежное литье и др. По количеству заливок литейные формы делятся на *одноразовые* и *многократные*. Одноразовая форма используется для получения единичной отливки, многократная форма – для сотен или тысяч штук.

9.1. Литейные свойства сплавов

Качество отливок определяется литейными свойствами сплавов.

Жидкотекучесть – способность металлов и сплавов заполнять в расплавленном состоянии все полости литейной формы и точно воспроизводить ее очертания. Для измерения жидкотекучести применяют заливку технологической пробы – спирали сечением 0,56 см². Степень жидкотекучести оценивается по длине получившейся спирали.

Усадка – уменьшение линейных размеров и объема сплава при затвердевании. Различают линейную и объемную усадку. Усадка зависит от химического состава сплава, степени его перегрева, скорости охлаждения сплава, конфигурации отливки и конструкции формы. Усадочные раковины (крупные пустоты) и усадочная пористость (скопление мелких пустот) образуются в массивных местах отливки, которые затвердевают в последнюю очередь без подпитки расплавленным металлом.

лом. Для их устранения предусматривают: подпитку (поступление) жидкого металла из прибылей (дополнительных объемов расплавленного металла); принудительное охлаждение массивной части отливки, для выравнивания скорости охлаждения массивной и тонкой частей отливок.

Трещиностойкость – способность сплава противостоять образованию трещин в отливках. При неравномерном по объему охлаждении отливки усадка крупных и мелких частей отливки происходит неравномерно, возникают большие внутренние напряжения. Они могут привести к короблению отливки (изменению формы и размеров) и появлению трещин. Горячие трещины образуются в период кристаллизации отливки, холодные трещины – в затвердевшем сплаве при охлаждении.

Газопоглощение. В расплавленном состоянии металлы обладают способностью активно поглощать различные газы из атмосферы. При затвердевании газы выделяются из сплава и образуют газовые раковины и поры. Для борьбы с этим явлением плавку можно проводить под слоем флюса или в среде инертных газов. Необходимо также просушивать готовые формы и уменьшать влажность формовочной смеси.

9.2. Литье в песчано-глинистые формы

Основные операции технологического процесса изготовления отливок в песчаных формах показаны на рис. 9.1. Для изготовления литейной формы необходимы *модельный комплект* и *формовочная смесь*.

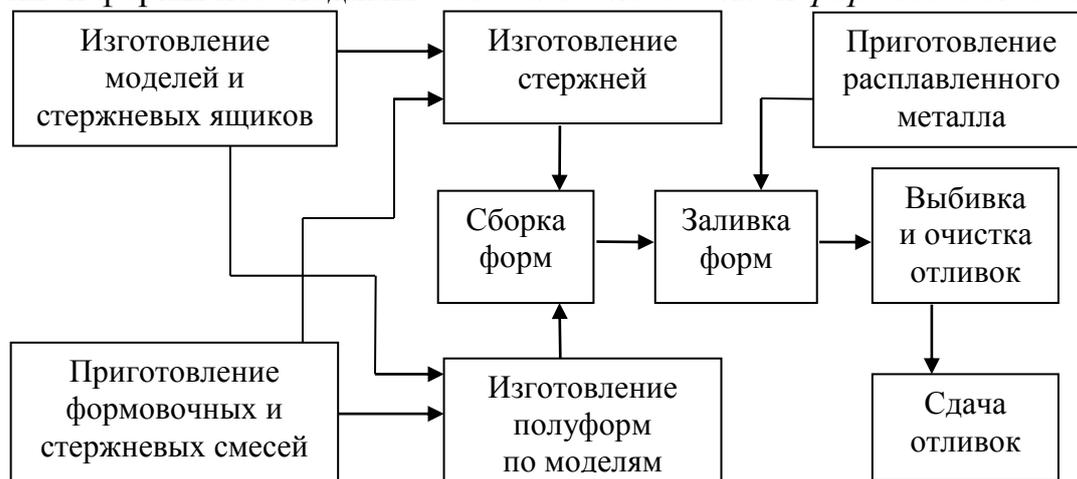


Рис. 9.1. Технология изготовления отливок в песчаных формах

Модельный комплект: модели, подмодельные, подпочные и сушильные плиты, стержневые ящики, опоки и др. С помощью модели в песчаной форме получают внутреннюю полость, соответствующую конфигурации отливки. В стержневом ящике изготавливают стержни для

образования внутренних полостей отливки. Модели и стержневые ящики делают цельными или разъемными, что облегчает выемку модели из формы и стержня из ящика. Опоки – металлические рамы, служащие для удержания формочной смеси и сборки литейной формы. Подопочные плиты предназначены для установки опок и готовых форм под заливку. Модельный комплект изготавливают по чертежам детали. В размерах модели и стержня должны учитываться припуски на механическую обработку и линейную усадку металла. Материалом для моделей и стержневых ящиков служат дерево, металл или пластмасса.

На рис. 9.2 показана схема изготовления литейной формы для получения втулки 1. Форма собирается из двух полуформ, полученных набивкой формочной смеси в парные опоки 5 и 6. Для изготовления

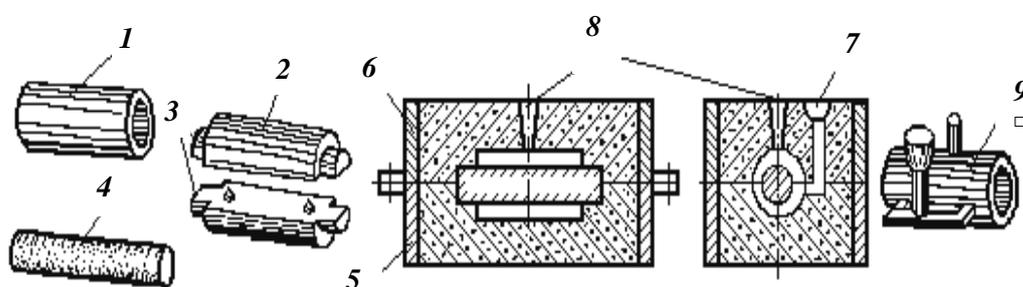


Рис. 9.2. Схема процесса литья в песчано-глинистые формы

верхней и нижней полуформ используют разъемную модель 2. Отверстие в отливке 9 получают с помощью стержня 4, изготовленного в стержневом ящике из более прочной (стержневой) формочной смеси. При сборке формы стержень устанавливают в углубления (гнезда), образованные в форме стержневыми знаками 3 на модели 2. Воздух и газы удаляются через выпор 8. Готовую отливку извлекают, отрезают литники, очищают поверхность от остатков формочных материалов и направляют на механическую обработку.

Металл заполняет форму через *литниковую систему* (рис. 9.3). Она обеспечивает: подвод металла к внутренней полости формы и ее заполнение с требуемой скоростью (стояк 2, питатели 4); вывод газов и паров из формы (выпоры 6); постоянную подпитку отливки при затвердевании; задержание шлака, неметаллических включений на входе в форму (фильтр 7, шлакоуловители 3).

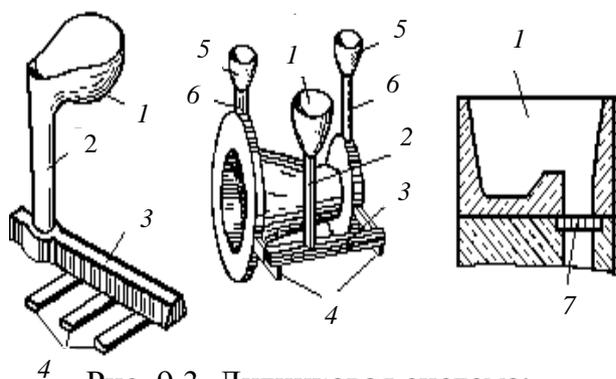


Рис. 9.3. Литниковая система:

- 1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель; 4 – питатели;
- 5, 6 – чаша и стояк выпоров; 7 – фильтр

Формовочные смеси – материалы, из которых изготовляют литейные формы. Технологические свойства смесей. *Прочность* – способность смеси сохранять форму без деформаций при заливке металла. *Пластичность* – способность смеси воспринимать очертания модели. *Непригораемость* – способность смеси выдерживать высокую температуру заливаемого сплава без плавления или химического взаимодействия с ним. *Газопроницаемость* – способность смеси отводить газы через стенки формы. *Податливость* – способность формы и стержней деформироваться при усадке отливки.

Формовочные смеси состоят из *наполнителя* (песок, бывшие в употреблении смеси), *связующего материала* (глина), *антипригарных добавок* (каменноугольная пыль, графит, борная кислота и др.). На поверхности форм и стержней наносят краски (кремниевые или циркониевые) и пасты, которые увеличивают их термическую стойкость и поверхностную прочность. Выбор состава смеси зависит от состава сплава, который используют для отливок. Приготовление смеси начинают с подготовки материалов. Кварцевый песок промывают, сушат. Глину и уголь тонко измельчают, сушат. Отработанную смесь восстанавливают: спекшиеся куски дробят и пропускают через магнитный сепаратор для отделения металлических включений. Компоненты смешивают в нужных пропорциях. Смесь направляется в бункер-отстойник для выдержки (выравнивание влажности по объему). Готовую формовочную и стержневую смеси подают к месту формовки. Ручная формовка малопродуктивна, трудоемка, имеет ограниченное применение. При машинной формовке механизмируются операции засыпки, уплотнения смеси в опоке и извлечения модели из формы и т. д. По способу уплотнения формовочной смеси в опоках формовочные машины делят на вибрационные, прессовые, вакуумные, пескометные и др.

Температура жидкого металла должна быть выше температуры плавления не более чем на 50-150 °С. Охлаждение отливки длится от минут до нескольких суток, в зависимости от массы. Далее производится извлечение отливки из формы – выбивка (форма разрушается). Эта трудоемкая операция, вручную проводится при единичном производстве мелких отливок. На операции обрубки у отливок удаляют литники, прибыли, выпоры, заливы по периметру стыка полуформ и т. д. Обрубка производится пневматическими зубилами, ленточными и дисковыми пилами, газовой резкой и другими способами. Очистка отливок – удаление пригара, остатков формовочной и стержневой смесей с поверхности производится в галтовочных барабанах с абразивом, дробеструйных камерах, химической или электрохимической обработкой.

9.3. Плавильные печи

В литейном производстве для каждого металла требуется своя плавильная печь и технология плавки. Плавка сталей ведется в индукционных и электродуговых печах, в печах с пламенным нагревом.

Плавку чугунов проводят, в основном, в вагранках. В качестве шихты применяют доменный чушковый чугун, чугунный и стальной лом, ферросплавы. Топливом является кокс или природный газ. Вагранка – типичная шахтная печь; отличается большой производительностью, простотой конструкции, более высоким коэффициентом полезного действия. Операции по загрузке шихты, плавка, выпуск чугуна и шлака производятся в автоматическом режиме. На ряде заводов применяют вагранки закрытого типа, оснащенные специальными системами очистки и дожигания ваграночных газов. Белый чугун плавят дуплекс-процессом – в вагранке, а затем в электропечи. При получении высокопрочного чугуна из стальных отходов, используют индукционные печи. Для плавки высококачественного чугуна используют дуговые печи.

Медные сплавы плавят в пламенных печах, в тигельных, дуговых и индукционных электропечах. Плавка ведется на воздухе, в среде защитных газов или в вакууме. Алюминиевые сплавы плавят в электропечах сопротивления, индукционных печах, тигельных горнах. Помимо обычной заливки в формы, применяют заливку под давлением для получения отливок повышенной плотности.

Магниевые сплавы склонны к самовозгоранию при температурах, близких к температуре плавления. Поэтому вести плавку на воздухе невозможно. Производят ее в бескислородной атмосфере или под слоем флюса на основе фторидов и хлоридов щелочных металлов в тигельных и индукционных печах. Для плавки титановых сплавов применяют тигельные печи; плавление и заливку производят в защитной атмосфере (обычно в среде аргона). Для отливок авиационной промышленности, используют электронно-лучевые вакуумные электропечи.

9.4. Специальные способы литья

В производстве литых заготовок значительное место занимают специальные способы литья, позволяющие получить отливки повышенной точности, с малой шероховатостью поверхности, минимальными припусками на обработку, высокими эксплуатационными свойствами.

Литье по выплавляемым моделям. Модель отливки изготавливают в пресс-форме с высокой точностью из материалов с низкой температурой плавления (воск, стеарин, парафин). Для получения литейной фор-

мы модель многократно погружают в огнеупорную суспензию из кварцевой муки и раствора этилсиликата (связующего материала) с послойной просушкой в течение 12-24 часов. Перед заливкой расплава восковую модель удаляют из формы, выпаривая или выжигая. В результате, после прокаливания при температуре 900 °С, получается неразъемная, тонкостенная (6-8 мм), очень прочная оболочка – литейная форма. Этим способом можно получить отливки любой сложности, с минимальными припусками на обработку, практически из любых сплавов. Шероховатость поверхности отливки – до 2,5 мкм.

Литье в оболочковые формы применяется в массовом производстве малогабаритных отливок высокой точности. Формовочная смесь состоит из мелкого кварцевого, магнезитового песка (92-95 %) и порошка терморезистивной фенолформальдегидной смолы (5-8 %). При нагревании смола сначала плавится, выше 300-350 °С – затвердевает.

Смесь засыпают в бункер и накрывают металлической, нагретой до 200-250 °С модельной плитой. На нижней поверхности плиты закреплены металлические модели отливок. Бункер переворачивается, формовочная смесь обсыпает нагретые модели. Смола плавится, затвердевая с песком, образует – *оболочку* толщиной 6-8 мм на поверхности модели. Оболочковые полуформы снимают с плиты, соединяют попарно между собой и заливают металл. Затвердевшая смола выгорает, форма легко разрушается. Неметаллические материалы обладают низкой теплопроводностью, кристаллизация расплава происходит медленно. Зерно в структуре сплава получается крупным, для отливок из инструментальных сталей необходима дополнительная термообработка.

Литье в кокиль. Кокиль – многоазовая металлическая (сталь, чугун) форма из двух или более частей. Для образования внутренних полостей (отверстий) в отливках применяют металлические или одноразовые стержни из формовочной смеси. Перед заливкой на внутреннюю поверхность кокиля наносят теплоизоляционный слой из огнеупоров (кварцевой муки, графита, мела, талька) и связующего материала (жидкого стекла) для продления срока службы дорогого и сложного кокиля. Литье в кокиль экономически выгодно применять в крупносерийном и массовом производстве.

Литье под давлением. Металлическая форма – кокиль, заполняется расплавом под давлением до 200 атмосфер. Затвердевают отливки под избыточным давлением. Стержни используются только металлические, неразъемные. Литье осуществляется на специальных литейных машинах с холодной или горячей камерой прессования. На машинах с горячей камерой (рис. 9.4) камера прессования 2 расположена в обогре-

ваемом тигле 1 с расплавленным металлом. При верхнем положении поршня 3 металл через отверстие 4 заполняет камеру прессования. При движении поршня вниз отверстие перекрывается, сплав под давлением заполняет полость пресс-формы 5. После затвердевания отливки поршень возвращается в исходное положение, остатки металла сливаются в камеру прессования, отливка удаляется толкателями 6. Условия работы камеры прессования и поршня неблагоприятные, так как они все время погружены в расплав с высокой температурой.

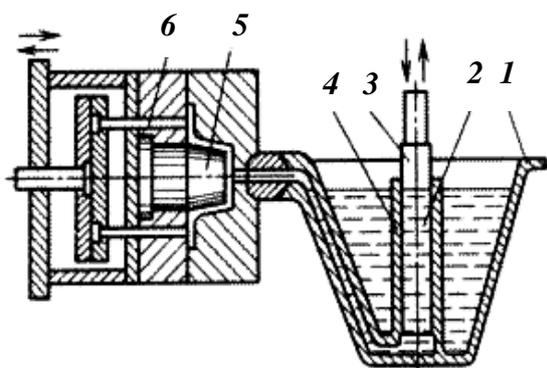


Рис. 9.4. Схема изготовления отливки на машинах с горячей камерой прессования

В машинах с холодной камерой прессования условия работы горизонтальной камеры и поршня более благоприятные, поэтому можно развить более высокое давление прессования. На таких машинах можно изготавливать массивные отливки из всех известных сплавов. Литье под давлением – высокопроизводительный, но дорогой способ изготовления отливок с высокой точностью размеров и малой шероховатостью поверхности.

Центробежное литье. Жидкий металл заливают во вращающуюся с определенной скоростью литейную форму. Вращение формы продолжается в течение всего времени кристаллизации отливки. Металл за счет центробежных сил прижимается к стенкам металлической формы. Материал отливки отличается повышенной прочностью, так как вредные примеси, как более легкие фракции (газы и шлак), вытесняются на внутреннюю поверхность отливки и в дальнейшем удаляются.

Ось вращения может быть горизонтальной (рис. 9.5) и вертикальной. На рисунке показано получение отливки, имеющей форму тела вращения. Ось вращения совпадает с осью симметрии отливки, толщина стенки определяется количеством залитого металла. Центробежное литье применяют в массовом и единичном производстве отливок из различных сплавов. Отливают втулки для подшипников скольжения, гильзы цилиндров и поршневые кольца двигателей, крупнокалиберные оружейные стволы, двухслойные (биметаллические) отливки. Широко центробежное литье применяют для изготовления чугунных труб. При изготовлении мелких, не симметричных отливок металлическая или оболочковая (песчаная) форма

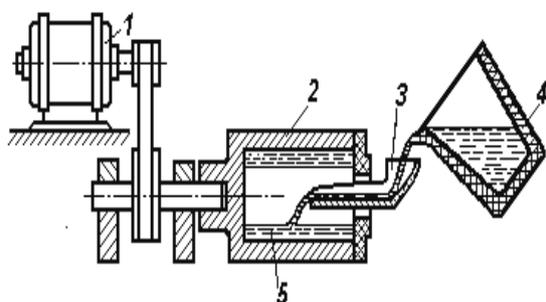


Рис. 9.5. Центробежная машина с горизонтальной осью вращения

25

устанавливается в стороне от оси вращения (на определенном радиусе). Такой способ литья называется *центрифугированием*.

Литье под низким давлением. Заполнение формы расплавом и затвердевание отливки происходит под минимальным избыточным давлением инертного газа. Расплавленный металл содержится в подогреваемом тигле. Для заполнения формы в тигель погружается металлическая труба – металлопровод. Под давлением газа металл из тигля по трубе плавно поднимается в форму, исключая избыточное перемешивание сплава, образование газовых раковин и оксидных пленок. Процесс заполнения формы расплавом легко управляется, регулируя давление газа, что улучшает качество отливки. Таким способом отливают тонкостенные крупногабаритные детали из легких сплавов.

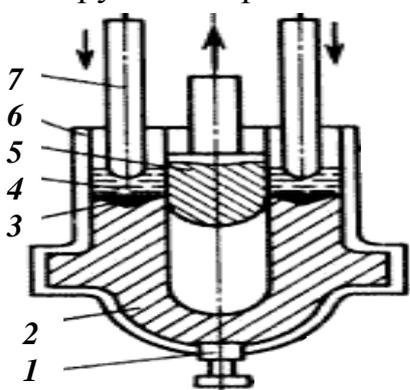


Рис. 9.6. Схема электрошлакового литья

Одновременно происходит плавление металла и заполнение литейной формы за счет переплава электродов, имеющих необходимый химический состав. Источником тепла является шлаковая ванна 4 (рис. 9.6), нагреваемая проходящим электрическим током. В кристаллизатор 6 заливают расплавленный шлак специального состава. Электрический ток подводится к электродам 7 и затравке 1 в нижней части кристаллизатора. Шлаковая ванна 4 нагревается до 1700 °С, погруженные в нее концы электродов начинают оплавляться. Капли расплавленного металла опускаются через шлаковую ванну, очищаются от вредных примесей и образуют металлическую ванну 3. Затвердевание отливки 2 начинается в нижней части кристаллизатора, за счет отвода тепла через стенки. Электроды, по мере оплавления, постепенно поднимаются вверх. Такая технология литья применяется для изготовления валков прокатных станков, кокилей для литья труб центробежным способом, коленчатых валов крупных судовых дизелей.

