

Федеральное агентство по образованию

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет)**

Кафедра теоретических основ материаловедения

**М. М. СЫЧЕВ, С. И. ГРИНЕВА, В.Н. КОРОБКО,
Т.В. ЛУКАШОВА, С.В. МЯКИН, В.В. БАХМЕТЬЕВ**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие для студентов
заочной формы обучения

Санкт-Петербург
2008

УДК 669.017:620.093

Сычев М.М. Материаловедение. Технология конструкционных материалов [Текст]: Учебное пособие / С.И. Гринева, В.Н. Коробко, Т.В. Лукашова, С.В. Мякин, В.В. Бахметьев. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2008. – 180 с.

В учебном пособии кратко изложены взаимосвязи химического состава и структуры материалов с их функциональными свойствами. Рассмотрены основные конструкционные материалы: стали, алюминиевые, медные и титановые сплавы, композиционные материалы. Приведены сведения по теории и видам химической и электрохимической коррозии. Изложены принципы и основные методы технологии обработки конструкционных материалов.

Учебное пособие предназначено для студентов 3 курса заочной формы обучения, изучающих дисциплину “Материаловедение. Технология конструкционных материалов” и соответствует рабочей программе дисциплины.

Ил. 85, таблиц 38, библи. 9.

Рецензенты:

1. Петербургского государственного университета путей сообщения. Кафедра “Инженерная химия и защита окружающей среды”. Л.Б.Сватовская, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой.
2. С.С.Орданьян, д-р техн.наук, профессор, зав.кафедрой химической технологии тонкой технической керамики СПбГТИ(ТУ).

Утверждено на заседании методической комиссии общеинженерного отделения 07.04.08.

Рекомендовано к изданию РИСо СПбГТИ(ТУ)

ВВЕДЕНИЕ

При конструировании и изготовлении машин и приборов, их эксплуатации и ремонте инженер-технолог сталкивается с конструкционными материалами и их использованием.

Материаловедение – область знаний, в которой рассматриваются закономерности, связывающие состав и структуру материалов с их эксплуатационными характеристиками, а также возможные изменения свойств материалов в процессе их работы. Поэтому важно знать не только конкретные свойства материалов, но и освоить методы и принципы их регулирования.

Одной из важнейших проблем в промышленности, особенно химической является борьба с коррозией с целью обеспечения бесперебойной работы аппаратов и машин в реальных условиях эксплуатации. Защита металлов от коррозии в значительной мере предотвращает вывод из строя оборудования, приборов, сооружений.

Технология конструкционных материалов является дисциплиной, включающей основные сведения о способах производства этих материалов, методах их обработки с целью их использования в машинах и различных конструкциях.

Данное учебное пособие соответствует программе курса «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» для химико-технологических специальностей и предназначения для студентов заочной формы обучения. Для связи с преподавателями кафедры теоретических основ материаловедения СПбГТИ(ТУ) по вопросам связанным с решением контрольных работ и др.:

Тел. (812) 495-75-24

e-mail: tom-spbgti@narod.ru

Дополнительную информацию можно найти на сайте кафедры по адресу: <http://tom-spbgti.narod.ru/>

1 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Материаловедение – это наука, устанавливающая связь между составом, структурой и свойствами материалов и изучающая закономерности их изменения при тепловых, химических, механических, электрических и других воздействиях. **Целью** материаловедения является создание материалов с заданными свойствами. Основные **задачи** материаловедения:

- изучение связи химического состава и структуры материала с его свойствами (физика, химия, физическая химия);
- разработка методов направленного изменения состава и строения материала с целью улучшения комплекса служебных характеристик изделия (технология);
- рекомендация выбора материала для конкретного назначения (конструирование).

1.1 Классификация материалов

1 Металлы и сплавы, которые подразделяются на:

1.1 Черные металлы и сплавы. К ним относятся сплавы железа с углеродом – стали и чугуны.

1.2 Цветные металлы и сплавы (дюралю, латуни, бронзы и др.).

1.3 Тугоплавкие металлы (Ti, Nb, Mo, W, Ta и др.).

2 Неметаллические неорганические материалы:

2.1 Материалы на основе оксидов (Al_2O_3 , SiO_2 и др.).

2.2 Силикатные материалы (керамика, стекло, вяжущие и др.).

2.3 Тугоплавкие соединения (карбиды, нитриды, бориды и др.).

2.4 Халькогениды (сульфиды, селениды, теллуриды и др.).

2.5 Элементарные материалы (кремний, бор, графит и др.).

3 Неметаллические органические материалы: пластмассы, резина, лакокрасочные материалы. Подразделяются по принципу получения, методу изготовления, типу наполнителя, физико-механическим свойствам связующего вещества, применению.

4 Композиционные материалы:

4.1 На основе неорганических соединений (металлокерамика, стеклокерамика и др.).

4.2 На основе органических соединений (химволокно и смолы).

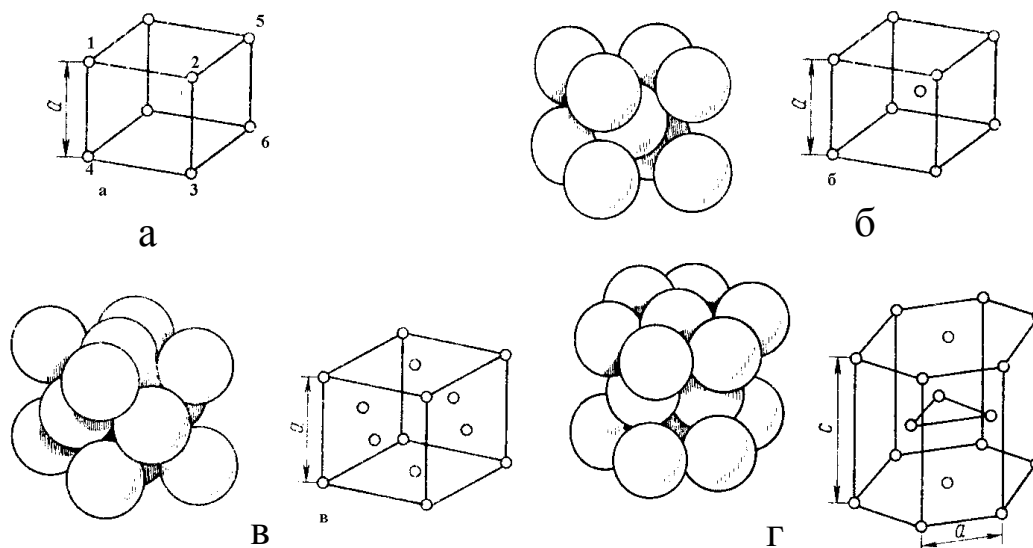
4.3 Смешанные композиционные материалы (стеклопластик).

1.2 Природа химической связи, образование и строение твердых веществ

Кристаллические твердые тела имеют определенный, закономерный порядок расположения атомов, образующих в пространстве **кристаллическую решетку** данного вещества (рисунок 1), в то время как аморфные тела имеют хаотическое, произвольное расположение атомов (стекла, некоторые полимеры, аморфный кремний).

Кристаллическая решетка характеризуется **координационным числом** K – числом атомов, находящихся на наиболее близком и равном расстоянии от данного, а также расстоянием между ближайшими атомами. Координационное число K характеризует плотность кристаллической решетки (плотность упаковки атомов). Некоторые типы кристаллических решеток: простая кубическая (п.к., $K=6$, рисунок 1 а), объемцентрированная кубическая (о.ц.к., $K=8$, рисунок 1 б), гранецентрированная кубическая (г.ц.к., $K=12$, рисунок 1 в), гексагональная плотноупакованная (г.п.у., $K=12$, рисунок 1 г). Расстояние между ближайшими атомами как правило находится в пределах $1...10 \text{ \AA}$ (\AA – ангстрем, равен 10^{-10} м). При сближении атомов возникают силы притяжения между положительно заряженными ядрами одних атомов и электронами других, а также силы отталкивания между ядрами и между электронами. Силы отталкивания растут быстрее, чем силы притяжения, и атомы при образовании кристалла располагаются на таком расстоянии друг от друга r_0 , когда силы уравновешиваются.

ваются. Поэтому, атомы в кристалле занимают строго определенные положения (точнее совершают вокруг них колебания), образуя кристаллическую решетку.