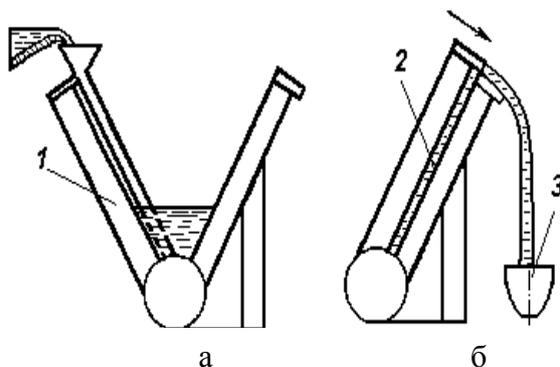


Рис. 9.7. Схема литья выжиманием 126

Литье выжиманием. В выжимной установке имеются две полуформы, установленные под углом друг к другу (рис. 9.7). Между ними находится металлоприемник, для заливки металла. После заливки подвижная полуформа 1 поворачивается, металл выжимается и заполняет полость 2

между полуформами. Излишек металла переливается в ковш 3. Заполнение формы и кристаллизация отливки происходят одновременно. Способ позволяет получать тонкостенные крупногабаритные отливки с хорошей структурой и высокими механическими свойствами.

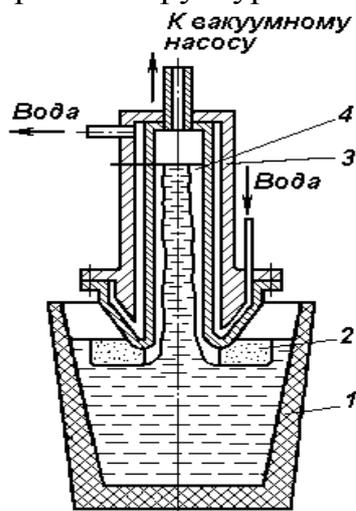


Рис. 9.8. Схема литья вакуумным всасыванием

повышенными механическими свойствами. Преимущество – получение качественных отливок без дополнительного расхода металла на литники и прибыли.

Непрерывное и полунепрерывное литье. В охлаждаемую металлическую форму (кристаллизатор) с одной стороны заливается жидкий металл, с другой стороны, затвердевший металл из этой формы извлекается и продолжает остывать на воздухе. В зависимости от поперечного сечения кристаллизатора отливка представляет собой круглый пруток или профиль, трубу и т.д. Если изделие извлекается тянущими валками, то процесс называют *непрерывным*. Если изготавливается отливка заданной длины, то процесс называют *полунепрерывным*.

9.5. Сплавы для изготовления отливок

Наибольшее количество отливок изготавливают из чугуна. Он имеет высокие литейные свойства и невысокую стоимость.

Серый чугун характеризуется высокой жидкотекучестью, малой усадкой (0,9-1,2 %). Отливки качественные, без усадочных раковин, пористости и трещин. Отливки изготавливают: в песчано-глинистых и оболочковых формах, кокилях, литьем по выплавляемым моделям, центробежным литьем. Высокопрочный чугун имеет такую же жидкотекучесть, как и серый, но усадка больше (1,2-1,7%). Для ее компенсации

предусматривают установку прибылей. Отливки из высокопрочного чугуна получают теми же способами, что и из серого. Детали из ковкого чугуна получают путем отжига тонкостенных отливок из белого чугуна. Пониженную жидкотекучесть белого чугуна компенсируют повышением температуры заливки. Кроме того, усадка белого чугуна больше, чем серого. Поэтому велика вероятность образования усадочных раковин, пористости и трещин. Отливки из белого чугуна получают в песчано-глинистых, оболочковых формах и кокилях.

По литейным свойствам сталь значительно уступает чугуну: имеет большую усадку (до 2,5 %) и низкую жидкотекучесть. Это приводит к образованию усадочных раковин и пористости. Низкоуглеродистые стали склонны к образованию горячих трещин вследствие повышенной температуры заливки. Из-за низкой теплопроводности в высокоуглеродистых сталях возникают значительные внутренние напряжения. Стальные отливки получают в песчано-глинистых формах и специальными способами литья.

Лучшими литейными свойствами среди медных сплавов обладают оловянные бронзы (хорошая жидкотекучесть, усадка 1 %). Но они затвердевают в широком интервале температур, что приводит к образованию пористости. Бронзы без олова имеют хорошую жидкотекучесть, но большую усадку (2,4 %), что приводит к образованию усадочных раковин. Все медные сплавы склонны к образованию трещин. Около 80 % отливок из медных сплавов получают литьем в песчано-глинистые и оболочковые формы.

Лучшими литейными свойствами среди алюминиевых сплавов обладают силумины: хорошая жидкотекучесть, усадка 1 %, узкий температурный интервал кристаллизации, не склонны к образованию трещин. Большинство отливок из алюминиевых сплавов (до 80 %) получают литьем в кокиль или под давлением.

Основные виды брака при литье: газовые, усадочные, шлаковые и песчаные раковины, рыхлость, пористость; недостаточное заполнение литейной формы металлом; горячие и холодные трещины, коробление; несоответствие микроструктуры, химического состава, механических свойств металла отливкам требованиям ГОСТа. Дефекты отливок выявляются различными методами контроля. Контроль размеров позволяет предупредить массовый брак из-за износа или коробления моделей и стержневых ящиков. Механические свойства и микроструктура контролируются периодическими испытаниями отдельных отливок. Внутренние дефекты выявляются методами радиографической или ультразвуковой дефектоскопии.

10. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением – технологический процесс получения заготовок необходимой формы и размеров путем пластической деформации. Обработка давлением применима к пластичным материалам (стали, медные, магниевые и алюминиевые сплавы и др.) и может производиться и в холодном и в нагретом состоянии.

При обработке металла в холодном состоянии зерна деформируются, сплющиваются и вытягиваются в направлении деформации. Прочность и твердость металла при обработке непрерывно увеличиваются, пластичность и вязкость – уменьшаются. Упрочнение металла при пластической деформации называется *наклепом*. Большая плотность дислокаций и высокая концентрация точечных дефектов в наклепанном слое препятствует свободному перемещению дислокаций и затрудняет дальнейшую пластическую деформацию.

При обработке металла в нагретом состоянии сопротивление деформации уменьшается за счет увеличения пластичности металла. Наклеп при деформировании уменьшается даже при небольшом нагреве, когда частично исчезают дефекты решетки. Деформированная форма зерен сохраняется. Это явление называется *возвратом* металла. При нагреве до более высокой температуры наклеп исчезает полностью. Процесс образования новых более совершенных зерен, за счет деформированных, называется *первичной рекристаллизацией*. При дальнейшем нагреве происходит *вторичная рекристаллизация*, сопровождающаяся ростом отдельных зерен за счет других.

Температура, при которой начинается рекристаллизация, называется *температурным порогом рекристаллизации* (T_p). Она связана с температурой плавления зависимостью А. Бочвара $T_p = \alpha \cdot T_{пл}$. Коэффициент α зависит от состава и структуры металла (для сплавов – 0,5-0,6, для технически чистых металлов – 0,3-0,4). Температуры плавления металла – в градусах Кельвина.

Если деформирование металла происходит при $T > T_p$, то наклеп металла отсутствует: одновременно идут процессы упрочнения и разупрочнения – рекристаллизации. Такая деформация называется *горячей*. Если деформирование происходит при $T < T_{рек}$, то деформация называется *холодной*. Для каждого металла и сплава температура горячей обработки имеет не только нижний, но и верхний предел.

На рис. 10.1 показан интервал оптимальных температур I нагрева сталей, для горячей обработки давлением в зависимости от содержания

углерода. Верхний предел зоны нагрева лежит на 150-200 °С ниже температуры начала плавления (линии солидуса), нижний – на 60-70 °С выше температур превращения перлита и цементита в аустенит. Зона 3 пережога находится на 100 °С выше зоны 2 перегрева. Пережженный металл идет только на переплавку. В зоне перегрева происходит интенсивный рост зерна. Крупнозернистая структура металла делает его непрочным и хрупким. Для исправления перегрева необходима термическая операция отжига, измельчающая зерно. Ниже линии нижних температурных пределов начинается зона наклепа. При горячей деформации зерно получается тем мельче, чем ближе окончание обработки к нижнему температурному пределу. Заготовки нагревают в пламенных или электрических печах (камерных, методических, индукционных). Нагревать заготовку нужно быстро, чтобы не успело вырасти крупное зерно, но равномерно, чтобы минимизировать термические напряжения. В отличие от простых камерных печей, в методических печах рабочее пространство разделено на три зоны: подогрева заготовки (600-800 °С), максимального нагрева (1200-

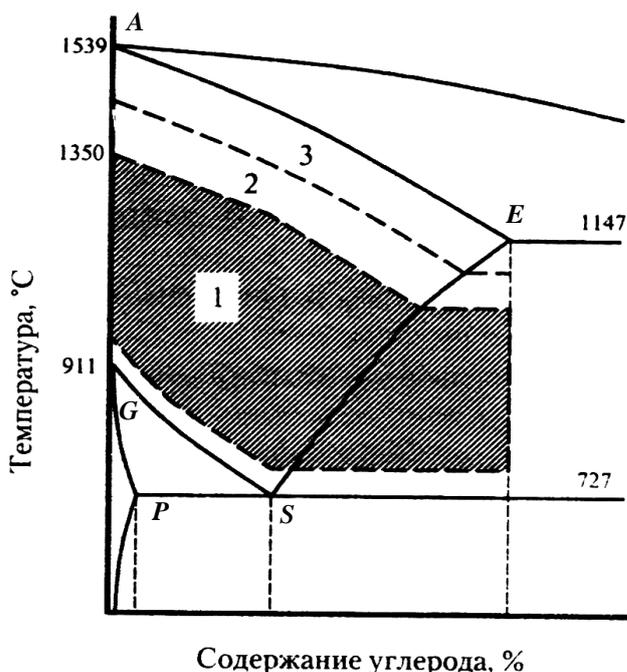


Рис. 10.1. Левая часть диаграммы железо-цементит с областями: 1 – горячей обработки давлением; 2 – перегрева; 3 – пережога

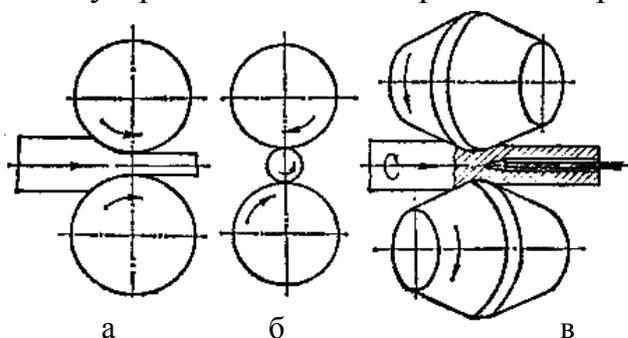
1300 °С) и зону выдержки. В устройствах электроконтактного нагрева ток большой силы (при малом напряжении) проходит через заготовку, которая служит сопротивлением и разогревает ее. В индукционных печах заготовка находится внутри индуктора (соленоида) и нагревается под действием вихревых токов Фуко. В этом случае время нагрева сокращается в 15-20 раз. По сравнению с другими печами отсутствует обезуглероживание поверхности заготовки, меньше слой окалины.

10.1. Прокатка

Прокатка – вид обработки давлением, при котором металл пластически деформируется между вращающимися валками. Заготовка пе-

ремещается за счет сил трения. Толщина уменьшается, но увеличивается длина и ширина. Форма поперечного сечения проката называется *профилем*. Прокаткой обрабатывают сталь, цветные металлы и сплавы.

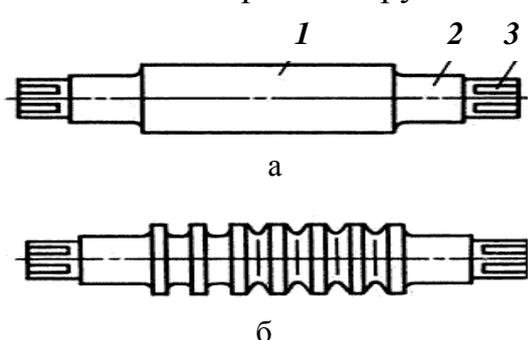
При *продольной прокатке* (рис. 10.2,а) заготовка деформируется между вращающимися в разные стороны валками и движется поступательно, перпендикулярно оси валков.



Этим способом изготавливается около 90 % проката (весь листовой и профильный прокат). При *поперечной прокатке* (рис. 10.2,б) оба валка вращаются в одном направлении, заготовка круглого сечения – противоположном. Заготовка деформируется, но не движется вдоль оси валков.

Поперечная прокатка применяется для производства изделий, представляющих собой тела вращения – заготовки для валов переменного сечения, зубчатые колеса. При *поперечно-винтовой (косой) прокатке* (рис. 10.2,в) валки расположены под углом, вращаются в одну сторону и придают заготовке вращательно-поступательное движение. За счет перекоса валков заготовка получает поперечную и продольную деформацию. Этим видом прокатки производят, например, бесшовные трубы.

Прокатные валки изготавливают из легированной стали или высокопрочного чугуна с отбеленной поверхностью. Они состоят из рабочей части – бочки 1, шеек 2 и трефы 3 (рис. 10.3). Шейки валков вращаются в подшипниках. Трефа соединяется с муфтой или шпинделем и предназначена для передачи крутящего момента на валок.



Валки бывают гладкими и калиброванными, т. е. имеющими ручьи определенного профиля. Ручей – профиль канавки на боковой поверхности валка. Промежутки между ручьями – *бурты*. Калибром называют полость, составленную двумя смежными ручьями пары валков. Сначала заготовку обжимают в обжимных и черновых калибрах, затем – в чистовых.

Прокатку осуществляют на прокатных станах. Оборудование для деформирования металла называется

основным, если оно располагается на главной линии прокатного стана (линии рабочих клетей).

Классификация прокатных станов. По числу валков в рабочей клетке на двух- (дуо-стан), трех- (трио-стан) и многовалковые станы. По направлению вращения валков – на нереверсивные и реверсивные (с переменной направления вращения валков). По конструкции валков – на станы с гладкими и калиброванными валками. По назначению – на обжимные, сортовые, листовые, рельсовые, трубопрокатные и другие станы. По размеру – на мелко- и крупносортовые станы. Крупносортовые станы называют *блюмингами* или *слябингами*. На этих станах слитки массой до 15 тонн прокатывают в квадратные заготовки – *блюмы* (для сортового проката), либо в прямоугольные листовые заготовки – *слябы* (для листового проката).

Продукция прокатного производства – готовые изделия (балки, трубы, рельсы и др.), заготовки для последующей механической обработки. В зависимости от профиля, прокат делится на листовый, сортовой, трубный и специальный. *Сортовой прокат* делится на *простой* (квадрат, круг, шестигранник, прямоугольник) и *фасонный* (уголок, двутавр, тавр, швеллер, рельс). *Листовой прокат* делится на толсто- (до 160 мм) и тонколистовой (менее 4 мм). Листы толщиной менее 0,2 мм называют *жестью* или *фольгой*. Толстолистовой прокат получают только в горячем состоянии. *Трубный прокат* получают на трубопрокатных станах. Бесшовные горячекатаные трубы получают из заготовок круглого сплошного сечения прокаткой сначала на стане поперечно-винтовой прокатки, где заготовка получает винтообразное движение и внутри ее образуется полость, а затем на стане продольной прокатки (пилигримовый стан) из полой заготовки (гильзы) получают трубу требуемых размеров. Сварные трубы изготовляют из горячекатаной ленты (*штрипса*) на непрерывных прокатных станах. Штрипс завивают на калиброванных валках с непрерывной сваркой спирального или прямого шва автоматической сварочной головкой.

10.2. Волочение и прессование

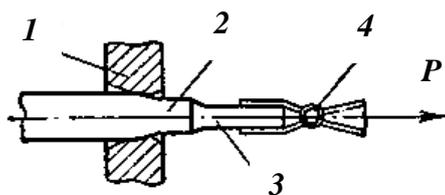


Рис. 10.4. Схема волочения:

1 – волока; 2 – заготовка; 3 – острый конец заготовки; 4 – захват; P – усилие

Волочение – вид обработки металлов давлением, при котором заготовка в холодном состоянии протягивается через сужающееся отверстие – *волоку* (рис. 10.4). Выполняют волочение через ряд уменьшающихся отверстий. При

волочении происходит наклеп металла, поэтому между переходами для снятия упрочнения делают отжиг материала с последующим травлением окислы. Волочением обрабатывают сталь, цветные металлы и их сплавы. Производят проволоку, калиброванные прутки и тонкостенные трубы различного профиля. Изделия получаются с высокой чистотой поверхности и точными размерами. Волока работает в жестких условиях, изготавливается из инструментальной стали или твердого металло-керамического сплава. При волочении тонкой проволоки – из технических алмазов. Для уменьшения трения, повышения стойкости инструмента и улучшения отвода тепла применяют жидкие и сухие смазки (минеральное масло, эмульсии, мыло, порошки графита, меди, молибдена). Волочильные станы состоят из станины с держателем для волоки и тянущего устройства. При волочении протягиваемый металл движется прямолинейно (цепной, реечный стан) или наматывается на барабан.

Прессование – вид обработки давлением, при котором нагретый металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие в матрице 2 в условиях всестороннего сжатия (рис. 10.5). Поэтому прессование единственный метод обработки материалов с низкой пластичностью (специальные стали, чугун, некоторые цветные металлы и сплавы). Металл принимает форму прутка простого или сложного сечения. Прессование проводится при температурах горячей обработки давлением.

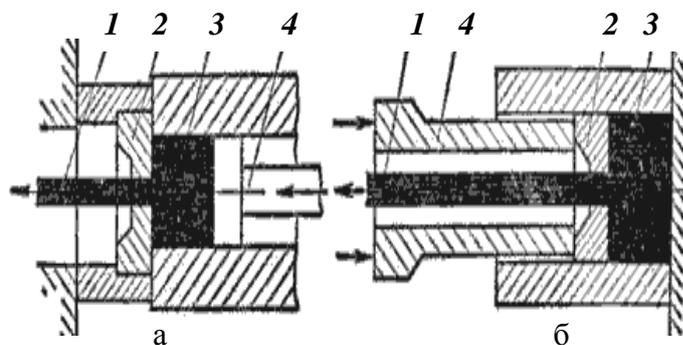


Рис. 10.5. Схема прессования прутка:
а – прямым методом; б – обратным

металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие в матрице 2 в условиях всестороннего сжатия (рис. 10.5). Поэтому прессование единственный метод обработки материалов с низкой пластичностью (специальные стали, чугун, некоторые цветные металлы и сплавы). Металл принимает

форму прутка простого или сложного сечения. Прессование проводится при температурах горячей обработки давлением.

Прямой метод прессования – металл выдавливается в направлении движения пуансона 4 (рис. 10.5,а), *обратное прессование* – металл движется навстречу движению пуансона (рис. 10.5,б). Из заготовки 3 прутки 1 сплошного сечения получают любым методом прессования, трубы – только прямым прессованием.

Инструмент (пресс-шайба 2, пуансон 4, камера прессования) работает в жестких условиях (большое давление, высокая температура) и быстро изнашивается. Его изготавливают из инструментальных сталей и жаропрочных сплавов. Для снижения износа инструмента применяют смазку: минеральные масла, графит, канифоль; при прессовании трудно деформируемых сталей и сплавов – жидкое стекло. Недостаток процесса: весь металл не выдавливается, остается пресс-остаток (до 20 %).

10.3. Ковка

Ковка – вид обработки металлов давлением, при котором металл деформируется на плоских бойках, ударами молота или давлением прессы. Изделия называют *поковками*. Ручная ковка имеет низкую производительность. Распространена машинная ковка. При ковке металл течет в стороны, не ограниченные рабочими поверхностями инструмента (рис. 10.6). Заготовка помещается между нижним (неподвижным) и верхним (подвижным) бойками молота или прессы. Процесс ковки состоит из основных и вспомогательных операций.