а – простая кубическая; б – объемноцентрированная кубическая; в – гранецентрированная кубическая; г – гексагональная плотноупакованная

Рисунок – 1 Типы кристаллических решеток

В первом приближении кристаллы образуются за счет трех основных типов химической связи – ионной, ковалентной и металлической, хотя обычно существует некоторая комбинация этих типов.

Ионные кристаллы. Кристаллы с **ионной связью** образуют элементы с сильно различающимися электроотрицательностями (способность атома в молекуле притягивать к себе электроны). Типичные представители – галогениды щелочных металлов (NaCl , CsF). Ионный кристалл в идеализированном представлении состоит из положительно и отрицательно заряженных ионов (например, Na^+ и Cl^-). Устойчивость ионных кристаллов обеспечивается в основном за счет электростатического (кулоновского) притяжения между катионами и анионами. Ионная связь ненаправленная (все ионы взаимодействуют со всеми) и ненасыщенная, поэтому у ионных кристаллов высокие координационные числа, т.е. плотнейшее расположение атомов. Ионные кристаллы хрупкие. Энергия ионного кристалла равна сумме энергий электростатического взаимодействия всех составляющих ее ионов друг с другом. Она зависит от зарядности ионов, межатомных расстояний и типа кристаллической решетки. Взаимное расположение ионов и координационное число ионной решетки определяется соотношением эффективных радиусов составляющих ее ионов.

Ковалентные кристаллы. Ковалентная связь формируется между атомами при обобществлении ими электронов с образованием общей электронной пары. Типичными представителями кристаллов с ковалентной связью являются алмаз и соединения $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ (BN , ZnS). Ковалентная связь направленная, насыщаемая. Ковалентные кристаллы имеют как правило малую плотность, хрупкие и в ряде случаев очень твердые (нитриды, карбиды). Энергия кова-

лентных кристаллов равна сумме всех энергий разрыва связей между атомами, составляющими кристалл. Длина ковалентной связи зависит от ее кратности, а тип кристаллической решетки и координационное число – от гибридизации.

Металлические кристаллы. Металлическая связь возникает при взаимодействии атомов электроположительных элементов, внешние валентные электроны которых относительно слабо связаны с ядром. При образовании металлического кристалла валентные электроны отрываются от атомов и металл представляет собой остов из положительно заряженных ионов, между которыми движутся свободные электроны (так называемый “электронный газ”). Металлическая связь ненаправленная и ненасыщенная, поэтому металлы как правило имеют плотноупакованные решетки (г.ц.к., о.ц.к., г.п.у.). Энергия металлического кристалла равна энергии необходимой для перемещения всех коллективизированных электронов в кристалле обратно на уровни, соответствующие свободным атомам. Особенности строения металлов определяют их характерные свойства: высокая электропроводность и теплопроводность за счет большого количества свободных электронов; пластичность (так как электроны не принадлежат конкретным атомам, сдвиг одних атомов относительно других при деформации не вызывает разрыва связей и разрушения металла). Уникальное сочетание высокой прочности с хорошей пластичностью, вязкостью и обрабатываемостью, не встречающееся у других материалов являются причиной широкого использования металлов и сплавов в качестве основного конструкционного материала.

Полиморфные превращения. Полиморфизм – это способность некоторых веществ в зависимости от внешних условий (например, температуры) образовывать различные кристаллические структуры (модификации). В результате полиморфного превращения атомы кристаллического вещества перестраиваются из кристаллической решетки одного типа в кристаллическую решетку другого типа. Полиморфные модификации обозначают греческими буквами α , β , γ , причем α соответствует самой низкотемпературной модификации. Например, железо ниже температуры 911°C имеет о.ц.к. решетку и обозначается Fe_{α} . Выше 911°C железо перестраивается в г.ц.к. решетку Fe_{γ} , которая выше 1392°C вновь перестраивается в о.ц.к. решетку, обозначаемую Fe_{δ} . При полиморфных превращениях изменяются объем и свойства вещества.

1.3 Кристаллизация металлов и сплавов

Переход металла из жидкого или парообразного состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется *первичной кристаллизацией*. Образование новых кристаллов в твердом кристаллическом веществе называется *вторичной кристаллизацией*.

Процесс кристаллизации состоит из двух одновременно идущих процессов: зарождения и роста кристаллов. Кристаллы могут зарождаться (самопроизвольная кристаллизация) или расти на имеющихся готовых центрах кристаллизации (несамопроизвольная кристаллизация).

Самопроизвольная кристаллизация обусловлена стремлением вещества иметь более устойчивое состояние, характеризующееся уменьшением термодинамического потенциала, называемого *свободной энергией* F :

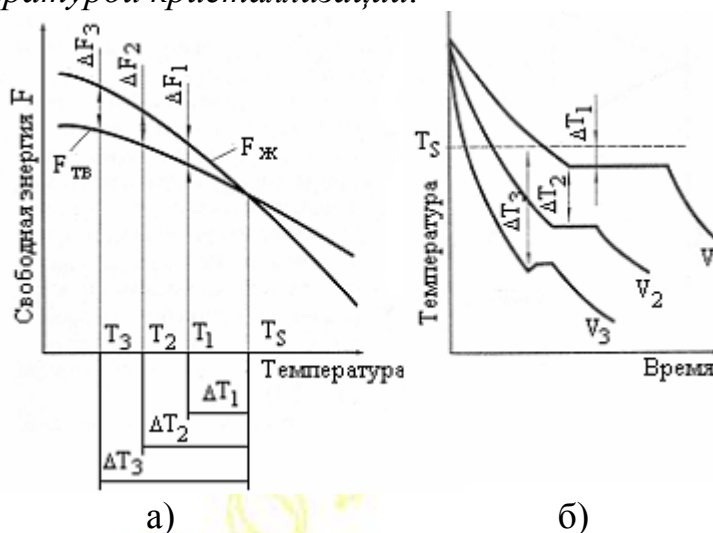
$$F = U - TS, \quad (1)$$

где U – внутренняя энергия; T – температура; S – энтропия.

С повышением температуры свободная энергия вещества, как в твердом, так и в жидком состоянии уменьшается (рисунок 2 а).

Температура, при которой свободная энергия в твердом и жидком состояниях равна, называется *равновесной*. Кристаллизация происходит в том случае, если $F_{\text{ТВ}}$ в твердом состоянии будет меньше $F_{\text{Ж}}$ в жидком состоянии, то есть при переохлаждении жидкого металла до температуры ниже равновесной $\Delta F = F_{\text{ТВ}} - F_{\text{Ж}} < 0$.

Плавление – процесс, обратный кристаллизации – происходит при перегреве выше равновесной температуры. Разница между реальными температурами плавления и кристаллизации называется *температурным гистерезисом*. Температура, при которой практически начинается кристаллизация, называется *фактической температурой кристаллизации*.



- а) Влияние температуры на свободную энергию жидкой и твердой фаз;
 б) Кривые охлаждения металла при кристаллизации:
 $V_1 < V_2 < V_3$ (V – скорость охлаждения).

Рисунок 2 – Энергетические условия процесса кристаллизации

Величиной или *степенью переохлаждения* называют разность между теоретической (T_s) и фактической температурами кристаллизации: ΔT (рисунок 2). Обычная степень переохлаждения металлов, при кристаллизации в производственных условиях колеблется от 10 до 30°C; при больших скоростях охлаждения она может достичь сотен градусов. Степень перегрева при плавлении металлов обычно невелика (несколько градусов).

У некоторых металлов из-за большого переохлаждения скрытая теплота плавления выделяется в первый момент кристаллизации настолько бурно, что температура скачкообразно повышается, приближаясь к теоретической.

Чем больше скорость охлаждения, тем больше величина переохлаждения. Для того чтобы полностью переохлаждать металл в жидком состоянии, требуются большие скорости охлаждения (миллион градусов в секунду). Металл, не имеющий кристаллическую структуру, можно получить, переохладив его за доли секунды. Такой металл называется *аморфным* или *металлическим стеклом*.

При кристаллизации выделяется теплота. Когда кристаллизуется чистый элемент, отвод тепла, происходящий вследствие охлаждения, компенсируется выделяющейся скрытой теплотой кристаллизации. Поэтому на кривой охлаждения, изображаемой в координатах «температура-время», процессу кристаллизации соответствует горизонтальный участок (рисунок 2 б).