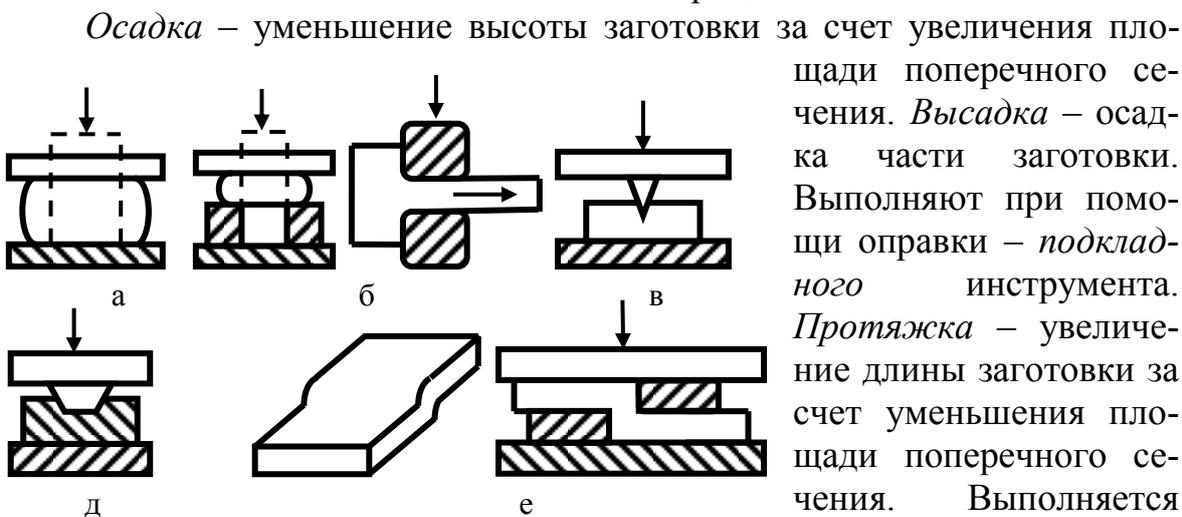


Рис. 10.6. Основные операции ковки:
а – осадка; б – высадка; в – протяжка; г – рубка;
д – прошивка; е – передача

ее перемещением вдоль оси протяжки и поворотами на 90° вокруг оси. *Раскатка на оправке* – увеличение внутреннего и наружного диаметров кольцевой заготовки и уменьшении толщины стенок. *Прошивкой* получают в заготовке сквозные отверстия или полости (глухие отверстия). Инструмент – *прошивень*, отход металла – *выдра*. *Рубка* – отделение одной части заготовки от другой. *Гибка* – придает заготовке изогнутую форму по заданному контуру. Выполняют при помощи опор и приспособлений. Изготавливают угольники, скобы. *Скручивание* – поворот части заготовки вокруг продольной оси. *Передача* – вертикальное смещение одной части заготовки относительно другой. Выполняют при помощи дополнительных опор.

10.4. Штамповка

Штамповка – способ изготовления сложных изделий давлением за один рабочий ход специального инструмента – штампа. Различают объемную и листовую штамповку, которую проводят в горячем и холодном состоянии. При объемной штамповке металл заготовки простой формы, деформируется и заполняет всю полость штампа. При листовой штамповке толщина полученных деталей незначительно отличается от исходной толщины листа (заготовки). Объемная штамповка чаще бывает горячей, листовая – холодной. Горячую листовую штамповку применяют при обработке давлением металлов, которые не обладают достаточной пластичностью в холодном состоянии, толстых (свыше 20 мм) листов из низкоуглеродистых сталей.

Горячая штамповка. Горячей объемной штамповкой в специальных штампах из заготовок получают штампованные поковки. *Штамп* – металлическая форма, внутренняя поверхность которой соответствует будущей детали, состоит обычно из двух частей, в которых имеются полости – *ручьи*. Одна часть штампа закрепляется на шаботе молота или плите прессы, другая – в подвижной их части.

При штамповке в открытых штампах (см. рис. 10.7,а) между частями штампа имеется зазор высотой h , в который вытекает избыток металла – *облой* (заусенец). Облой закрывает выход из полости штампа и заставляет металл заполнять всю форму.

При штамповке в закрытых штампах (рис. 10.7,б) зазор очень мал, облоя нет. Расход металла меньше, лучше структура металла, но масса заготовки должна отмеряться очень точно.

Различают штамповку в одноручьевых и многоручьевых штампах. Одноручьевые штампы имеют одну полость. В них штампуют изделия простой конфигурации. В многоручьевом штампе деформация происходит сначала в заготовительных (черновых) ручьях, в которых выполня-

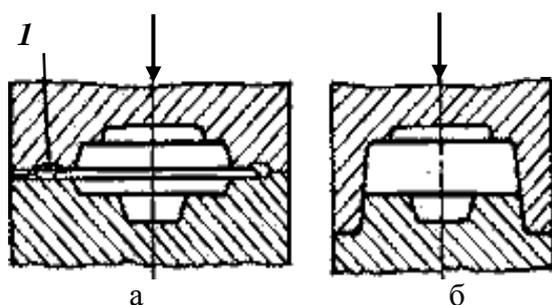


Рис. 10.7. Схемы штамповки:

а – в открытых штампах;
б – в закрытых штампах; 1 – облой

ются операции вытяжки или гибки, затем – в штамповочных (предварительных и окончательных) ручьях. Штампы изготавливают из легированного чугуна (для листовой штамповки) и специальных штамповых сталей, обладающих высокой твердостью, вязкостью, жаропрочностью. Оборудование для горячей штамповки – паровоздушные штамповочные молоты, гидравлические прессы.

Завершающие и отделочные операции: калибровка, термообработка, очистка, правка и чеканка.

Холодная штамповка имеет высокую производительность, низкую себестоимость, дает возможность получения простых и сложных деталей с высокой степенью точности и взаимозаменяемости. *Холодное выдавливание* – формирование сплошного или полого изделия за счет пластического течения металла из полости штампа через отверстие. Оно имеет много общего с прессованием и бывает прямое, обратное, комбинированное в зависимости от того через какое отверстие выдавливается металл. *Холодная высадка* – осадка части заготовки. Этим способом производят крепежные изделия. Холодная объемная штамповка производится аналогично горячей, но только в открытых штампах.

Разделительные операции холодной листовой штамповки. *Отрезка* – отделение части листа в штампах или на машинных ножницах. *Вырубка, пробивка* – отделение части листа по замкнутому контуру. В первом случае отделяемая внутренняя часть – деталь, во втором – отход.

Формообразующие операции. *Правка* – необходима для устранения неровностей и искривлений плоских деталей после вырубки, пробивки. *Вытяжка* – получение пустотелых, открытых с одной стороны деталей из плоской заготовки. *Гибка* – изменение кривизны заготовки. *Отбортовка* – получение горловины или бортов вокруг предварительно пробитых отверстий. *Обжим* – операция, при которой уменьшается диаметр концевой части полой заготовки. *Вальцовка* (рельефная формовка) – получение из листа заготовок труб, гофрированной (волнистой) поверхности, например, накатывание резьбы на цоколях электроламп.

Штамповка взрывом. Установленная на матрице листовая заготовка опускается в воду, затем в воде, над поверхностью заготовки производится взрыв. Под действием давления жидкости заготовка деформируется и принимает форму матрицы. Электрогидравлическая штамповка подобна штамповке взрывом, только ударная волна возникает при пропускании электрического разряда через жидкость.

Специализированные процессы обработки давлением. К таким процессам относятся: обкатывание, раскатывание и калибрование отверстий, накатывание рифлений, зубьев, резьбы и т. д. Обкатыванием и раскатыванием можно проводить упрочнение плоских, конических и цилиндрических, наружных и внутренних поверхностей деталей.

Калиброванием отверстий называют однократное или многократное перемещение инструмента имеющего размеры несколько больше чем отверстие. Инструмент – шарик, специальная прошивка. Происходит сглаживание неровностей и упрочнение поверхности.

Накатывание служит для получения внешних фасонных поверхностей при вдавливании инструмента в материал заготовки. Этим методом выполняют резьбы, клейма, рифления на поверхности и т. д.

11. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Несмотря на внедрение в машиностроение различных методов получения точных заготовок, обработка металлов резанием остается основным методом окончательной обработки деталей. Обработка металлов резанием – процесс срезания режущим инструментом слоя металла с заготовки в виде стружки для получения необходимой геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхностей детали. Слой металла, который надо удалить, называют *припуском на обработку*. Удаление припуска ручным способом называют *слесарной обработкой*, на станках – *механической обработкой*.

11.1. Основы резания металлов

Движения рабочих органов станков делятся на рабочие, установочные и вспомогательные. Рабочие движения сообщаются инструменту и заготовке для срезания слоя металла. Установочные – определяют положение инструмента и заготовки перед началом резания, вспомогательные – установка и снятие инструмента и заготовок. К рабочим относят главное движение резания и движение подачи, т. е. поступательные или вращательные движения заготовки и инструмента.

Главное движение резания D_r определяет скорость деформирования и отделения стружки, *движение подачи D_s* обеспечивает непрерывность процесса резания. Главное движение – одно, движений подачи может быть несколько. При точении главное движение резания – вращательное движение заготовки, резец совершает прямолинейное поступательное движение подачи (рис. 11.1,а).

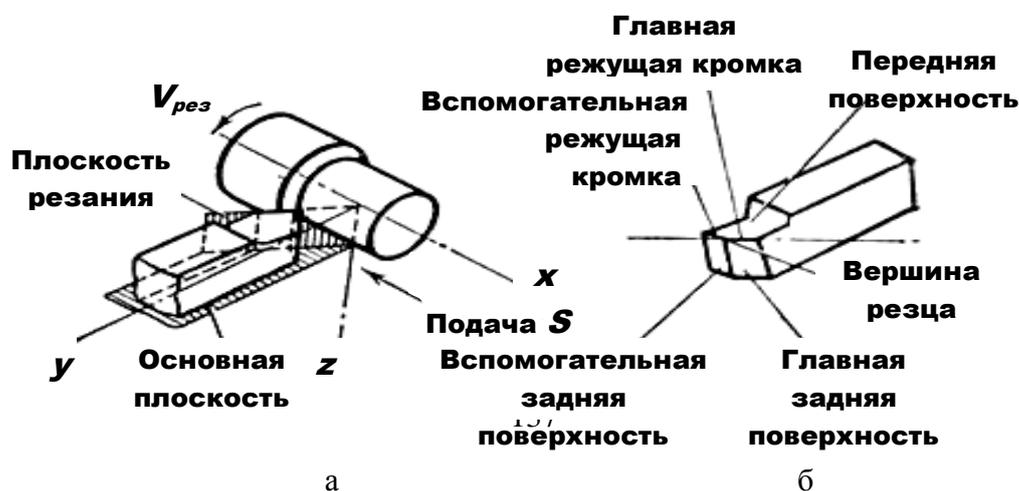


Рис. 11.1. Схема процесса резания (а) и элементы резца (б)

При любом методе механической обработки на детали различают три вида поверхностей: *обрабатываемая поверхность* – поверхность заготовки, которая частично или полностью удаляется при обработке; *обработанная поверхность* образуется в результате обработки; *поверхность резания* образуется режущей кромкой инструмента.

Токарный резец состоит из рабочей и крепежной частей. Основные элементы рабочей части показаны на рис. 11.1,б. Для определения углов режущей части инструмента вводится статическая система координат – прямоугольная система координат с началом на вершине режущей кромки. В эту систему входят координатные плоскости (рис. 11.2): *основная плоскость* P_v – проводится через вершину режущей кромки перпендикулярно направлению скорости главного движения резания;

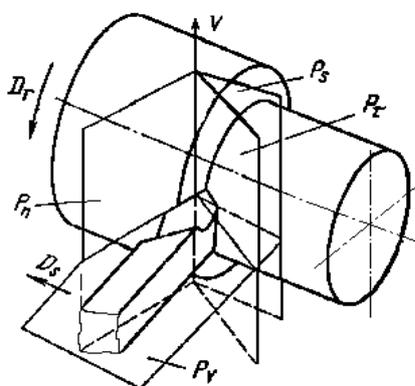


Рис. 11.2. Координатные плоскости при точении

пендикулярно направлению скорости главного движения резания; *плоскость резания* P_n – плоскость, касательная к режущей кромке и перпендикулярная основной плоскости; *главная секущая плоскость* P_r – перпендикулярна линии пересечения основной плоскости и плоскости резания; *рабочая плоскость* P_s образована взаимно перпендикулярными направлениями скоростей главного движения резания и движения подачи. В главной секущей плоскости P_r измеряют следующие углы (рис. 11.3). *Главный передний угол* γ – угол между передней поверхностью резца и основной плоскостью.

С увеличением угла γ уменьшается деформация срезаемого слоя, снижаются силы резания, повышается качество обработанной поверхности, но снижается прочность лезвия, ухудшается отвод тепла от режущей кромки. Обычно угол γ имеет значения от -10° до $+20^\circ$. *Главный задний угол* α – угол между главной задней поверхностью резца и плоскостью резания. Наличие угла α уменьшает трение между главной задней поверхностью инструмента и поверхностью резания и уменьшает износ инструмента.

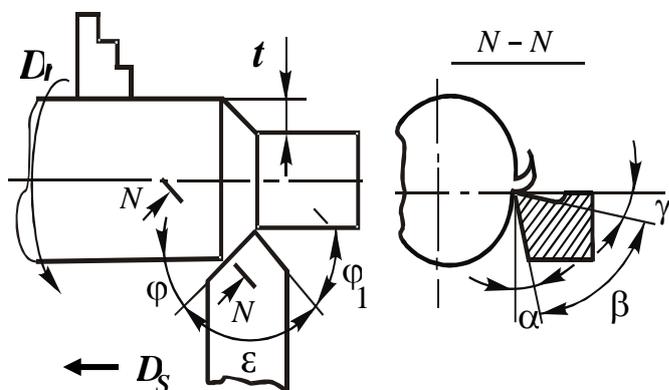


Рис. 11.3. Параметры токарного резца

Угол заострения β – угол между передней и задней поверхностями. *Главный угол в плане* φ – образуется проекцией главной ре-

жущей кромки на основную плоскость и направлением движения подачи, *вспомогательный угол в плане* φ_1 – образуется проекцией вспомогательной режущей кромки на эту же плоскость и направлением, противоположным движению подачи. *Угол в плане при вершине резца* ε – между проекциями режущих кромок на основную плоскость (угол заострения в плане).

Процесс образования стружки. Резец деформирует находящийся перед ним металл. Когда напряжение превышает силы внутреннего сцепления частиц металла, происходит сдвиг элемента стружки. При движении резца отделяются второй и последующие элементы стружки. Плоскость, по которой происходит скалывание отдельных элементов стружки, называют *плоскостью скалывания*, а угол между плоскостью скалывания и направлением скорости резания – *углом скалывания*. При обработке вязких металлов (мягкая сталь, медь, алюминий) этот угол ($30-35^\circ$) почти не зависит от геометрии резца и образуется *сливная стружка* в виде ленты, завивающейся в спираль. При обработке менее вязких металлов (стали повышенной прочности, некоторые марки латуни) образуется *стружка скалывания*: после образования нескольких витков она отламывается. *Стружка надлома* – совокупность отдельных частиц неправильной формы, получается при обработке хрупких металлов (чугун, бронза) и неметаллических материалов (мрамор, стекло).

Силы резания. Для отделения стружки режущий инструмент должен преодолеть силу сопротивления металла резанию, которая зависит от: усилий, возникающих при деформировании и отделении срезаемого слоя; силы трения стружки о переднюю поверхность режущего инструмента; силы трения поверхности резания на обрабатываемой детали о заднюю поверхность режущего инструмента.

Равнодействующая всех сил, действующих на режущий инструмент, называется *силой резания* P . С увеличением твердости, прочности

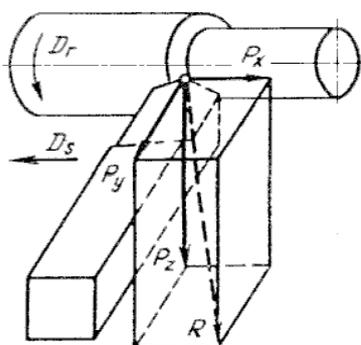


Рис. 11.4. Силы, действующие на резец

и вязкости обрабатываемого материала возрастает и сила резания. В зависимости от типа применяемых смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) сила резания уменьшится на 3-25 % по сравнению с работой всухую. Знание сил резания необходимо при расчете на прочность инструментов и приспособлений, определения необходимой мощности станка. Для удобства экспериментального определения силы резания, ее раскладывают на составляющие, выходящие из вершины резца (рис. 11.4). Касательная со-

ставляющая силы резания P_z действует в направлении скорости главного вращательного движения резания. Осевая составляющая силы резания P_x действует параллельно оси главного вращательного движения резания. Радиальная составляющая силы резания P_y направлена по радиусу главного вращательного движения резания.

Параметры режима резания. *Скорость главного движения резания* (V) – скорость перемещения точки режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой поверхности в направлении главного движения. Для вращательного движения *скорость резания* (V) (м/мин)

$$V = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3}.$$

Скорость движения подачи – скорость перемещения рассматриваемой точки режущей кромки в направлении движения подачи. *Подача* (S) – перемещение инструмента в направлении движения подачи за один оборот (мм/об).

Глубина резания (t) – расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, пройденное за один проход инструмента и измеренное перпендикулярно к последней (мм).

Выбор режима резания. Для каждого случая обработки существуют свои оптимальные режимы резания, которые зависят от материала обрабатываемой детали, материала инструмента и его геометрии, особенностей станка, требований к точности и качеству обработанной поверхности. В зависимости от материала детали выбирается и инструментальный материал. Существуют эмпирические формулы для расчета режимов резания. Практически режимы резания определяются по нормативным таблицам, приведенным в справочниках.

Образование нароста при резании. При резании пластичных металлов на передней поверхности инструмента скапливаются частицы обрабатываемого металла – образуется *нарост*. Металл прочно оседает на поверхности, когда силы трения между передней поверхностью инструмента и срезанным слоем металла становятся больше сил внутреннего сцепления материала стружки (рис. 11.5,а). Размеры и форма нароста постоянно меняются, нарост срывается и возникает вновь. Образование нароста полезно при черновой обработке, когда снимается большой слой металла и сила резания значительно возрастает. Нарост увеличивает угол заострения резца, при этом снижается сила резания и уменьшается износ инструмента. При чистовой обработке он вреден. Шероховатость обработанной поверхности увеличивается, точность обработки снижается, так как размеры нароста постоянно изменяются.

Упрочнение при резании. При обычных методах заточки режущая кромка имеет радиус закругления $\rho \approx 0,02$ мм (рис. 11.5,б). Инструмент срезает с заготовки стружку при условии, когда глубина резания больше

или соизмерима с радиусом ρ . В стружку переходит слой металла, лежащий выше линии среза CD .

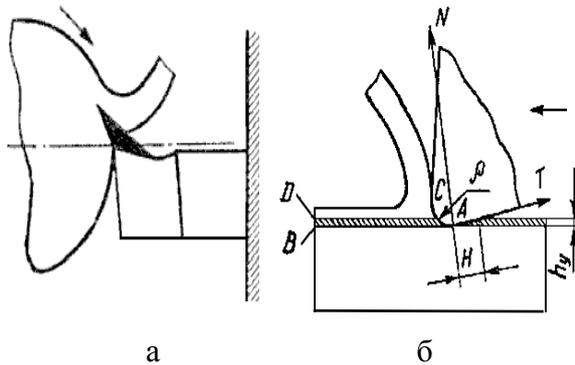


Рис. 11.5. Схемы: а – образования нароста; б – упрочнения при резании

Слой металла, лежащий между линиями AB и CD , будет упруго деформироваться. При работе режущая кромка затупляется и радиус возрастает. Расстояние между линиями AB и CD увеличивается, упругая деформация переходит в пластическую, на обработанной поверхности возникает наклеп. Упрочнение проявляется в повышении поверхностной твердости в 1,5-2 раза; глубина наклепанного слоя – 0,02-0,2 мм. Твердость, толщина упрочненного слоя зависят от способа обработки (максимальные – при сверлении), материала заготовки, геометрии инструмента, режима резания. При перемещении резца происходит упругое восстановление деформированного слоя на величину h_y , в результате образуется контактная площадка шириной H между обработанной поверхностью и задней поверхностью инструмента. Со стороны обработанной поверхности возникают силы нормального давления N и трения F . Чем больше упругая деформация, тем больше сила трения. Для уменьшения силы трения инструмента и предусматривается задний угол.