В жидком состоянии атомы вещества вследствие теплового движения перемещаются беспорядочно. В то же время в жидкости имеются сравнительно устойчивые группировки атомов небольшого объема. Эти группировки неустойчивы, распадаются и вновь появляются в разных местах жидкости. При переохлаждении жидкости некоторые из них, наиболее крупные, становятся устойчивыми и способными к росту. Эти устойчивые группировки атомов называются *центрами кристаллизации (зародышами)*.

Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей, а затем растет их число и размеры. При переохлаждении сплава ниже температуры плавления во многих участках жидкого сплава образуются кристаллические зародыши, называемые *критическими*. Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они имеют более или менее правильную геометрическую форму. Однако при столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается, так как на этих участках рост граней прекращается, и после затвердевания зерна (кристаллиты) получают неправильную внешнюю форму.

Появление зародышей изменяет свободную энергию. С одной стороны при переходе жидкости в кристаллическое состояние свободная энергия уменьшается, с другой – она увеличивается вследствие появления поверхности раздела между жидкостью и зародышем.

Превращение произойдет тогда, когда выигрыш в энергии от перехода в более устойчивое состояние будет больше потери энергии, идущей на образование поверхности раздела. Свободная энергия системы определяется как сумма двух членов, характеризующих поверхностную и объемную энергии соответственно:

$$\Delta\Phi = S\sigma - V\Delta F, \quad (2)$$

где S – площадь поверхности; σ – поверхностное натяжение; V – объем; ΔF – разность свободных энергий жидкого и кристаллического состояний, приходящаяся на единицу объема. Подставив в формулу (2) значения S и V , получаем, что по мере увеличения зародыша (сферической формы) свободная энергия $\Delta\Phi$ изменяется следующим образом:

$$\Delta\Phi = 4\pi r^2 n\sigma - 3/4 \pi r^3 n\Delta F, \quad (3)$$

где r – радиус частицы новой фазы; n – число частиц.

Функция $\Delta\Phi$ имеет максимум (рисунок 3). Зародыш будет расти, если его радиус $r \geq r_{кр}$, так как увеличение размера зародыша приведет к уменьшению $\Delta\Phi$. Таким образом, для данной степени переохлаждения имеется некоторый зародыш критического размера $r_{кр}$. Все зародыши большего размера будут центрами кристаллизации, а зародыши меньшего размера окажутся неустойчивыми и вновь рассасываются в жидкости. Критический размер связан с термодинамическими параметрами зависимостью: $r_{кр} = 2\sigma / \Delta F$.

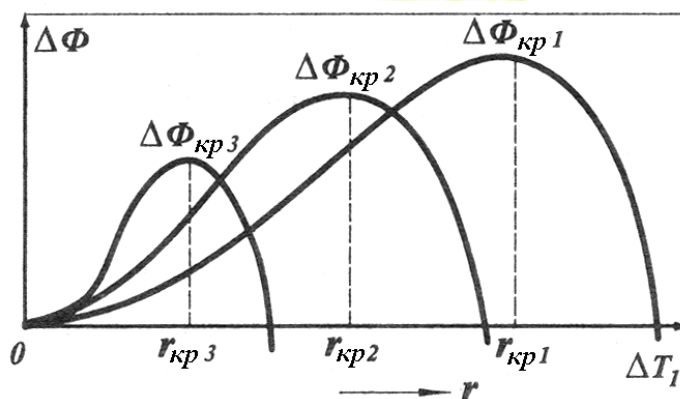


Рисунок 3— Зависимость $\Delta\Phi$ от r для различных степеней переохлаждения: $\Delta T_3 > \Delta T_2 > \Delta T_1$

В реальных условиях процессы кристаллизации в значительной степени зависят от имеющихся готовых центров кристаллизации. Такими центрами могут быть твердые частицы разнообразных примесей, стенки формы для литья. Особенно эффективны частицы таких веществ, которые по своему кристаллическому строению похожи на затвердевающий металл. Это сходство проявляется при близком соответствии расположения атомов на определенных плоскостях решеток металла и примеси. Растворенные примеси в металле способствуют увеличению количества центров кристаллизации, если примеси будут поверхностно-активными веществами, понижающими поверхностное натяжение. В этом случае уменьшается критический размер зародыша, что эквивалентно увеличению степени переохлаждения.

Расплавленные металлы, как правило, кристаллизуются без значительного переохлаждения. Для кристаллизации из расплава необходимо выполнить два условия:

- охладить расплав ниже температуры равновесной кристаллизации;
- создать в расплаве один или несколько центров кристаллизации.

Следует создать особые условия, чтобы жидкость затвердела в один монокристалл с идеальной структурой, чаще результатом кристаллизации являются поликристаллы.

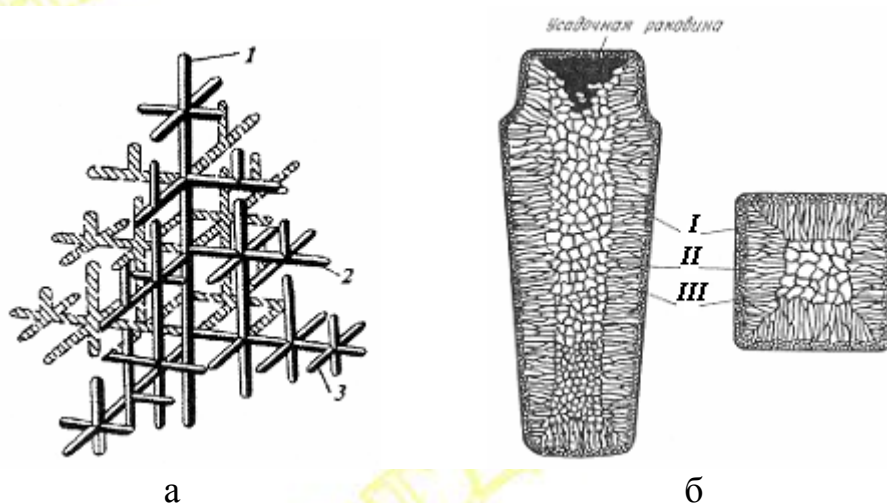
Форма зерен, образующихся при кристаллизации, зависит от условий их роста, главным образом от скорости и направления отвода тепла и температуры жидкого металла, а также примесей. В направлении отвода теплоты кристалл растет быстрее, чем в другом направлении. В результате образуется древовидный кристалл, так называемый *дендрит* (рисунок 4 а).

Дендритное строение типично для литого металла. Наибольшая скорость роста кристаллов наблюдается по таким плоскостям и направлениям решетки, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомов. В результате вырастают длинные ветви, которые называются *осями первого порядка*. Затем на этих осях появляются, и начинают расти ветви второго порядка и т.д.

Одновременно идет кристаллизация в участках между осями дендритов. Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся друг с другом. После этого окончательно заполняются межосные пространства, и дендриты превращаются в полновесные кристаллы с неправильной внешней огранкой (зерна). На границах между зернами в участках между осями дендритов накапливаются примеси, появляются поры из-за усадки и трудностей подхода жидкого металла к фронту кристаллизации.

Дендритообразование характерно для веществ, мало склонных к переохлаждению и имеющих большую скорость кристаллизации. В противном случае от центров кристаллизации равномерно по всем направлениям растут кристаллические иголки, образуя так называемые сферолиты.

Структура любого слитка состоит из трех основных зон (рисунок 4б).



1- ось первого порядка; 2 - ось второго порядка; 3 - ось третьего порядка;

Рисунок 4 – Схема дендритного роста кристалла (а) и строение слитка спокойной стали (б)

Первая зона (I) – наружная мелкозернистая корка, состоящая из дендритов, образуемая таковой из-за соприкосновения со стенками изложницы (формы).

Вторая зона слитка (II)– зона столбчатых кристаллов. После образования корки условия теплоотвода меняются, градиент температуры в прилегающем слое жидкого металла резко уменьшается и, следовательно, уменьшается степень переохлаждения сплава. В результате из небольшого числа центров кри-

сталлизации начинают расти нормально ориентированные к поверхности корки (то есть в направлении отвода теплоты) столбчатые кристаллы.

Третья зона слитка (**III**) – зона равноосных кристаллов. В центре слитка уже нет определенной направленности отдачи тепла. В результате в середине слитка, где наблюдается наименьшая степень переохлаждения, образуются равноосные кристаллы больших размеров. При некоторых условиях третья зона полностью исчезает. Структура слитка практически состоит из одних столбчатых кристаллов и называется транскристаллической.