Износ и стойкость инструмента. Износ инструмента (рис. 11.6) происходит по передней поверхности (образуется лунка шириной b) или по главной задней поверхности (образуется ленточка износа шириной h). Образование ленточки износа уменьшает глубину резания, изменяет вылет резца – точность обработки снижается. Критерий износа – допустимая ширина ленточки износа h или лунки b . Для токарных резцов из быстрорежущей стали $h, b = 1,5-2$ мм, резцов с пластинами из твердого сплава $h, b = 0,8-1,5$ мм. Период стойкости инструмента (время работы между переточками) зависит от материала инструмента и заготовки,

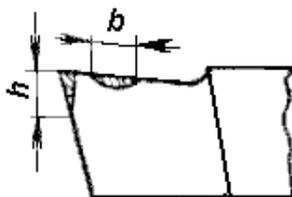


Рис. 11.6. Характер изнашивания резца

режима резания, геометрии инструмента, условий обработки. Нормативная стойкость токарных резцов – 30-90 мин., фрез – 6-8 час, абразивного инструмента – 1-80 мин. Износ инструмента вызывает рост силы резания, увеличивает деформацию заготовки и инструмента. Растет глубина наклепанного слоя на заготовке, увеличиваются силы трения и разогрев режущей кромки инструмента и обработанной поверхности.

11.2. Обработка на токарных станках

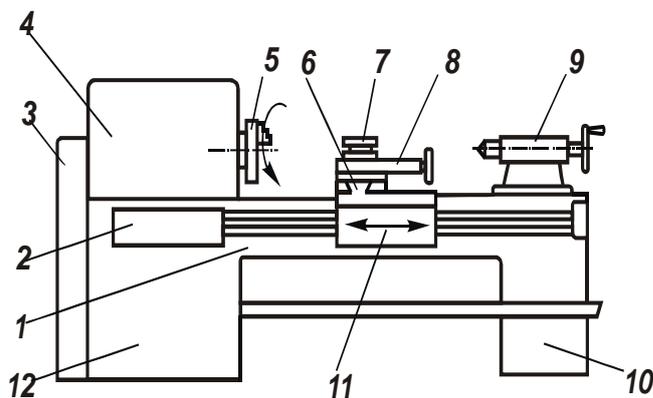


Рис. 11.7. Схема токарного станка

Схема токарно-винторезного станка представлена на рис. 11.7. Станина 1 закреплена на тумбах 10 и 12. На ней имеются направляющие для перемещения суппорта 6 и задней бабки 9 вдоль оси станка. В передней бабке 4 расположена коробка скоростей для изменения частоты вращения шпинделя с трехлачковым патроном 5 для закрепления заготовок. Гитара сменных колес 3 служит для передачи вращения от передней бабки к коробке подач 2. Последняя предназначена для изменения скорости продольных и поперечных подач суппорта 6, установки нужного шага при нарезании резьбы и передачи движения на ходовой винт, либо ходовой валик. Первый используется при нарезании резьбы резцом, второй – для операций точения. На продольном суппорте смонтирована поперечная каретка с верхним суппортом 8, на котором располагается четырехпозиционный резцедержатель 7. На фартуке 11 смонтирован механизм подачи для преобразования вращательного движения ходового валика в прямолинейное движение суппорта (продольное или поперечное). Задняя бабка служит второй опорой при обработке длинных деталей, используется для крепления и подачи инструмента при обработке отверстий сверлами, зенкерами, развертками и нарезании резьбы метчиками и плашками.

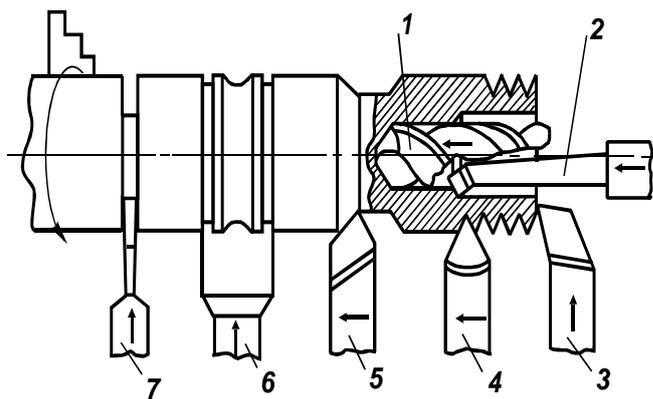


Рис. 11.8. Виды работ, выполняемых на токарных станках

На токарных станках производятся следующие работы (рис. 11.8). Обтачивание (обработка наружных цилиндрических поверхностей) выполняется проходными резцами 5, подрезание торца – подрезными 3, отрезание – отрезными 7. Сверление, зенкерование и развертывание отверстий производят соответствующими инструментами (например, сверлом 1). Растачивание внутренних цилиндрических поверхностей –

расточными резцами 2, фасонных поверхностей – фасонными 6. Обтачивание наружных конических поверхностей – широкими токарными резцами, поворотом каретки верхних салазок суппорта, смещением корпуса задней бабки в поперечном направлении или с помощью конусной линейки. Нарезание резьбы выполняют резьбовыми резцами 4, плашками и метчиками. Высота неровностей поверхности (шероховатость): черновое точение – 160-80 мкм; чистовое точение – 40-10 мкм; алмазное выглаживание – 1,2-0,6 мкм.

11.3. Обработка на сверлильных станках

Сверление – способ получения глухих и сквозных цилиндрических отверстий в сплошном материале заготовки. В качестве инструмента

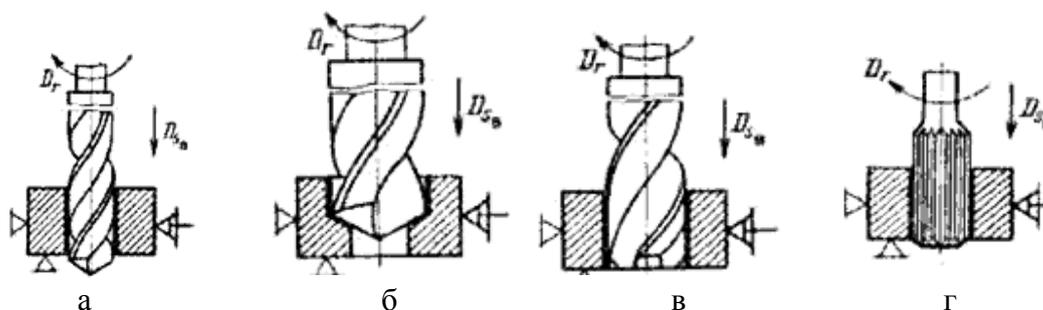


Рис. 11.9. Обработка отверстий на сверлильном станке:

а – сверление; б – рассверливание; в – зенкерование; г – развертывание

используется сверло, имеющее одну или две главные режущие кромки.

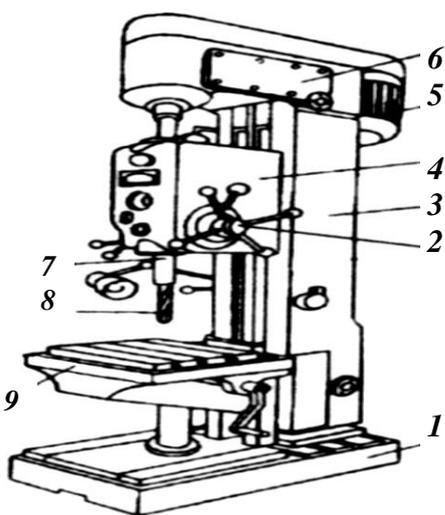


Рис. 11.10. Схема сверлильного станка

Для сверления отверстий диаметром 50–80 мм используют спиральные сверла (рис. 11.9,а). Диаметр отверстия увеличивают сверлом большего диаметра: операция *рассверливания* (рис. 11.9,б). Для получения отверстий высокой точности и чистоты поверхности после сверления выполняются операции *зенкерования* (рис. 11.9,в) и *развертывания* (рис. 11.9,г). *Зенкер* имеет жесткую рабочую часть, число режущих кромок не менее трех. *Развертка* – многолезвийный инструмент, срезающий очень тонкие слои с обрабатываемой поверхности.

Схема вертикально-сверлильного станка показана на рис. 11.10. На плите 1 смонтирована колонна 3. В ее

верхней части размещена шпиндельная головка 6, несущая электродвигатель 5 и шпиндель 7 с инструментом 8. На вертикальных направляющих колонны установлена шпиндельная бабка 4 с механизмом вертикальной автоматической подачи шпинделя, а также штурвал 2 для его ручного перемещения. Стол 9 закрепления заготовок можно устанавливать по высоте.

Радиально-сверлильные станки бывают стандартного типа, универсальные и широкоуниверсальные (переносные). Многошпиндельные сверлильные станки используются в массовом производстве. Алмазно-расточные станки предназначены для получения отверстий высокой точности, координатно-расточные – для обработки деталей имеющих большое количество отверстий с высокой точностью взаимного расположения и размерами.

11.4. Обработка на фрезерных станках

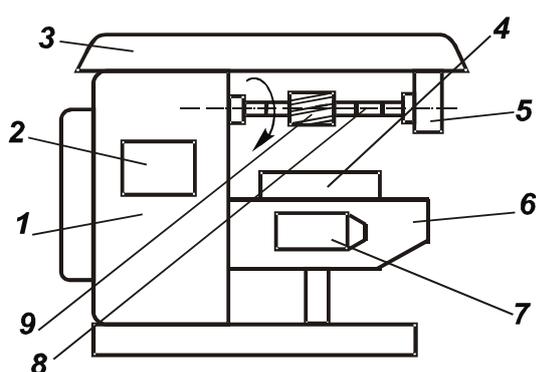


Рис. 11.11. Схема горизонтально-фрезерного станка

Фрезерование – способ формообразования деталей многолезвийным режущим инструментом – *фрезой*. Главное движение резания – вращение фрезы, движение подачи – перемещение заготовки – может быть поступательным или вращательным. Каждый зуб осуществляет резание в пределах определенного угла поворота фрезы, затем вращается вхолостую до следующего врезания. Особенность фрезерования – периодичность

и прерывистость процесса. Первые фрезы имели мелкие насеченные зубья и напоминали внешним видом землянику (*fraise*). Фрезы класси-

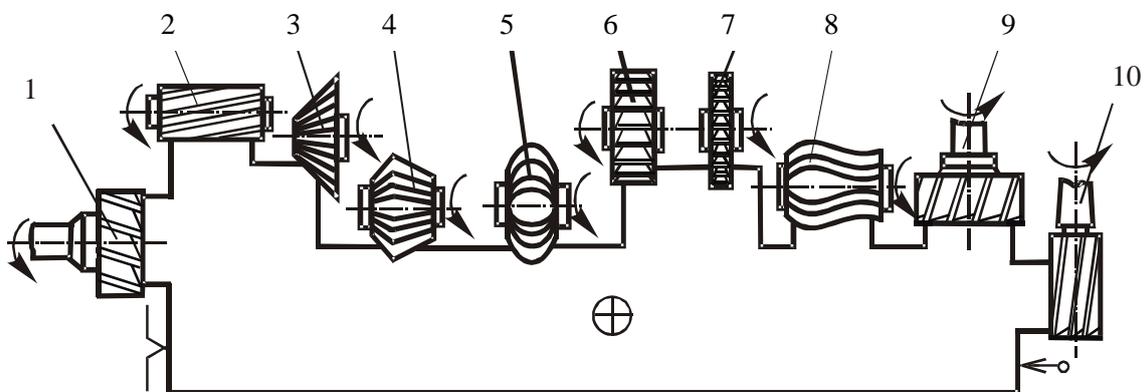


Рис. 11.12. Виды работ, выполняемых на фрезерном станке

фицируют: по назначению, форме зуба и его направлению, конструкции, методу крепления. По конструкции фрезы разделяют на цельные, напайные, наборные, со сменными зубьями (фрезерные головки).

В станине 1 станка размещена коробка скоростей 2 (рис. 11.11). По вертикальным направляющим станины перемещается консоль 6 с коробкой подач 7. Заготовка крепится на столе 4, который может перемещаться по трем координатам (в продольном, поперечном или вертикальном направлениях). На хоботе 3 закреплена подвеска 5, поддерживающая конец фрезерной оправки 8 с закрепленной фрезой 9.

На фрезерных станках выполняют следующие работы (рис. 11.12). Горизонтальные плоскости фрезеруют цилиндрическими фрезами 2; вертикальные – торцевыми 1; наклонные плоскости и скосы – одноугловыми фрезами 3; угловые и фасонные пазы – двухугловыми 4 и фасонными 5 дисковыми фрезами; уступы и прямоугольные пазы – дисковыми фрезами 6 и 7; фасонные поверхности – фасонными фрезами 8.

Аналогичные работы выполняют на вертикально-фрезерных станках торцевыми 9 и концевыми 10 фрезами.

11.5. Обработка на строгальных и долбежных станках

Строгальные и долбежные станки применяют в основном для тех же работ, что и фрезерные станки, т. е. для обработки плоскостей, различного вида пазов и фасонных линейчатых поверхностей. Движение резания – возвратно-поступательное движение инструмента. На строгальных станках выполняются следующие работы: строгание горизонтальных, вертикальных, наклонных плоскостей проходными и подрезными резцами (рис. 11.13,а). Разрезные и прорезные работы отрезными резцами (рис. 11.13,б). Строгание тавровых пазов (рис. 11.13,в) и пазов типа «ласточкин хвост» (рис. 11.13,г) – пазовыми резцами соответствующими.

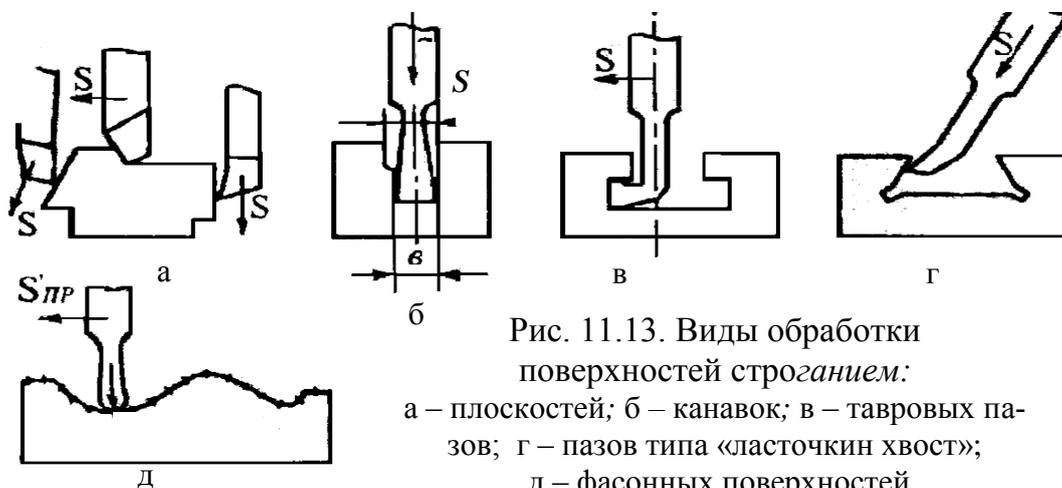


Рис. 11.13. Виды обработки поверхностей строганием:

а – плоскостей; б – канавок; в – тавровых пазов; г – пазов типа «ласточкин хвост»; д – фасонных поверхностей

ющей конфигурации. Стругание фасонных поверхностей – фасонными или галтельными резцами по разметке (рис. 11.13,д)

В поперечно-строгальных станках (рис. 11.14) возвратно-

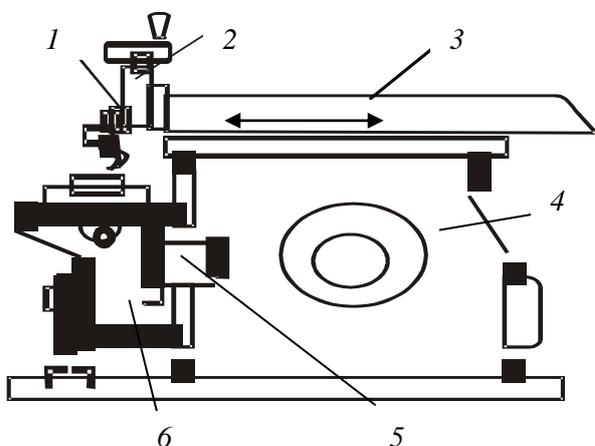


Рис. 11.14. Схема строгального стан-

установлена траверса 5, по которой в горизонтальной плоскости перемещается стол 6, выполняя движение подачи.

Продольно-строгальные станки служат для обработки крупногабаритных деталей. Движение резания совершает стол с установленной деталью, перемещающийся возвратно-поступательно, движение подачи выполняется поперечным суппортом с закрепленными на нем резцами.

В процессе *долбления* долбежный резец (долбляк) совершает возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости, обрабатываемая заготовка совершает движение подачи. Долблением обрабатывают глухие и сквозные фасонные отверстия, внутренние направляющие и шпоночные пазы, шлицевые (многошпоночные) отверстия. Операция долбления малопроизводительна, применяется в единичном, мелкосерийном производстве.

11.6. Обработка на шлифовальных и отделочных станках

Абразивный круг состоит из большого количества твердых абразивных зерен с острыми гранями и связанных между собой специальной связкой. Шлифовальный круг можно рассматривать как фрезу со множеством мелких, произвольно ориентированных зубьев. Особенностью абразивных кругов является способность к самозатачиванию: затупившиеся зерна выкрашиваются, в работу вступают новые зерна. Шлифование применяется для окончательной (чистовой) обработки деталей.

Абразивные инструменты. К ним относят шлифовальные круги, бруски, шлифовальные головки, шкурки, порошки и пасты. Абразивные

шлифовальные круги различают по абразивным материалам, связке, зернистости, твердости, структуре, форме.

Абразивные материалы – неметаллические вещества, которые применяют для обработки конструкционных материалов. Они делятся на *природные* материалы – (алмаз, корунд, кварц) и *искусственные* материалы – (синтетические алмазы, электрокорунд, карбид кремния). По размеру абразивные материалы делят на шлифзерно, шлифпорошки, микропорошки и тонкие микропорошки. Зернистость шлифпорошков определяют в сотых долях миллиметра, микропорошков – в микрометрах. Чем меньше должна быть шероховатость поверхности после обработки, тем более мелкозернистым должен быть шлифовальный круг.

Связка должна прочно удерживать зерна в круге и обеспечивать вырывание затупившихся зерен, иначе круг будет *засаливаться* (затупляться). Неорганическая связка бывает керамической, силикатной. Керамическую связку получают из глины, полевого шпата и талька. Она отличается высокой тепловой и химической стойкостью, обеспечивает высокую производительность при шлифовании и широко применяется.

К органической связке относят: вулканитовую, бакелитовую и шеллаковую. Вулканитовые связки получают из каучука и серы при нагревании до 170 °С. Круги на вулканитовой связке отличаются высокой упругостью и изготавливаются толщиной до 1,5 мм. Бакелитовую связку получают из фенолальдегидных смол при соединении фенола с формалином. Она менее упругая, чем вулканитовая, но дешевле. Эбонитовая связка состоит из 43 % каучука, 30 % серы и других добавок. Если связка прочно удерживает зерна, то круг считается твердым.

Структура круга определяется его пористостью. Поры являются приемниками стружки и составляют до 50 % объема круга.

Главное движение при шлифовании – вращение шлифовального круга, перемещение круга относительно детали – движение подачи. Схемы шлифования: плоское, круглое, внутреннее. Плоское шлифование осуществляется периферией или торцом вращающегося круга, заготовка совершает возвратно-поступательное движение.

Круглошлифовальные станки предназначены для обработки наружных цилиндрических, конических и торцевых поверхностей. При круглом шлифовании, помимо возвратно-поступательного, заготовке придается вращательное движение.

Отделочные станки предназначены для окончательной обработки деталей с целью достижения высокой точности размеров или малой шероховатости поверхности. Их разделяют на полировальные, притирочные, хонинговальные и суперфинишные.

11.7. Точность и качество поверхности при обработке

Точность детали характеризуется точностью размеров, формы и взаимного расположения поверхностей. *Качество поверхности* определяется ее шероховатостью, величиной наклепа и остаточных напряжений в поверхностном слое. Степень шероховатости обработанной поверхности определяется схемой процесса резания, т. е. схемой взаимодействия детали и инструмента, геометрией инструмента и режимами обработки. Физическое состояние поверхностного слоя (степень наклепа, остаточные напряжения) зависит от геометрии инструмента, режимов и условий резания.

Точность обработки деталей резанием зависит от технических характеристик станка, состояния, настройки, качества технологической оснастки и режущего инструмента, квалификации оператора, качества смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), рациональности режимов резания, состояния заготовок. Наибольшее влияние на точность обработки оказывают силы резания, которые вызывают упругую деформации системы СПИД (станок–приспособление–инструмент–деталь) и тем самым создают погрешности обработки. Величина погрешностей возрастает пропорционально силам резания.

Формирование микронеровностей на обработанной поверхности. На шероховатость поверхности влияют разные факторы. К *геометрическим* относят: параметры инструмента (см. рис. 11.3 и рис. 11.5) углы в плане φ и φ_1 , радиус при вершине ρ и шероховатость режущих кромок, величину подачи S . Это установочные параметры, необходимые для теоретического расчета высоты микронеровностей R_z . Наибольшее отклонение фактической высоты микронеровностей от расчетной (геометрической) связано с явлением наростообразования при резании.

При отсутствии нароста приращение R_z определяется *физическими факторами*: пластическим течением металла в направлении вершины микронеровности (пропорционально степени пластической деформации металла в зоне стружкообразования); упругим восстановлением поверхностного слоя; трением между задней поверхностью инструмента и поверхностью резания.

Для снижения высоты микронеровностей необходимо: уменьшать углы резца φ и φ_1 , подачу S ; увеличивать радиус при вершине ρ и снижать физические факторы. Для этого следует работать на режимах, исключая образование нароста, снижать степень деформации металла при резании, увеличивать до возможных значений передний угол инструмента, обрабатывать материал в более твердом состоянии, применять эффективные смазки и подбирать материал режущей части ин-

струмента, обладающий пониженной адгезионной активностью по отношению к обрабатываемому материалу.

Наклеп и остаточные напряжения при обработке резанием.

Зона пластической деформации распространяется при любых режимах резания ниже линии среза (см. рис. 11.5). Материал в поверхностном слое оказывается наклепанным (упрочненным). Глубина и степень наклепа зависят от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента, режимов резания и применяемой СОЖ.

При движении инструмента по обработанной поверхности возникает пластическое растяжение поверхностных слоев в направлении линии среза. Слои, лежащие ниже, деформируются упруго и после прохода инструмента стремятся возвратиться в исходное состояние – сжаться. В поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия.

Под действием теплоты, идущей в деталь, верхние слои растягиваются, нижние холодные слои оказывают сопротивление. Это создает дополнительные остаточные напряжения сжатия.

Результирующая эпюра остаточных напряжений зависит от интенсивности действия механического и теплового факторов. Например, интенсивный нагрев может уменьшить напряжения сжатия, возникшие от механического воздействия. При шлифовании стальных деталей поверхностный слой нагревается до высоких температур, происходят структурные преобразования. Превращения, связанные с увеличением объема структурных составляющих, могут вызвать появление остаточных напряжений сжатия, при уменьшении объема – остаточных напряжений растяжения.

С увеличением скорости резания или уменьшении угла резания остаточные напряжения уменьшаются и могут изменить свой знак. Увеличение подачи, глубины резания и износ инструмента приводит к увеличению остаточных напряжений. Сжимающие остаточные напряжения повышают износостойкость деталей машин, усталостную прочность и их коррозионную устойчивость. Растягивающие остаточные напряжения приводят к снижению циклической прочности и появлению трещин на поверхности деталей.

Остаточные напряжения первого вида уравниваются между большими объемами деформируемого тела. Они вызывают коробление и изменения формы изделия. *Остаточные напряжения второго вида* уравниваются в объеме нескольких зерен. Они приводят к трещинообразованию. *Остаточные напряжения третьего вида* уравниваются внутри каждого зерна. Они связаны с изменением расположения атомов в кристаллической решетке.

12. СВАРКА, РЕЗКА И ПАЙКА

Сварка – технологический процесс получения неразъемных соединений различных материалов. Физическая сущность заключается в образовании связей между атомами соединяемых заготовок. Для возникновения связей необходимо: во-первых, сблизить соединяемые поверхности на малое расстояние (порядка параметра кристаллической решетки); во-вторых, чтобы поверхностные атомы заготовок были достаточно активны (ослаблены их связи с атомами заготовки, разорваны связи с атомами внешней среды). Активизация состояния поверхности требует затрат энергии – тепловой (нагрева), механической (пластической деформации), радиации (облучения). Атомы на поверхности заготовок при взаимодействии образуют общую кристаллическую решетку – сварной шов. При термических методах сварки происходит плавление кромок заготовок (электродуговой, электрошлаковой, газовой, электронно-лучевой, плазменной, термитной, лазерной и др.). При механических методах соединение заготовок происходит путем пластической деформации соединяемых поверхностей при приложении внешних сил (трением, взрывом, холодной, ультразвуковой и др.). При термомеханических методах одновременно с приложением давления материал в зоне соединения нагревают для снижения сопротивления деформации и повышения пластичности (контактной, диффузионной, газопрессовой и др.). Термический класс сварки называют сваркой плавлением, а термомеханический и механический – сваркой давлением.

12.1. Сварка металлов плавлением

Дуговая сварка. Источник тепла – электрическая дуга. Дуга зажигается между двумя электродами, температура – 6000 - 8000 ° С. Под

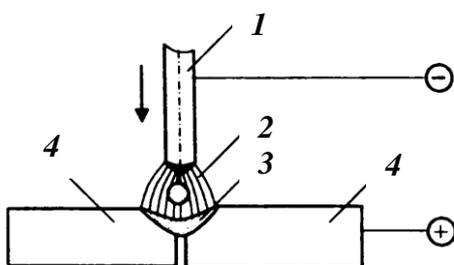


Рис. 12.1. Схема дуговой сварки плавящимся электродом: 1 – электрод; 2 – электрическая дуга; 3 – сварочная ванна; 4 – соединяемые детали

действием тепла дуги кромки деталей оплавляются, образуется сварочная ванна (рис. 12.1). При перемещении дуги вдоль кромок деталей сварочная ванна затвердевает и образуется сварной шов, соединяющий детали. Если одним из электродов является свариваемое изделие, то дуга называется *дугой прямого действия*. Сварку производят на постоянном и переменном токах. При применении постоянного тока различают сварку на прямой и обратной полярно-

сти. Сварку производят неплавящимся (графитовым, вольфрамовым) и плавящимся (металлическим) электродами.

Ручная дуговая сварка выполняется сварочными электродами, которые вручную перемещают вдоль заготовки. Неплавящиеся электроды применяют для сварки цветных металлов, наплавки твердых сплавов, сварки деталей малой толщины на постоянном токе. Наибольшее применение имеет сварка плавящимся электродом с покрытием (рис. 12.2). Электрическая дуга 8 горит между металлическим стержнем 7 электрода и металлом заготовки 1. Расплавленный металл электрода каплями стекает в металлическую ванну 9. При плавлении покрытия электрода 6 образуется ионизированная газовая атмосфера 5, стабилизирующая горение дуги, и шлаковая ванна 4 на поверхности металла. Металлическая и шлаковая ванны образуют сварочную ванну. По мере

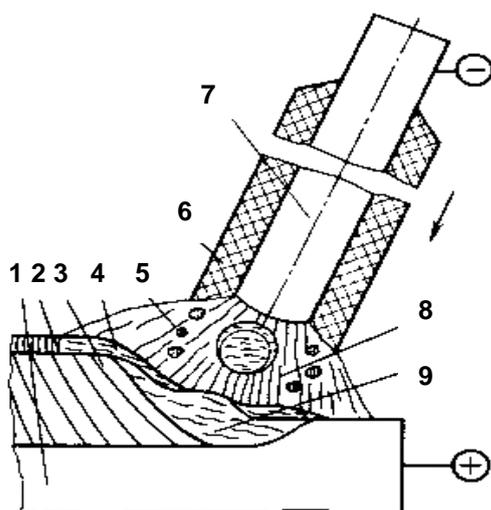


Рис. 12.2. Схема сварки покрытым электродом

движения электрода сварочная ванна затвердевает и формируется сварной шов 3, на поверхности которого легкий шлак образует защитную корку 2. Метод применяется для сварки коротких, прерывистых швов и швов сложной конфигурации в труднодоступных местах в любом положении: нижнем, вертикальном, горизонтальном, потолочном.

Автоматическая дуговая сварка под слоем флюса. В канавку на

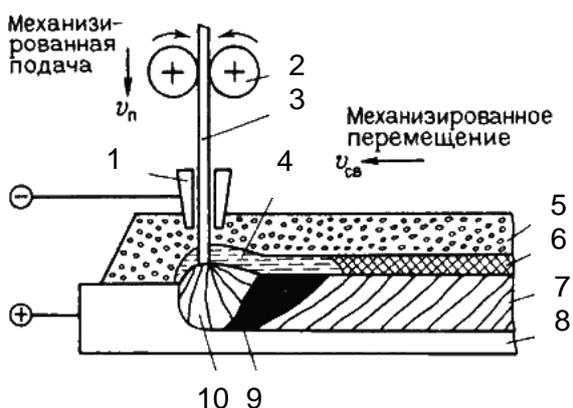


Рис. 12.3. Схема автоматической дуговой сварки под слоем флюса

стыке двух свариваемых заготовок насыпается гранулированный флюс. Механизированная сварочная головка 2 подает в зону сварки электродную проволоку 3 без покрытия, ток подводится через токопровод 1 (рис. 12.3). Электрическая дуга 10 горит между проволокой 3 и металлом 8. Столб дуги и ванна жидкого металла 9 закрыты слоем флюса 5 толщиной 30-50 мм. Часть флюса плавится, образуя жидкий шлак 4 на поверхности

металла. При перемещении электрода металлическая и шлаковая ванны затвердевают с образованием сварного шва 7, покрытого шлаковой кор-

кой 6. Для сварки под флюсом характерно глубокое проплавление металла. Сварка производится со скоростью 6-30 м/ч. Повышение производительности достигается за счет использования больших сварочных токов (до 2000 А) и непрерывности процесса.

Флюсы. Флюсы для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей предназначены для раскисления шва и легирования его марганцем и кремнием. Применяют высококремнистые марганцевые флюсы, которые получают путем сплавления марганцевой руды, кремнезема и плавикового шпата в электропечах. Флюсы для сварки легированных и высоколегированных сталей должны обеспечивать минимальное окисление легирующих элементов в шве. Применяют керамические низкокремнистые, безкремнистые и фторидные флюсы, которые изготавливают из порошкообразных компонентов путем замеса их на жидком стекле, гранулирования и последующего прокаливания. Основу керамических флюсов составляют мрамор, плавиковый шпат и хлориды щелочноземельных металлов.

Дуговая сварка в защитных газах. Расплавленный металл от взаимодействия с воздухом защищен струей инертного (аргон, неон) или активного газа (углекислый газ). Для экономии дорогостоящих инертных газов при сварке создают комбинированную защиту.

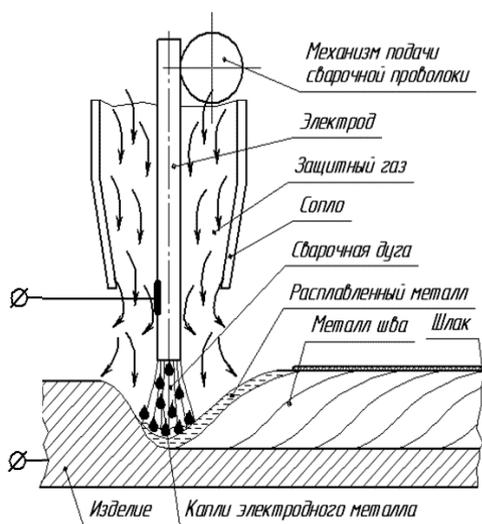


Рис. 12.4. Схема дуговой сварки в защитных газах

Сварка в инертных газах выполняется неплавящимся (графит, вольфрам) и плавящимся (рис. 12.4) электродами. Неплавящийся электрод применяется при сварке заготовок толщиной 0,2-6 мм. При необходимости, для усиления шва в зону сварки подается сварочная проволока. Аргонодуговую сварку применяют почти для всех металлов и сплавов, в том числе таких химически активных, как титан, алюминий, магний, бериллий, цирконий и их сплавы.

Сварка в углекислом газе выполняется только плавящимся электродом на постоянном токе обратной полярности, т. к. на переменном токе из-за сильного охлаждения столба дуги защитным газом, дуга может прерываться. Для защиты жидкого металла от окисления (восстановления окислов железа) используют проволоку с повышенным содержанием раскислителей – марганца и кремния. Применяется для сварки низко-

углеродистых, низколегированных и некоторых высоколегированных сталей. Преимущество – низкая стоимость защитного углекислого газа.

Электрошлаковая сварка. Свариваемые заготовки 1 устанавливают в вертикальном положении (рис. 12.5). В зазор между заготовками и охлаждаемыми медными ползунами 4 засыпают флюс слоем 50-70 мм.

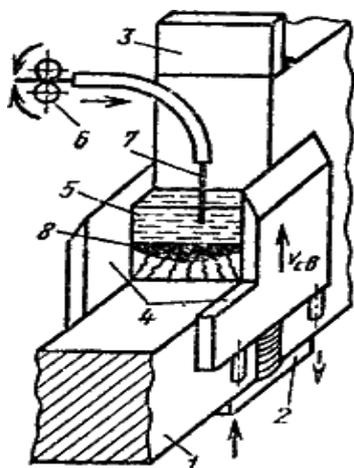


Рис. 12.5. Схема электрошлаковой сварки

Первоначально электрическая дуга горит между проволокой 7 и планкой 2. Флюс расплавляется и образует между свариваемыми заготовками шлаковую ванну 5. Дуга шунтируется толстым слоем жидкого шлака и гаснет, но подача проволоки и тока продолжают. Расплавленный шлак является электролитом, при пропускании через него тока выделяется много тепла и температура в шлаковой ванне повышается до 2000 °С. Боковые поверхности свариваемых заготовок оплавляются. Одновременно плавится электродная проволока 7, которая непрерывно подается с помощью механизма подачи 6. Расплав каплями стекает через шлаковую ванну вниз, и образует металлическую ванну 8. При ее затвердевании образуется сварной шов. В начале шва образуется непровар кромок, в конце – усадочная раковина. Поэтому сварку начинают и заканчивают на специальных планках 2 и 3, которые затем удаляют газовой резкой. Благодаря медленному охлаждению из металла удаляются газы и неметаллические включения, но образуется крупное зерно в шве и около него. Необходима термическая обработка для его измельчения. Сваривают: стали разных марок, сплавы алюминия, магния и титана.

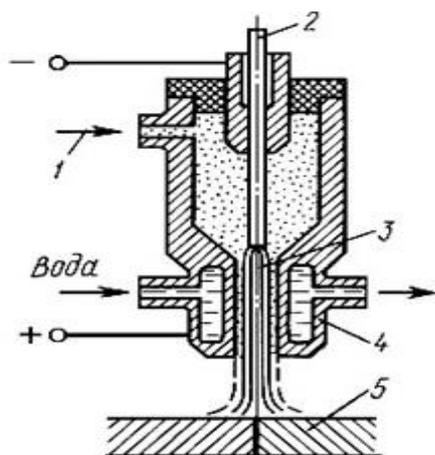


Рис. 12.6. Схема плазменной сварки

Толщина стыков достигает 2000 мм. Электрошлаковая сварка широко применяется в тяжелом машиностроении для изготовления различных крупногабаритных конструкций: станин и деталей мощных прессов и станков, элементов атомных реакторов, коленчатых валов судовых дизелей и т. п.

Плазменная сварка или сварка сжатой дугой является разновидностью дуговой сварки. Источник тепла для нагрева и плавления металла – *плазма* – направленный поток электрически нейтральных (молекул газа) и заряженных частиц

Толщина стыков достигает 2000 мм. Электрошлаковая сварка широко применяется в тяжелом машиностроении для изготовления различных крупногабаритных конструкций: станин и деталей мощных прессов и станков, элементов атомных реакторов, коленчатых валов судовых дизелей и т. п.

(электроны, ионы). Плазму получают в горелках при пропускании холодного газа через электрическую дугу, которая сжимается за счет возрастания плотности тока в ее центральной части (рис. 12.6). Общий ток дуги не меняется, но температура дуги увеличивается до 20000 °С. Газы образующие плазму – азот, аргон, гелий и др. Через горелку также подается дополнительный газ, обеспечивающий защиту зоны плавки от контакта с воздухом. Струей высокотемпературной плазмы производят сварку, резку, пайку, напыление, термообработку различных материалов и сплавов, обработку неметаллических материалов (керамики, стекла). Микроплазменной дугой (сила тока 0,1-15А) сваривают листы толщиной 0,025-0,8 мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, титана, тантала, молибдена, вольфрама, золота и др. Недостаток плазменной сварки – недолговечность горелок.

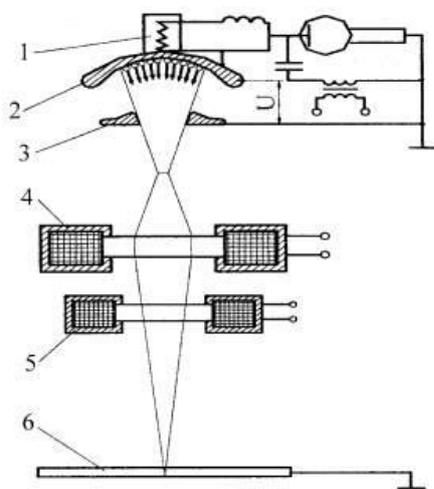


Рис. 12.7. Схема ЭЛС

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Свариваемые заготовки собираются без зазора и помещаются в камеру, в которой создается высокий вакуум порядка 10^{-1} Па. Место контакта заготовок облучают пучком электронов, ускоренных электрическим полем. При соударении электроны тормозятся, кинетическая энергия преобразуется в тепловую – в месте соударения температура достигает 6000 °С. Этого достаточно для плавления любых металлов при сварке или тепловой обработке (резке, сверлении, испарении).

Вольфрамовый катод 1 (рис. 12.7), размещенный в фокусирующей головке 2, излучает поток электронов. Под действием высокого напряжения (~30 кВ) между катодом и ускоряющим анодом 3 электроны приобретают значительную кинетическую энергию. Электроны имеют одинаковый заряд и отталкиваются друг от друга, диаметр пучка увеличивается, плотность энергии уменьшается. Для увеличения плотности энергии магнитной линзой 4 поток электронов фокусируется, магнитной отклоняющей системой 5 точно направляется на свариваемые кромки 6.

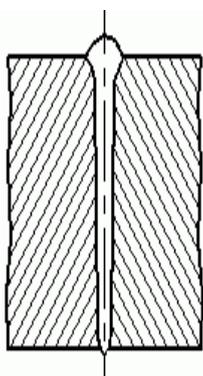


Рис. 12.8. Форма сварного шва при ЭЛС

При сварке электронным пучком формируется узкий и глубокий шов. Глубина проплавления достигает 200-400 мм с большим соотношением глубины проплавления к сред-

ней ширине шва (рис.12.8). Проплавление называется *кинжальным*. Глубокое проникновение электронов в металл объясняется образованием канала в сварочной ванне на всю ее глубину. Основным фактором, вызывающим образование канала в жидком металле, является давление отдачи паров металла при испарении. Поэтому канал называют *пародинамическим*. Глубокое проплавление металла обеспечивает большую скорость отвода тепла от зоны сварки, вследствие этого – увеличение скорости кристаллизации сварочной ванны с получением мелкокристаллического строения металла шва, по своим свойствам не отличающегося от основного металла.

Электронный луч легко управляется и позволяет с высокой точностью регулировать температуру. Сварной шов отличается высокой прочностью и чистотой. Применяют для сварки тугоплавких, химически активных металлов и их сплавов (вольфрам, тантал, молибден), высоколегированных сталей. Толщина заготовок – от 0,02 до 200 мм.