В верхней части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь, концентрируется усадочная раковина. Под ней металл получается рыхлым, в нем содержится много усадочных пор. Часть слитка с усадочной раковиной и рыхлым металлом отрезают. Слиток имеет неоднородный состав. Химическая неоднородность по отдельным зонам слитка называется зональной ликвацией. Она отрицательно влияет на механические свойства.

1.4 Диффузионные процессы в металле

Внутреннее строение твердого тела не является статичным, атомы не закреплены неподвижно на своих местах в кристаллической решетке, они непрерывно колеблются и могут перемещаться из своих положений равновесия в узлах решетки. Процесс преимущественной однонаправленности перемещения атомов, в итоге приводящий к макроскопическому переносу вещества, называется диффузией.

Любые процессы зарождения и роста фаз, рекристаллизация, коагуляция и сфероидизация, фазовые превращения в твердом растворе, распад твердых растворов и выделение второй фазы связаны с диффузией атомов.

Диффузия в сплавах представляет собой перенос разнородных атомов, который сопровождается изменением концентрации компонентов в отдельных зонах. Самодиффузией называют перемещение атомов одного и того же типа в чистых металлах или основного компонента – в сплавах.

Диффузия атомов внедрения с малым атомным радиусом, например углерода в решетке железа, осуществляется межузельным путем. Этот процесс довольно легко реализуется благодаря тому, что число внедренных атомов в решетке мало по сравнению с числом междоузлий.

Для атомов металлов наиболее вероятен вакансионный механизм диффузии. Атом замещения легко меняет свое положение, если по соседству имеется свободная вакансия. Однако в регулярных узлах решетки число вакансий мало по сравнению с числом атомов, из-за чего диффузия атомов замещения затруднена. Для вакансионного механизма диффузии более благоприятная ситуация, складывается в искаженных узлах решетки: на границах зерен и фаз, а также на дислокациях.

При диффузии по обоим механизмам перемещающиеся атомы, чтобы протиснуться между атомами основного металла, разрушить связи и деформировать решетку, должны преодолеть потенциальный барьер. Для этого атомы должны обладать определенным уровнем энергии активации, который зависит от сил межатомной связи и наличия дефектов кристаллической решетки, облег-

чающих диффузионные процессы. В частности, необходимый уровень энергии активации по границам зерен вдвое меньше, чем в объеме зерна.

Согласно закону Фика (1855 г.), поток диффундирующего вещества в единицу времени через единицу поверхности пропорционален коэффициенту диффузии D (см²/с) и градиенту концентрации dC/dx :

$$I = -D \cdot \frac{dC}{dx} \cdot \left[\frac{\text{атом}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right]. \quad (4)$$

Знак минус в этом уравнении означает, что диффузионный поток направлен по градиенту концентрации, то есть от зоны с большей концентрации к зоне с меньшей концентрацией диффундирующего элемента.

Коэффициент диффузии, иногда называемый диффузионной подвижностью, определяет скорость диффузии при перепаде концентрации, равном единице, и зависит от химического состава сплава, строения кристаллической решетки, размеров зерен и температуры процесса. Наиболее сильное влияние оказывает температура. С.Аррениус установил экспоненциальную зависимость коэффициента диффузии от температуры:

$$D = D_0 e^{-Q/RT}, \quad (5)$$

где D_0 – экспериментально найденный предэкспоненциальный множитель, зависящий от сил связи между атомами; Q – энергия активации процесса диффузии; R – универсальная газовая постоянная; T – температура, К.

Процесс диффузии неодинаков для разных элементов. Сравнительно легкая диффузия углерода в железе и затрудненная – хрома приводит к тому, что в процессе образования карбидов Cr_{23}C_6 на границах зерен вовлекаются только приграничные атомы хрома. Границы зерен обедняются хромом, что приводит к межкристаллитной коррозии хромоникелевых аустенитных сталей.

Стабильность структуры и свойств жаропрочных сплавов достигается путем торможения процесса диффузии. Торможение диффузии, подобно торможению дислокаций, создается соответствующей неоднородностью структуры. Торможение диффузионных процессов в литой структуре инструментальных сталей создается при формировании развитого дендритного скелета с термически прочной междендритной фазой карбидов. Неоднородность структуры может затруднять развитие трещин за счет их многократного ветвления и изменения направлений благодаря блокировке на выделениях второй фазы.