Лазерная сварка. Источник тепла – мощное, монохроматическое излучение лазера импульсного или непрерывного действия. Способ применяется при сварке цветных металлов, высокоуглеродистых и низколегированных сталей. Недостаток – низкий коэффициент преобразования светового излучения в тепловое (менее 10 %).

Установка для лазерной сварки (рис. 12.9) состоит из рабочего тела 1, лампы накачки 2, обеспечивающей возбуждение атомов активного вещества – излучателя. Излучение фокусируется и направляется на свариваемое изделие 3.

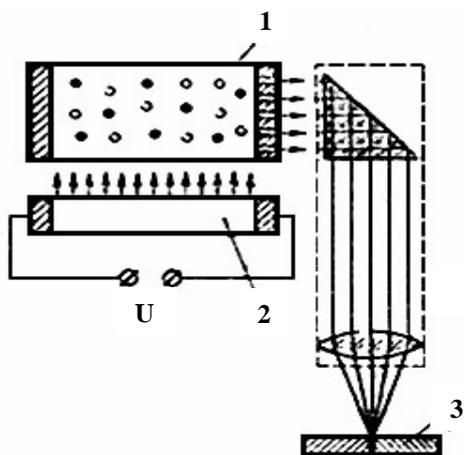


Рис. 12.9. Схема лазерной сварки

В фокусе луча лазера (пятно диаметром $\sim 0,1$ мм, плотность энергии 10^{10} Вт/см²) температура достигает 10^5 °С. Распространена лазерная сварка в электронной и электротехнической промышленности где выполняют соединения тонкостенных деталей: угловые, стыковые и внахлест. Объем сварочной ванны небольшой, мала ширина зоны термического влияния, высоки скорости нагрева и охлаждения.

Хорошее качество соединений обеспечивается при сварке тонких деталей (0,05-0,5 мм) с массивными. Форма сварочной ванны при лазерной сварке деталей толщиной более 1,0 мм с глубоким проплавлением (см. рис. 12.10) отличается от ее формы при дуговой сварке. При плотности мощности лазерного излучения равной критической, скорость нагрева металла превышает скорость теплоотвода. На поверхно-

сти жидкого металла образуется углубление. Увеличиваясь, оно образует канал, заполненный паром и окруженный жидким металлом. Давления пара оказывается большим и полость канала не заполняется жидким металлом. Наличие паров в канале способствует поглощению лазерного излучения в глубине свариваемого материала, а не только на поверхности. Формируется *кинжальное проплавление* – узкий шов с большим соотношением глубины проплавления к ширине шва. При образовании кратера над поверхностью металла появляется светящийся факел, состоящий из продуктов испарения – мелких выбрасываемых из ванны капель металла и частиц конденсированного пара.

Форма сварочной ванны вытянута в направлении сварки. В головной части ванны расположен парогазовый канал (кратер). На передней стенке канала происходит плавление металла, на задней – затвердевание.

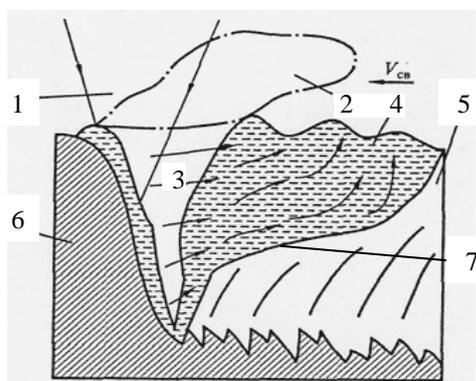
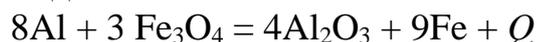


Рис. 12.10. Схема сварочной ванны: 1 - лазерный луч; 2 - плазменный факел; 3 - парогазовый канал; 4 - хвостовая часть ванны; 5 - металл шва; 6 - свариваемый металл; 7 - выступ

По боковым стенкам расплавленный металл из головной части ванны переносится в хвостовую часть, потоками поднимается вверх, частично выносится на поверхность сварочной ванны. На поверхности фронта кристаллизации имеется выступ, который делит ванну на две части. Нижняя часть значительно заглублена и имеет малую протяженность в поперечном сечении, тогда как верхняя часть более широкая и вытянута вдоль шва (см. рис. 12.10). Сварку с глубоким проплавлением ведут с защитой шва газом, состав которого подбирают в зависимости от свариваемого материала.

Термитная сварка. Нагрев и оплавление заготовок происходят за счет теплоты горящего термита – порошкообразной смеси из металлов и оксидов металлов. Обычно используется алюминиевый термит: 22 % алюминия и 78 % железной окалины (Fe_2O_3 и Fe_3O_4). Горение алюминия в окалине протекает с выделением большого количества тепла:



Температура достигает $3000\text{ }^\circ\text{C}$. Расплавленный металл затекает в свариваемый стык и образуется сварное соединение. Алюминиевый термит применяется ограниченно (дефицит алюминия) в основном для сварки рельсовых стыков трамвайных путей, магниевый термит – для сварки стальных проводов связи.

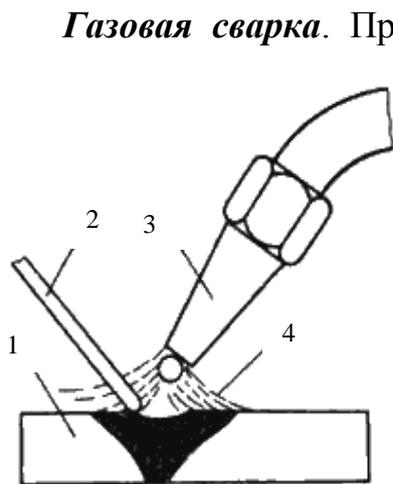


Рис. 12.11. Схема газовой сварки

Газовая сварка. При нагревании пламенем 4 газовой горелки 3 кромки заготовок 1 и присадочный материал 2 расплавляются (рис. 12.11). Выполняют такие же виды сварных соединений, как и электродуговой сваркой. Нагрев и охлаждение заготовки происходит плавно.

Тепло образуется при сгорании горючих газов в атмосфере технического кислорода. Природный газ, водород, пары бензина или керосина применяются для кислородной резки, не требующей высокой температуры пламени. Для газовой сварки используют ацетилен (C_2H_2), дающий при сгорании температуру до $3300\text{ }^\circ\text{C}$.

12.2. Сварка металлов давлением

При всех способах сварки давлением происходит пластическая деформация в зоне соединения деталей. Пластически деформировать металл можно с нагревом и без него. Место соединения нагревают до расплавления или до пластичного состояния.

Контактная сварка. Свариваемые заготовки нагреваются проходящим электрическим током небольшого напряжения (3-10 В), но большой плотности (десятки кА на 1 см^2). Место стыка обладает большим сопротивлением для прохождения тока (неровности поверхности, окисная пленка), здесь выделяется максимальное количество тепла. При достижении необходимой температуры прикладывается давление. Контактную сварку делят на стыковую, точечную, шовную.

При *стыковой сварке* соединение заготовок происходит по всей поверхности их соприкосновения. Заготовки 1 зажимают в колодках (зажимах) 2, подключенных к вторичной обмотке 3 сварочного трансформатора (рис. 12.12,а). Включается ток, в месте стыка торцы нагреваются. После отключения тока производится сдавливание нагретых заготовок – осадка. Заготовки свариваются. Прочность шва не уступает прочности основного металла. Сварка применяется для соединения ответственных деталей типа стержней, толстостенных труб, рельсов.

При *стыковой сварке сопротивлением* торцовые поверхности заготовок выравниваются, заготовки соединяются. Включается ток, нагрев ведется до пластичного состояния металла. Способ *стыковой сварки оплавлением* не требует предварительной обработки торцов. Подается

напряжение, заготовки соединяются. Неровности поверхности торцов оплавляются и выдавливаются на край шва.

Точечная сварка. Изделия свариваются в отдельных точках. Заготовки собирают внахлест и сжимают между медными электродами, подключенными к трансформатору (рис. 12.12,б). Соприкасающиеся с медными электродами поверхности свариваемых заготовок нагреваются более медленно (до пластичного состояния), чем внутренние поверхности (до расплавления). После выключения тока и снятия давления образуется литая сварная точка. Прочность сварного соединения высокая. Способ применяют в массовом производстве: сварка кузовов легковых автомобилей, сборка электрических схем.

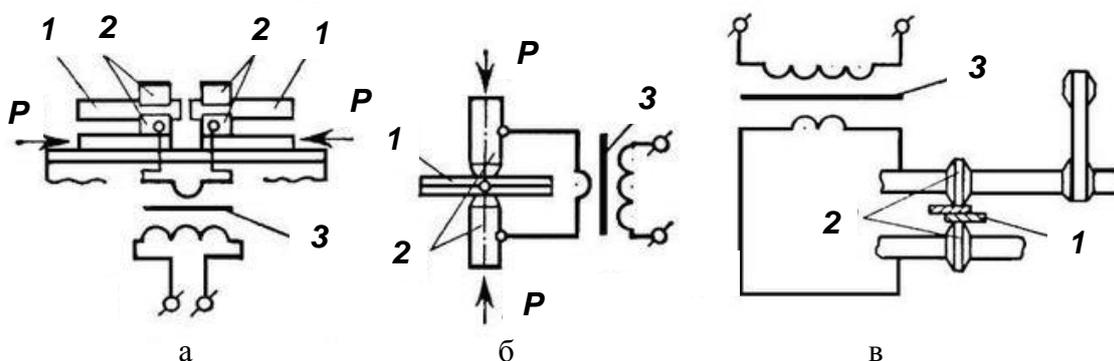


Рис. 12.12. Схемы сварки: а – стыковой; б – точечной; в – шовной; 1 – свариваемое изделие; 2 – электроды; 3 – трансформатор; P – усилие сжатия

Шовная (роликовая) сварка осуществляется по линии качения роликов (рис. 12.12,в). Листовые заготовки 1 собирают внахлест между роликами – электродами 2, подключенными к вторичной обмотке трансформатора, работающего в импульсном режиме. При прокатывании роликов происходит образование сплошного шва состоящего из ряда перекрывающихся сварных точек. Как и при точечной сварке, внутренние слои нагреваются до расплавления. Сваривают: листы из низкоуглеродистой стали, латуни, бронзы, алюминиевые сплавы.

Конденсаторная сварка – разновидность контактной сварки. Она бывает стыковой, точечной и шовной. При разрядке конденсатора накопленная энергия за короткое время преобразуется в тепло, которое используется при сварке деталей в основном небольшой толщины.

Диффузионная сварка. Отличительная особенность этого вида от других способов сварки давлением – применение не высоких температур нагрева ($0,7 T_{пл}$) и низких сжимающих давлений (0,5 МПа) при длительной изотермической выдержке от нескольких минут до нескольких часов. Свариваемые заготовки тщательно зачищают, собирают, сжимают и нагревают выше температуры рекристаллизации в вакууме или

среде инертных и защитных газов (гелий, аргон, водород) для предотвращения окисления свариваемых заготовок. В результате пластической деформации происходит сближение свариваемых поверхностей по микровыступам и идет взаимная диффузия атомов в поверхностных слоях. Плавление металла отсутствует, свойства после сварки изменяются незначительно, остаточные напряжения и деформации минимальны. После снятия давления изделие дополнительно выдерживают при температуре сварки для полного протекания рекристаллизационных процессов, способствующих формированию качественного соединения. По окончании сборки охлаждают в вакууме, инертной среде или на воздухе в зависимости от типа оборудования. Метод применяется для высококачественного соединения материалов, которые обычными методами сварки соединить трудно или невозможно. Сваривают сталь с ниобием, титаном, чугуном, вольфрамом; металл со стеклом, графитом, керамикой; композиционные и порошковые материалы и др.

Сварка трением является разновидностью сварки давлением. Заготовки прижимаются друг с другом торцами, одна из них вращается (рис. 12.13). Механическая энергия трения превращается в тепло: заготовки разогреваются до пластичного состояния. Неровности и оксидные пленки разрушаются. Пластичный металл стыка выдавливается в радиальных направлениях. Выдавленный металл

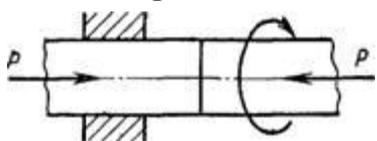


Рис. 12.13. Схема сварки трением

(*грам*) имеет характерную форму сдвоенного правильного кольца, расположенного по обе стороны от плоскости стыка. Вращение быстро останавливается и заготовки сдавливаются дополнительной силой P . При пластической деформации между атомами свариваемых заготовок возникают связи, образуется сварное соединение. Возможности применения сварки трением ограничиваются формой и размерами сечения свариваемых деталей. Сваривают: цилиндрические заготовки сплошного сечения, трубы диаметром до 140 мм.

Сварка взрывом – способ, основанный на использовании энергии

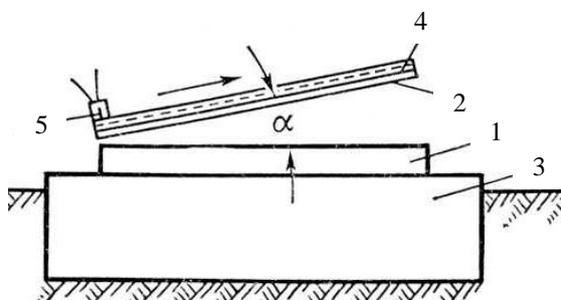


Рис. 12.14. Схема сварки взрывом

взрыва (рис. 12.14). Привариваемая (подвижная) листовая заготовка 2 с взрывчатым веществом 4 и детонатором 5 располагается под углом к неподвижной заготовке (мишени) 1, укрепленной на опорной плите 3. При взрыве образуется ударная волна и происходит соударение поверхностей заготовок.

Процесс длится доли секунды. Кумулятивная струя разрушает и уносит оксидные пленки с поверхностей. В зоне соударения металл течет подобно жидкости, и образуется прочное соединение по всей плоскости. Сваривают: листовые заготовки большой площади из разнородных металлов (биметаллические пластины), из нержавеющей сталей, цветных металлов, тугоплавких сплавов, которые трудно поддаются обычным способам сварки.

Холодная сварка – способ сварки без нагрева, только за счет пластической деформации металла в местах соединения.

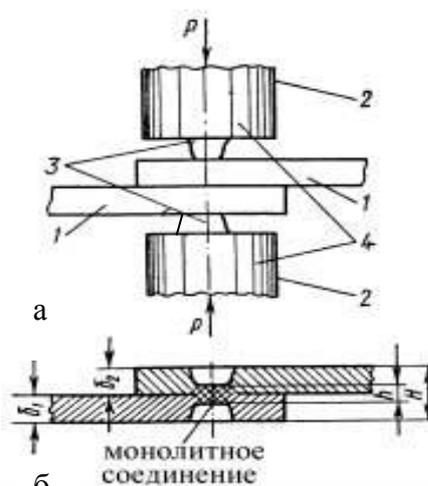


Рис. 12.15. Схема холодной сварки (а) и геометрия соединения (б)

Металл заготовок должен быть достаточно пластичен при комнатной температуре (алюминий, медь, серебро, цинк, никель и их сплавы). Для холодной сварки (рис. 12.15) зачищенные детали 1 устанавливаются внахлестку между пуансонами 2, имеющими рабочую часть 3 и опорную поверхность 4. При вдавливании пуансонов сжимающим усилием P происходит деформация заготовок и формирование сварного соединения. Опорная часть пуансонов ограничивает глубину их погружения в металл и уменьшает коробление изделия. Холодной сваркой выполняют точечные, шовные и стыковые соединения (сварка полых деталей по контуру, проволоки и шин встык).

Рис. 12.15. Схема холодной сварки (а) и геометрия соединения (б)

Индукционная и контактная сварка труб. Заготовка трубы 1 перемещается поступательно и дожимается обжимными роликами 4. Зазор до сварки регулируется так, чтобы кромки были расположены под острым углом и сходились в точке сварки. При сдавливании разогретых кромок заготовки происходит сварка. Ток подводится к заготовке через контакты 2 (рис. 12.16,а), либо от лампового или машинного генератора к спиральному индуктору 2 (рис. 12.16,б).

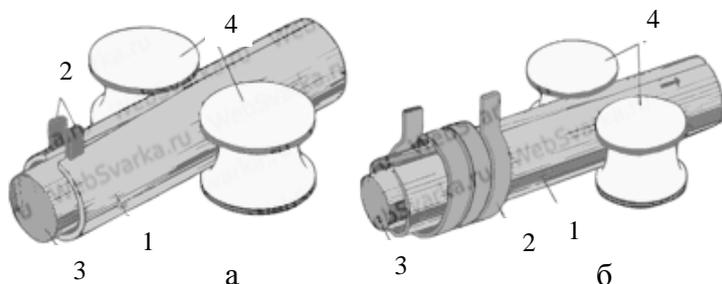


Рис. 12.16. Сварка труб с подводом тока контактами (а) и индукционным способом (б)

При прохождении по индуктору переменного тока высокой частоты в металле наводятся вихревые токи, и он нагревается. Бесконтактный индукционный способ подвода тока к заготов-

ке более рационален. В зависимости от частоты тока нагрев может происходить как с оплавлением, так и без оплавления поверхностей. Температура на поверхности выше по сравнению с внутренними слоями за счет скин-эффекта. Для уменьшения утечки тока помимо места сварки в трубу вводится ферритный сердечник 3. Способ применяют для сваривания шовных труб на непрерывных станах.

Кузнечная (горновая) сварка. Процесс состоит из следующих операций: подготовка торцов, нагрев, сварка, проковка шва. В зависимости

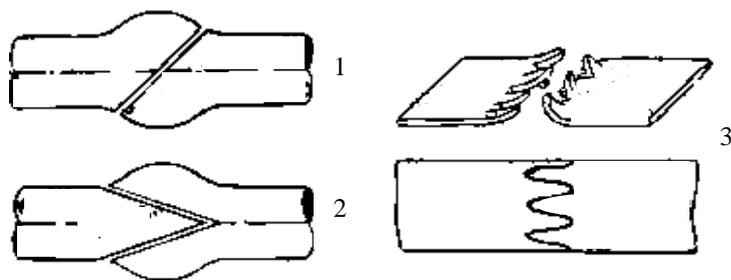


Рис. 12.17. Подготовка изделий под кузнечную сварку: 1 – внахлест; 2 – в разруб; 3 – в расщеп

толщине концов более 600 мм применяют сварку в разруб (или в паз): концы заготовок нагревают, один осаживают и затем разрубают, а другой вытягивают клином.

После подготовки изделия нагревают в кузнечном горне до 1300 °С до белого каления. Во время нагрева сталь покрывается окалиной. Для

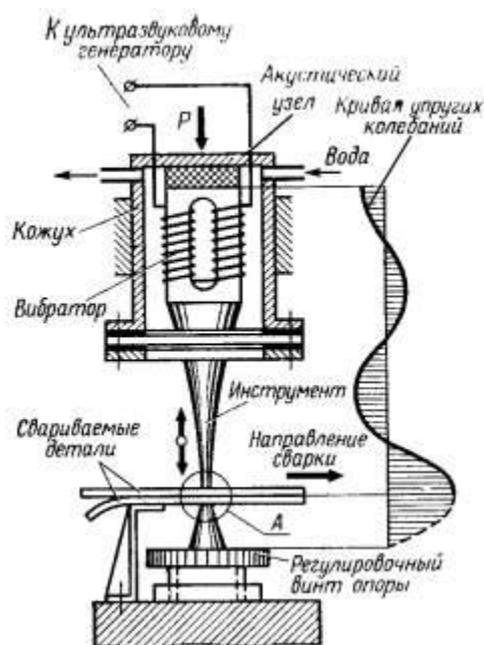


Рис. 12.18. Схема ультразвуковой сварки

ее удаления используется флюс – мелкий чистый кварцевый песок, бора, борная кислота. Флюс сплавляется с окалиной, образуя легкоплавкий шлак. Тонкая пленка шлака предохраняет сталь от дальнейшего окисления. Нагретые поковки очищают от шлака, кладут на наковальню и доковывают стык.

Разновидность кузнечной сварки – газопрессовая сварка: место сварки нагревается пламенем горелок, соединение происходит при сдавливании. Применяется при сварке газо- и нефтепроводов.

Ультразвуковая сварка. Сварное соединение образуется под действием ультразвуковых (частотой 20-

40 кГц) колебаний и сжимающих давлений, приложенных к свариваемым деталям. Ток от ультразвукового генератора (рис. 12.18) подается на обмотку магнитострикционного преобразователя (вibratorа), который собирается из пластин толщиной 0,1-0,2 мм. Материал пластин способен изменять свои геометрические размеры под действием переменного магнитного поля. Вибратор соединяется с концентратором (инструментом). Колебательные движения ультразвуковой частоты разрушают неровности поверхности и оксидный слой. Воздействие на соединяемые детали механических колебаний сварочного волновода и небольшого давления создаваемого концентратором обеспечивает течение металла в зоне соединяемых поверхностей без внешнего подвода тепла. За счет трения, вызванного возвратно-поступательным движением сжатых контактирующих поверхностей, происходит разогрев поверхностных слоев заготовок. Трение не является доминирующим источником теплоты, но его вклад в образование сварного соединения является существенным. Ультразвуковая сварка применяется для соединения металла небольших толщин, для сварки полимерных материалов.

Тип сварного соединения определяется взаимным расположением свариваемых заготовок (рис. 12.19).

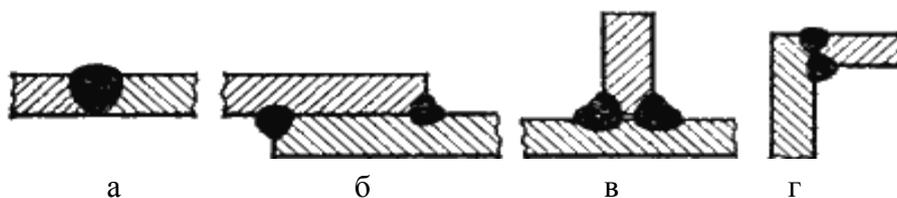


Рис. 12.19. Основные типы сварных соединений:
а – стыковое; б – внахлест; в – тавровое; г – угловое

12.3. Термическая резка и пайка металлов

Термическая резка металлов. *Кислородная резка* основана на способности металла сгорать в струе кислорода. Металл нагревается пламенем горючих газов (природный газ, ацетилен). Подается струя кислорода и металл окисляется – горит с выделением большого количества тепла; образующиеся жидкие оксиды выдуваются струей кислорода из места реза. Горелка для резки имеет два канала: кольцевой для подачи смеси $C_2H_2 + O_2$ и формирования подогревающего пламени, центральный – для подачи чистого кислорода.

Кислородно-флюсовая резка. Высоколегированные стали, чугун, цветные металлы разрезать кислородной резкой не удастся. В зоне реза образуются оксиды и шлаки, которые имеют низкую жидкотекучесть и не могут удаляться из полости реза. Поэтому вместе с кислородом по-

даются порошкообразные флюсы (для резки сталей – порошок железа), обеспечивающие дополнительное тепловыделение при окислении и увеличивающие температуру.

Плазменная резка. Из сопла плазмотрона выдувается струя плазмы. Процесс резки заключается в расплавлении металла и удалении его из полости реза плазменной струей. В качестве плазмообразующих газов используют: сжатый воздух, кислород, азотно-кислородную смесь, азот, аргоноводородную смесь.

Электронно-лучевая и лазерная резка основаны на испарении металла под действием концентрированных потоков излучения. Электронно-лучевая резка осуществляется только в вакууме, лазерная – в обычной атмосфере. Резка этими способами отличается высокой чистотой и точностью реза, небольшой зоной термического влияния.

Электродуговую резку применяют для грубой резки металлов. Она основана на расплавлении металла теплом электрической дуги на режимах с повышенной силой тока и удалении его с места реза под действием силы тяжести и давления газов дуги. Разновидностью является воздушно-дуговая резка. При этом способе используют графитовые электроды, вдоль которых подается струя сжатого воздуха. Резку производят на постоянном токе.

Таблица 12.1.

Области применения способов термической резки

Способ резки	Материал	Диапазон толщин, мм
Газокислородная	Углеродистые и низколегированные стали	от 3 до 1000,
	Титан и его сплавы	от 3 до 100
Кислородно-флюсовая	Высоколегированные хромникелевые и хромистые стали, чугун, медь, латунь, бронза	от 3 до 1000
Плазменная	Конструкционные стали всех марок, алюминий, медь и сплавы на их основе, тугоплавкие металлы	от 3 до 100
Дуговая (с подачей воздуха)	Углеродистые и низколегированные стали	неограничено по криволинейному контуру и в труднодоступных местах
Лазерная	Конструкционные стали всех марок, алюминий, медь и сплавы на их основе, тугоплавкие металлы, титан	до 5

Пайка металлов – процесс получения неразъемного соединения заготовок с помощью специальных металлов и сплавов – *припоев*. При пайке металлов до плавления доводят только относительно легкоплавкий припой. Температура нагрева заготовок должна быть на 50-80 °С выше температуры плавления припоя. Соединение заготовок происходит вследствие взаимной диффузии атомов припоя и металла заготовок. При последующем охлаждении и кристаллизации расплава образуется прочное соединение заготовок. Качество паяных соединений (прочность, герметичность, надежность и др.) зависят от правильного выбора основного металла, припоя, флюса, способа нагрева, типа соединения. Для обеспечения процесса диффузии необходима тщательная очистка соединяемых поверхностей. Припой должен хорошо растворять основной металл и обладать смачивающей способностью. Припои представляют собой сплавы цветных металлов сложного состава.

Обозначение марки припоя начинается с буквы «П» – припой. Числа – содержание компонентов в процентах. Буквы в конце марки означают, что данный компонент составляет оставшееся содержание припоя. *Обозначение компонентов:* А – алюминий; Ж – железо; И – индий; К (Кд) – кадмий; М – медь; О – олово; С – свинец; Ср – серебро; Су – сурьма; Ф – фосфор; Ц – цинк. Например: ПОС61М – припой оловянно-свинцовый, олова – 61 %, остальное – свинец и добавка меди; ПСр3Кд – серебряно-кадмиевый, серебра – 3 %, остальное – кадмий.

К *мягким припоям* (температура плавления ниже 400 °С) относят сплавы легкоплавких металлов: висмута, индия, олова, цинка, свинца. В производстве часто используют сплавы олова: оловянно-свинцовый припой ПОС-61 (61 % Sn и 39 % Pb) называется *третником* (примерно 1/3 свинца); оловянно-цинковые припои – ПОЦ-90, ПОЦ-70 и др.

К *твердым припоям* (температура плавления 600-1300 °С) относят чистую медь и ее сплавы с цинком, никелем и благородными металлами (серебром, золотом, платиной). Наиболее часто применяют медно-цинковые припои ПМЦ-42, ПМЦ-47, содержащие соответственно 42 и 47 % меди. При пайке деталей ответственного назначения применяют медно-серебряные припои – ПСр-10, ПСр-25, ПСр-72, содержащие соответственно 10, 25 и 72 % серебра (остальное – медь и цинк). Припои изготавливают в виде прутков, листов, проволок, полос, спиралей, дисков, колец, зерен и др. для удобства укладки припоя в места пайки. В качестве флюсов применяют канифоль, хлористый цинк или его смесь с хлористым аммонием и др. Пайке поддаются все углеродистые и легированные стали, в том числе инструментальные и коррозионно-стойкие, твердые сплавы, серые и ковкие чугуны, большинство цветных металлов, а также металлы с неметаллическими материалами.

Пайка чугуна. Графит содержащийся в структуре чугуна затрудняет смачивание поверхности припоем. Для его удаления применяется: пескоструйная обработка с последующим выжиганием графита окислительным пламенем газовой горелки или электрохимическая обработка в соляной ванне при 450-510 °С.

При низкотемпературной пайке чугуна оловянно-свинцовыми и другими легкоплавкими припоями поверхности подготавливают путем обработки флюсами (ПВ209 или ПВ284Х) при 600-700 °С или электрохимическим методом в соляной ванне, а затем обезжиривают бензином, ацетоном или раствором щелочи. Пайку производят паяльником или газовой горелкой с применением флюсов на основе хлористого цинка с добавками хлористых солей меди и олова. Для облегчения пайки легкоплавкими припоями применяют гальваническое лужение или контактное меднение в растворе медного купороса.

Высокотемпературную пайку чугуна производят припоями на основе меди, например латунию. Применяют серебряные припои с никелем, имеющие низкие температуры плавления и образующие прочные соединения. При высокотемпературной пайке чугуна целесообразно применять флюсы (ПВ209 и ПВ284Х), которые растворяют графит на поверхности чугуна, благодаря чему обеспечивается надежное смачивание припоем соединяемых поверхностей.

Нагрев при пайке чугуна производят газовой горелкой или паяльной лампой до температуры порядка 900 °С; при этом пламя должно быть только нейтральным. Перегрев чугуна связан со структурными превращениями (при последующем его охлаждении выделяется хрупкий цементит). Для снятия внутренних напряжений и упрочнения паяных соединений чугунные изделия подвергают отжигу при 700-750 °С в течение 20 мин. Пайку в печах с контролируемой атмосферой производят с флюсом, который улучшает смачивание основного металла и затекание припоя в зазор.

Пайку дефектных участков (усадных раковин, пор и трещин) чугунных литых деталей осуществляют с применением оловянно-свинцовых припоев. Чаще применяют припой ПОСЗО с использованием в качестве флюса водного раствора хлористого цинка с добавками хлористых солей меди и олова. Паяют только после механической зачистки и лужения соединяемых поверхностей. Последовательность лужения: места пайки очищают от литейной корки проволочной щеткой; очищенную поверхность обезжиривают бензином или раствором щелочи и наносят флюс; равномерно прогревают место пайки газовой горелкой до температуры, при которой начинает плавиться припой; после лужения

дефекты запаивают, применяя для этой цели паяльник или горелку. После пайки изделие тщательно промывают горячей и холодной водой.

Пайка меди и ее сплавов. Пайка меди производится всеми известными способами: паяльником, газовыми горелками, погружением в расплавленный припой и в камерных печах. Применение низкотемпературных припоев ограничено тем, что паяльником можно осуществлять пайку только тонкостенных деталей при температуре до 350 °С. Массивные детали, вследствие большой теплопроводности меди, паяют газовыми горелками. Для трубчатых медных теплообменников применяется пайка с последовательным погружением в расплавы солей и припоев. Распространена пайка в печах, поскольку обеспечивает равномерный нагрев изделий без деформации. Пайка в вакууме производится в вакуумных печах или контейнерах, загружаемых в обычные печи. Паяные швы отличаются чистотой исполнения, прочностью металла шва и высокой коррозионной стойкостью. Недостаток – сложность оборудования.

Флюсы. При пайке меди легкоплавкими припоями используют канифольно-спиртовые флюсы, водные растворы хлористого цинка или хлористого аммония. При пайке тугоплавкими серебряными припоями применяются флюсы на основе соединений бора и фтористых соединений калия. Флюсы очищают поверхность меди от окисной пленки и способствуют растеканию припоя. Недостаток флюсовой пайки меди – трудность получения герметичных соединений, так как остатки флюса являются очагами коррозии. Пайку меди осуществляют в восстановительных или нейтральных газовых средах. В азоте пайку меди производят при 750-800 °С. Недостаток – сложность оборудования по очистке азота. Применяется пайка меди в среде аргона припоем ЛС59-1 с дополнительным флюсованием мест пайки водным раствором буры.

Припои. При низкотемпературной пайке меди применяются стандартные оловянно-свинцовые ПОС40, ПОС61 и свинцово-серебряные припои ПСр1,5, ПСр3 с использованием флюсов на основе хлористого цинка или канифольно-спиртовых. Хрупкость оловянно-свинцовых припоев и паянных ими соединений при низких температурах объясняется аллотропическим превращением олова и образованием в шве хрупких интерметаллидов, которые являются очагами развития трещин. Если оловянно-свинцовые припои содержат менее 15 % олова, то падения ударной вязкости не происходит. Свинец, являясь основой сплава, с понижением температуры увеличивает ударную вязкость. Высокая пластичность свинца делает его нечувствительным к надрезу.

Широкое применение для высокотемпературной пайки меди нашли припои ПСр45, ПСр40, ПСр25, ПСр12. Пайку осуществляют, нагревая медь ацетилено-кислородным пламенем или в печи с использованием

коррозионно-активных флюсов ПВ209, ПВ284Х. Остатки флюса удаляют промывкой в горячей воде. Пайку теплообменной аппаратуры осуществляют с применением припоя ПСр72, ПСр71 в вакууме или аргоне.

Если конструкция позволяет производить пайку медных деталей под давлением, то в качестве припоя можно использовать серебряное покрытие (10-25 мкм) или тонкую серебряную фольгу. При нагреве выше 780 °С медь взаимодействует с серебром с образованием припоя типа ПСр. Пайка этим контактно-реактивным методом осуществляется без применения флюса – в вакууме или инертной среде.

Диффузионная пайка меди может быть выполнена галлием, индием, оловом, свинцом, припоем ПОСб1 путем поджатия деталей в вакууме или аргоне при температурах 650-800 °С и длительных выдержках. Припой в место пайки можно наносить напылением в вакууме, гальваническим способом или в виде тонкой фольги. Однако эти соединения меди хрупкие и малопрочные. Капиллярная пайка меди низкотемпературными припоями производится при зазорах 0,05-0,5 мм и температурах 650-900 °С в вакууме или аргоне.

Пайка латуней имеет следующие особенности: присутствие на поверхности плотной оксидной пленки и испарение цинка при нагреве.

На поверхности латуней, содержащих до 15 % Zn, слой оксидов состоит из Cu_2O с внедренными частицами ZnO . В сплавах с большим содержанием цинка слой оксидов состоит в основном из ZnO , удаление которого более сложно, чем Cu_2O . Особенность низкотемпературной пайки латуней оловянно-свинцовыми и другими аналогичными припоями заключается в том, что удаление оксидной пленки с поверхности латуней не обеспечивается канифольно-спиртовыми флюсами. Необходимо применять более активные флюсы. Например, при пайке латуней ЛС59-1, Л63 используют флюсы на основе хлористого цинка.

Снижение предела прочности соединений латуни связывают с пористостью в швах, которую объясняют испарением цинка и попаданием его паров в жидкий припой. Порообразование наблюдается после пайки как низкотемпературными, так и высокотемпературными припоями. Высокотемпературную пайку латуни в печах с восстановительной или нейтральной атмосферой применяют ограниченно из-за испарения цинка. Пайка латуней в газовых средах возможна только с предварительным флюсованием мест пайки. В печи без флюса, латуни паяют только в том случае, если она предварительно покрыта слоем меди или никеля, предохраняющим от испарения цинка.

Детали из латуни можно паять в соляных ваннах при 850-870 °С. Для улучшения затекания припоя в зазор добавляют 4-5 % флюса, содержащего фтороборат калия или буру. Латуни интенсивно растворяют-

ся при пайке серебряными и медно-фосфористыми припоями. Паять их следует с высокими скоростями нагрева для сокращения контакта жидкого припоя и твердого металла.

Пайка бронз. *Оловянистые бронзы* можно паять: паяльником, газопламенными горелками, контактным нагревом, нагревом ТВЧ, в соляных ваннах, в печах с контролируемой атмосферой. Нагрев ведут постепенно, при высоких скоростях нагрева основной металл склонен к краснеломкости. Пайку высокооловянистых бронз проводят оловянно-свинцовыми припоями с использованием флюсов на основе хлористого цинка с добавкой соляной кислоты. При высокотемпературной пайке используют медно-цинковые и серебряные припои с применением флюсов на основе борной кислоты с добавками хлористых и фтористых солей металлов. *Свинцовые бронзы* можно паять припоями с флюсами, которые применяют для пайки оловянистых бронз. Места пайки необходимо тщательно флюсовать, поскольку образующиеся на поверхности оксиды свинца препятствуют затеканию припоя в зазор. На поверхности *алюминиевой бронзы* образуется оксидная пленка, трудно удаляемая обычными флюсами. Изделие перед пайкой обрабатывают во фтористоводородной или плавиковой кислоте.

При пайке оловянно-свинцовыми припоями применяют флюсы с повышенным содержанием соляной кислоты. Рекомендуется предварительная очистка и флюсование поверхности смесью борной кислоты с хлористыми солями металлов. Во избежание окисления и образования хрупких интерметаллидов в шве, бронзы паяют применяя быстрый нагрев. Введение в припои никеля повышает пластичность и прочность соединений. *Бериллиевые бронзы* паять труднее, чем другие медные сплавы. Их следует паять немедленно после механической зачистки серебряными припоями с флюсом, в состав которого должны входить фтористые соли. *Марганцовистые бронзы* следует паять с использованием ортофосфорной кислоты. Медно-никелевые сплавы паяют любыми способами и припоями, а также чистой медью. Пайку медью в печи с контролируемой атмосферой выполняют при высоких скоростях нагрева, так как при длительной пайке основной металл растворяется в припое, прочность шва падает.

Пайка титана и его сплавов. На поверхности титана имеется *альфированный слой*, насыщенный азотом и кислородом. Его удаляют пескоструйной обработкой или травлением в растворе: 20-30 мл H_2NO_3 , 30-40 мл HCl на литр воды. Время травления 5-10 мин при 20 °С. После такой обработки на поверхности титана остается тонкая оксидная пленка, препятствующая смачиванию поверхности припоем. Обычно пайку титана и его сплавов ведут в вакууме или аргоне, который тщательно

очищен от примесей кислорода, азота и паров воды. Пайку титана ведут при температуре 800-900 °С, что способствует быстрой очистке поверхности и хорошему смачиванию его припоями. Пайку при высоких температурах производят редко (особенно печную), при длительном нагреве выше 900 °С у титана отмечается склонность к росту зерна.

Водород, всегда находящийся в титане и снижающий пластичность, удаляется при пайке (или нагреве) в высокотемпературном вакууме 10^{-2} Па при 900 °С. Пайка титана в вакууме предпочтительнее, чем в нейтральной атмосфере.

При выборе припоя, способа и режимов пайки необходимо иметь в виду, что титан образует хрупкие интерметаллиды в паяном шве почти со всеми элементами, входящими в припой. В качестве основы припоев выбирают: серебро, которое образует с титаном менее хрупкие интерметаллиды; алюминий, который образует с титаном ограниченную область твердых растворов, что также позволяет рассчитывать на получение менее хрупких паяных соединений.

При пайке титана в вакууме чистым алюминием в шве образуются интерметаллидная прослойка, соединения приобретают нулевую прочность. Толщина прослойки уменьшается, если в качестве припоя применяется алюминий, легированный Cu, Fe, Ge, Mg, Mn, Ni, Sb, Ti, Zr и Si, по 1 % в отдельности (особенно 0,8 % Si). Пайка ТВЧ в среде аргона при 720 °С трубопроводов из сплава ВТ1 припоем на основе алюминия, содержащего 0,3 % Fe, 0,35 % Si и 0,05 % Cu, дает возможность получить герметичные соединения с прочностью 110-130 МПа. Титан и его сплавы низкотемпературными припоями паяют после покрытия никелем, оловом, серебром или медью. Никелем титан покрывают химическим или гальваническим способом. Для увеличения сцепления, детали прогревают при 250 °С в течение 1 часа. Для покрытия оловом изделие опускают на 10-20 мин в нагретое до 700 °С олово. Покрывать титан оловом можно при помощи флюса, в состав которого входит хлористое олово. Флюс просушивают, применяют в размолотом виде. Изделие покрывают флюсом толщиной до 3 мм и нагревают до 350-400 °С в печи с нейтральной средой. Луженое изделие паяют легкоплавкими припоями ($T_{пл} \leq 200$ °С), применяя канифольные флюсы. Медное покрытие получают погружением изделия на несколько секунд в расплавленную хлористую медь или ее смесь с другими хлоридами меди при 650-700 °С.

Серебром титан покрывают методом погружения изделия в расплавленное серебро. После охлаждения деталь очищают от остатков флюса и шлака паром или кипячением в воде с последующей зачисткой наждачной бумагой или щеткой.

13. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

13.1. Электрофизические способы

Электроискровая обработка. Метод основан на явлении электрической эрозии – разрушении металла под действием кратковременных электрических искровых разрядов, возникающих между поверхностями заготовки (анодом) и инструмента (катодом). На поверхности заготовки образуется лунка, оторвавшиеся частицы охлаждаются и оседают. Процесс происходит в диэлектрической среде (в баке, заполненном маслом или керосином – рис. 13.1). Способ используют для прошивки отверстий любой формы в трудно обрабатываемых, но токопроводящих ма-

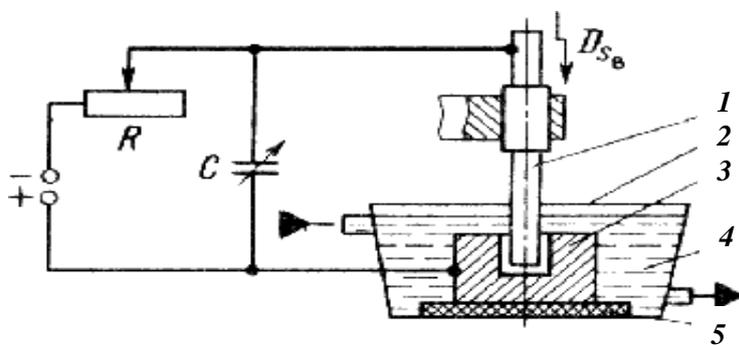


Рис. 13.1. Схема электроискрового станка:

- 1 – инструмент; 2 – ванна; 3 – заготовка;
4 – диэлектрическая жидкость; 5 – изолятор

териалах. Точность размеров и шероховатость обработанной поверхности зависят от режима обработки.

Электроимпульсная обработка также основана на использовании кратковременных разрядов, возникающих между поверхностями инструмента и заготовки. Только используется более продолжительный (1-10 мс) и мощный дуговой разряд, чем при электроискровой обработке. Способ применяют при обработке штампов, турбинных лопаток, ручьев в валах периодического проката из жаропрочных сплавов, резцов, фрез и штампов из твердых сплавов. Высокочастотная электроимпульсная обработка дает более низкую шероховатость поверхности, чем низкочастотная.

Электроконтактная обработка. Способ заключается в электромеханическом разрушении обрабатываемого материала на воздухе без применения электролита. Инструментом является вращающийся чугунный или медный диск. В местах контакта заготовки и инструмента возникают искровые разряды. Происходит локальный разогрев (или плавление) металла и его удаление механическим способом за счет возвратно-поступательного движения заготовки относительно диска. Обработку применяют для резки заготовок, обдирки отливок и слитков, заточки инструмента, плоского шлифования, прошивки отверстий.

13.2. Электрохимические способы

Электрохимическая обработка металлов основана на растворении металла (анода) при пропускании постоянного тока через раствор электролита.

Электрохимическое травление используют для очистки поверхности металлов и сплавов от загрязнений. В ванне с электролитом (растворы кислот, солей и щелочей) между электродами-катодами помещают заготовку (анод) и включают ток. Жировая пленка, ржавчина не могут удержаться на поверхности и удаляются под действием электрического тока. Электролит подогревают до 70-80 °С.

Электрохимическое полирование. Обрабатываемую деталь (анод) надо поместить в ванну с электролитом (рис. 13.2). Вторым электродом служит катод – пластинка, изготовленная из меди, свинца или стали. В первую очередь растворяются выступающие точки – микровыступы, поскольку на них плотность тока наибольшая. Шероховатость уменьшается, затем исчезает. Поверхность детали становится гладкой и блестящей. Впадины между выступами заполняются продуктами растворения: окислами и солями металлов.

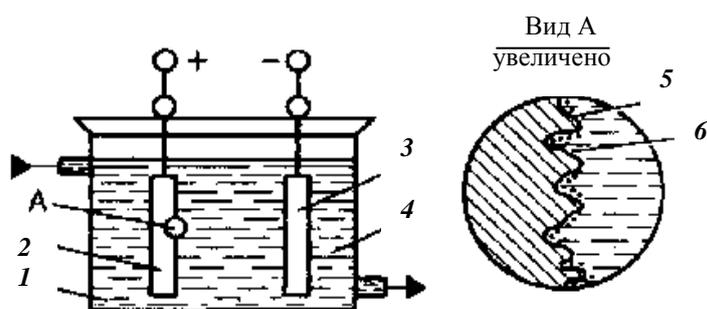


Рис. 13.2. Схема электрохимического полирования: 1 – ванна; 2 – заготовка; 3 – катод; 4 – электролит; 5 – микровыступ; 6 – продукты растворения

Электрохимическое полирование и глянецование используют как окончательную чистовую обработку при изготовлении режущих инструментов (сверл, фрез, калибров), зубчатых колес и других деталей сложной конфигурации.

Размерная электрохимическая обработка характеризуется тем, что электролит прокачивается под давлением через небольшой зазор между инструментом (катодом) и заготовкой (анодом). Инструменту придается форма, обратная форме заготовки. Образующиеся на поверхности заготовки продукты анодного растворения (соли) растворяются в электролите и удаляются из зоны обработки. Этот метод обеспечивает высокую точность и качество обработанной поверхности. Используется для формообразования лопаток паровых турбин, профильных валков, и сверления (прошивания) глухих и сквозных отверстий.

Электроабразивная обработка применяется в основном для шлифования металлов и твердых сплавов. Инструментом служит шлифо-

вальный круг, который изготавливается из абразивных материалов на токопроводящей связке. Между вращающимся кругом (катодом) и заготовкой (анодом) имеется зазор, в который подается электролит. Продукты анодного растворения удаляются абразивными зернами круга, как при механическом шлифовании. *Электроалмазная обработка* – разновидность предыдущего способа. Только токопроводящие круги используются алмазные. Около 75 % припуска удаляется за счет анодного растворения, а 25 % – за счет механического шлифования.

Электрохонингование. Этот способ качественно подобен процессу хонингования абразивными головками – финишной операции по получению отверстий высокой точности и малой шероховатости. Отличие состоит в следующем: обрабатываемая заготовка устанавливается в ванне с электролитом и подключается к аноду; хонинговальная металлическая головка оснащается не абразивными брусками, а брусками из дерева или пластмассы и подключается к катоду. Продукты анодного растворения удаляются брусками за счет вращательного и возвратно-поступательного движений головки. Иногда в электролит добавляют абразивные материалы (тонкие микропорошки).

Анодно-дуговая обработка сочетает электрофизические и электрохимические процессы. В качестве инструмента (катада) используют металлические диски, цилиндры, ленты, проволоку. Заготовку (анод) обрабатывают в среде электролита (водный раствор жидкого натриевого стекла). При пропускании тока происходит анодное растворение – процесс, присущий электрохимической обработке. В точках контакта инструмента с неровностями поверхности заготовки возникает электроэрозия – процесс, присущий электроискровой обработке. Кроме того, металл в точках контакта разогревается, как это имеет место при электродолевой обработке. Продукты электроэрозии и анодного растворения удаляются за счет относительных движений заготовки и инструмента. Этим методом обрабатывают токопроводящие материалы, нарезают заготовки, прорезают пазы и щели, шлифуют и полируют поверхности.

Химические методы обработки. Химическая обработка основана на разрушении металлов путем травления в растворах кислот и щелочей. Перед травлением поверхности тщательно очищают. Поверхности, которые не подлежат травлению, защищают химически стойкими покрытиями (лаком, красками). Заготовки опускают в ванну с раствором кислоты или щелочи, в зависимости от материала из которого они изготовлены. Для увеличения скорости травления раствор подогревают до 40-80 °С. Потом заготовки вынимают, промывают и сушат. Снимают защитное покрытие. Химико-механическую обработку осуществляют с

помощью паст или суспензий, которые наносят на поверхность заготовки. В результате химических реакций на поверхности появляется рыхлая масса, удаляемая абразивным инструментом. Обработку применяют для шлифования, притирки и чистовой доводки деталей из различных металлов и сплавов.

Ультразвуковая обработка – разновидность механической обработки материалов, основана на использовании явления магнитострикции – способности материала (сердечника) изменять геометрические размеры в переменном магнитном поле ультразвуковой частоты (20-30 кГц). При приложении поля поперечное сечение сердечника уменьшается, длина увеличивается (при постоянном объеме). При снятии поля первоначальные размеры восстанавливаются. Ультразвуковые колебания сердечника передаются жестко закрепленному на нем инструменту – вибратору, который опускают в абразивную суспензию (воду с абразивным материалом). Вибратор наносит удары по зернам абразивного материала (карбиды бора и кремния). Зерна ускоряются и ударяются о заготовку, скалывая с ее поверхности микрочастицы. Вибратор изготавливают из конструкционной стали. По форме и размерам он должен соответствовать профилю обрабатываемой поверхности заготовки. Ультразвуковую обработку применяют для прошивания отверстий, долбления полостей в заготовках из твердых и хрупких материалов.

Лучевые методы обработки

Электронно-лучевая обработка. Место обработки облучают пучком электронов, ускоренных электрическим полем. При соударении электроны тормозятся, кинетическая энергия преобразуется в тепловую: температура достигает 6000 °С. Любой тугоплавкий материал на малой площади быстро плавится и испаряется. Способ используют для получения отверстий, пазов малых размеров в трудно обрабатываемых материалах. **Светолучевая (лазерная) обработка** – разновидность тепловой обработки материалов. Источник тепла – энергия излучения лазера работающего в импульсном режиме. С помощью излучения лазера можно обработать практически любой материал. Лазером осуществляют резку металла, получение очень малых отверстий и выполнение других видов размерной обработки. Фокусировка лазерного луча позволяет уменьшить площадь обрабатываемой поверхности до 0,01 мм. Недостаток – низкий коэффициент преобразования светового излучения в тепловую энергию. **Плазменная обработка.** Плазму получают в горелках при пропускании газа (углекислый газ, гелий и др.) через электрическую дугу. Температура достигает 20000 °С. Плазменной струей можно производить обработку различных материалов и сплавов, обрабатывать

неметаллические материалы (керамику, стекло), прошивать отверстия, разрезать заготовки и вырезать их из листового материала и т. д.

14. ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ

14.1. Выбор материала

Правильный выбор материала для изготовления изделия является важной задачей и проводится с учетом ряда критериев, которые определяются как физическими, химическими и механическими свойствами материала, так и эксплуатационными и технологическими требованиями к выпускаемой продукции. Когда имеются варианты, то определяющую роль при выборе играет цена материала, но выбор дешевого материала не всегда оптимальный.

Эксплуатационные требования характеризуют способность материала работать в конкретных условиях. Приборы, оборудование, конструкции работают в условиях воздействия низких или высоких температур, динамических, статических и циклических нагрузок, агрессивных сред и т. п.

Выбор следует начинать с анализа номенклатуры с целью поиска материалов с необходимым сочетанием эксплуатационных параметров.

Надежность работы отдельных элементов оборудования и конструкций во многом определяется способностью конкретных материалов сопротивляться износу и разрушению, которые и являются в большинстве случаев причиной сокращения срока службы изделия.

При выборе следует руководствоваться не только анализом механических свойств отдельных материалов, но и стендовыми испытаниями приборов и конструкций при заданных условиях эксплуатации.

В процессе эксплуатации изделия длительное воздействие знакопеременных нагрузок приводит к накоплению механических повреждений, которые могут явиться причиной разрушения. Однако повышение сопротивления деталей оборудования и конструкций хрупкому или вязкому разрушению ограничено пределом прочности материала.

Использование более прочного материала дает возможность повысить не только срок службы, но и увеличить мощность и производительность оборудования, изготовленного из таких материалов. Не только прочность материала, но и качество обработки изделия существенно влияет на срок его службы, поскольку развитие усталостных трещин происходит на дефектах поверхности – концентраторах напряжений. Наличие на поверхности напряжений сжатия, как следствие упрочняющей обработки, может предупредить образование зародышей трещин и значительно продлить срок службы изделия. Кроме того, любая упроч-

няющая обработка способствует увеличению сопротивления материала износу, а также коррозии, продлевая срок службы изделия.

Технологические требования характеризуют способность материала быть обработанным тем или иным способом. Материал должен обладать минимальной трудоемкостью изготовления, т. е. обладать хорошей обрабатываемостью давлением, резанием и т. д. Применение более технологичного материала позволяет использовать более экономичные методы изготовления и обработки, что снижает себестоимость изготовления изделия, уменьшает количество брака и отходов.

Экономические требования. Качественный материал является дорогостоящим. Правильный выбор материала должен учитывать как экономический эффект от повышения качества, так и увеличение цены материала. Необходимо проводить сравнительный расчет экономической эффективности применения различных материалов. По их результатам и делают окончательный выбор. Если увеличение цены перекрывается полученным экономическим эффектом, то применение дорогостоящего материала целесообразно.

Например, хромоникелевые стали являются коррозионно-стойкими. Эксплуатация при высоких температурах (450-850 °С) приводит к развитию в них межкристаллитной коррозии. Для ее уменьшения в сталь дополнительно вводят легирующий элемент титан и снижают содержание углерода. Сталь стоит дороже, но ее использование окупается более длительным сроком службы изделия.

Широкое внедрение пластмасс обусловлено ценными специфическими свойствами, которые позволяют им конкурировать с металлическими материалами. Если применение пластмасс технически оправдано, то оно экономически всегда эффективно. Благодаря малой плотности пластмассы резко снижается масса изделий. Вследствие хорошей технологичности производство пластмассовых деталей обходится дешевле, чем металлических. Применение пластмасс в машинах и оборудовании приводит к уменьшению затрат на смазку, ремонт; повышению надежности; увеличению срока службы. Себестоимость пластмассовых изделий в 2-3 раза ниже.

14.2. Основные направления экономии материалов

Стоимость материалов составляет 40-70 % от всех затрат на изготовление готовой продукции. Поэтому экономия материалов – важнейший резерв снижения себестоимости. Необходимо учитывать, что природные запасы сырья для производства материалов (руда для металлов и сплавов, нефть и газ для полимерных материалов и др.) ограничены.

Много материалов теряется в виде отходов в процессе производства. В России, вследствие устаревших методов разлива, из тонны проката четверть металла уходит в отходы. Эти потери материала ложатся на себестоимость конечного продукта. Главная экономия материала в процессе производства может быть получена за счет использования современных малоотходных и безотходных технологий: непрерывной разлива стали, малоотходных методов штамповки, специальных способов литья, методов порошковой металлургии.

Использование вторичных ресурсов – важное направление экономии материалов. Это и экологическая задача, так как скопление отходов наносит вред окружающей среде. Переработка отходов не всегда технически выполнима и экономически рентабельна. Использование металлолома в производстве металлов и сплавов не вызывает технических трудностей и экономически выгодно. С экологической точки зрения важна переработка шлаков, пока находящихся в отвалах.

Переработка пластмасс вызывает большие проблемы. Каждый вид пластмасс требует своего способа переработки. Термореактивные пластмассы вообще не поддаются переработке. Возникает необходимость сортировки, что практически неосуществимо, так как визуально распознать тип пластмассы трудно. Решение проблемы – использование измельченных отходов пластмасс в качестве наполнителя при производстве строительных материалов и дорожных покрытий. Экологическая проблема состоит в том, что полимеры разлагаются очень медленно или не разлагаются совсем. Их сжигание вызывает загрязнение атмосферы. Вторичная переработка стекла и резины не вызывает трудностей.

Защита от коррозии – важное направление экономии металлических материалов. Ежегодно потери от коррозии достигают 10 % от общей массы выплавленного металла. Но применение коррозионно-стойких (нержавеющих) сталей обходится в 4-8 раз дороже, чем обычных углеродистых. Поэтому в каждом конкретном случае надо искать и применять соответствующий метод защиты от коррозии (гальванические покрытия, протекторная защита и др.).

Один из путей экономии материалов – борьба с износом. Решение проблемы заключается в использовании износостойких и антифрикционных материалов (металлических и неметаллических); в правильном применении смазочных материалов; повышении износостойкости термической, химико-термической обработкой и поверхностным деформированием; наплавке на поверхность изделия износостойкого слоя; нанесении износостойких покрытий.

Снижение материалоемкости изделий: рациональное конструирование и прочностные расчеты с использованием компьютерных про-

грамм; правильный выбор материала; использование новых производственных технологий; увеличение мощности машин и оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арзамасов Б. Н., Макарова В. И., Мухин Г. Г. и др.; Под общ. ред. Арзамасова Б. Н., Мухина Г. Г. Материаловедение: Учебник для вузов. 7-е изд., – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. –648 с.
2. Фетисов Г. П., Карпман М. Г., Матюнин В. М. и др. Материаловедение и технология металлов. Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. / Под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высш. школа. 2001. –638 с.
3. Ржевская С. В. Материаловедение. Учебник для вузов. М.: ЛОГОС, 2004. –424 с.
4. Колесов С. Н., Колесов И. С. Металловедение и технология конструкционных материалов. – М.: Высш. школа. 2004. –519 с.
5. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение. Учебник для вузов. СПб.: Химиздат. 2004. –736 с.
6. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1990. –528 с.
7. Гуляев А. П. Металловедение: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. –544 с.
8. Дальский А. М., Барсукова Т. М., Бухаркин Л. Н. и др. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов./ Под. ред. А. М. Дальского. – 5-е изд., исправленное. М.: Машиностроение, 2003. –512 с.
9. Интернет: <http://window.edu.ru/>
10. Интернет: <http://supermetalloved.narod.ru/>
11. Интернет: <http://www.docload.ru/>

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ.....	4
1.1. Классификация материалов.....	4
1.2. Кристаллическое строение материалов	8
1.3. Кристаллизация металлов	15
1.4. Деформация и разрушение металлов	18
1.5. Свойства материалов и методы их испытаний.....	24
2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ.....	31
2.1. Строение сплавов	31
2.2. Диаграммы состояния двойных сплавов.....	33
2.3. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов	40
2.4. Углеродистые стали	44
2.5. Чугуны	47
3. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ.....	50
3.1. Механизмы основных превращений	50
3.2. Отжиг стали	55
3.3. Закалка и отпуск	56
4. ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ.....	60
4.1. Упрочнение методом пластической деформации.....	60
4.2. Упрочнение методом поверхностной закалки.....	61
4.3. Химико-термическая обработка.....	62
5. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ.....	68
5.1. Маркировка легированных сталей	71
5.2. Классификация легированных сталей.....	72
6. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ.....	81
6.1. Титан и его сплавы	81
6.2. Алюминий и его сплавы.....	82
6.3. Магний и его сплавы.....	87
6.4. Медь и ее сплавы.....	88
6.5. Другие цветные металлы и сплавы.....	91
7. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	94
7.1. Полимеры	94
7.2. Пластмассы	96
7.3. Композиционные материалы	98
7.4. Керамические материалы.....	104
8. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО	108
8.1. Основные сведения о производстве чугуна	108

8.2. Производство стали	111
8.3. Разливка стали	117
9. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....	119
9.1. Литейные свойства сплавов	119
9.2. Литье в песчано-глинистые формы	120
9.3. Плавильные печи.....	122
9.4. Специальные способы литья.....	123
9.5. Сплавы для изготовления отливок.....	127
10. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	129
10.1. Прокатка.....	130
10.2. Волочение и прессование	132
10.3. Ковка.....	134
10.4. Штамповка.....	134
11. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ	137
11.1. Основы резания металлов.....	137
11.2. Обработка на токарных станках	142
11.3. Обработка на сверлильных станках	143
11.4. Обработка на фрезерных станках	144
11.5. Обработка на строгальных и долбежных станках.....	145
11.6. Обработка на шлифовальных и отделочных станках.....	146
11.7. Точность и качество поверхности при обработке.....	148
12. СВАРКА, РЕЗКА И ПАЙКА.....	150
12.1. Сварка металлов плавлением.....	150
12.2. Сварка металлов давлением	157
12.3. Термическая резка и пайка металлов.....	162
13. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	170
13.1. Электрофизические способы.....	170
13.2. Электрохимические способы.....	171
14. ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ...	174
14.1. Выбор материала.....	174
14.2. Основные направления экономии материалов	175
ЛИТЕРАТУРА.....	177
ОГЛАВЛЕНИЕ.....	178

**Евгений Петрович Чинков
Андрей Геннадьевич Багинский**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Научный редактор

кандидат технических наук, доцент А. Г. Мельников

Подписано к печати.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Плоская печать. Усл. печ. л. . Уч. -изд. л.

Тираж экз. Заказ . Цена свободная.

Издательство ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.