1.5 Дефекты кристаллической решетки

Любой реальный кристалл имеет несовершенства строения, т.е. дефекты. По геометрическим признакам дефекты делятся на точечные, линейные, поверхностные, объемные.

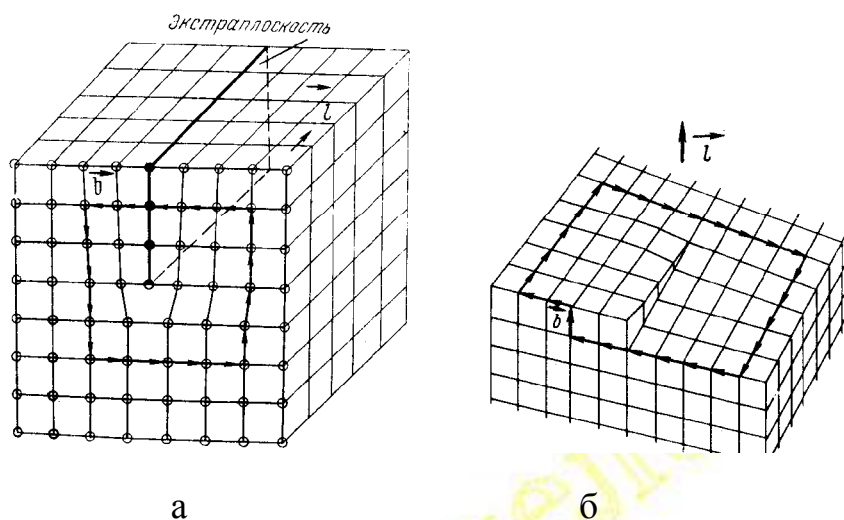
Точечные дефекты – это вакансии (узлы решетки, в которых отсутствуют атомы), атомы в междоузлии, а также атомы примесей в узлах или междоузлиях.

ях. Точечные дефекты нарушают периодичность расположения атомов в кристаллической решетке на одно или несколько межатомных расстояний.

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем и называются **дислокациями**. Дислокация может быть прямой (краевая) или изогнутой (винтовая) – рисунок 5. Образуются дислокации в процессе кристаллизации или пластической деформации. Дислокации могут перемещаться, образовывать скопления и исчезать при взаимодействии с точечными дефектами и друг с другом. Вокруг дислокации возникает зона упругого искажения решетки. Важной характеристикой дислокации является их плотность ρ , т.е. суммарная длина дислокаций $\sum L$, приходящаяся на единицу объема кристалла V :

$$\rho = \frac{\sum L}{V}, \quad \frac{\text{см}}{\text{см}^3} \quad (6)$$

Величина ρ может достигать миллиона километров на см^3 .



а – краевая; б – винтовая дислокация

Рисунок 5 - Дислокации в кристалле

Поверхностные дефекты – это границы зерен и поверхность самого кристалла. Они представляют собой переходную зону в 5...10 межатомных расстояний между зернами с разной кристаллографической ориентацией или между зерном и окружающей средой.

Объемные дефекты – это включения другого вещества, крупные трещины, микропустоты (каверны).

Теоретическая и техническая прочность. Под **теоретической прочностью** понимается сопротивление материала деформации и разрушению в предположении, что кристаллическая решетка не имеет дефектов.

Техническая прочность (реально измеряемая) как правило, значительно ниже теоретической за счет наличия дефектов – в основном дислокаций. Под действием сил сдвига дислокации способны перемещаться. На рисунке 6 показано, как под действием силы сдвига происходит разрыв связи 6-3 и образование связи 6-2, облегчающее сдвиг плоскости 1-2-3-4 относительно плоскости 5-

6-7 и приводящее к движению вакансии вправо. Перемещение вакансии способствует пластической деформации кристалла, при которой одна его часть сдвигается относительно другой без разрушения. На рисунке 7 представлена качественная зависимость между прочностью кристалла и плотностью дислокаций. Как видно из рисунка 7, повышение прочности возможно либо созданием бездефектной структуры, либо повышением плотности дислокаций и структурных препятствий, затрудняющих движение дислокаций. Участок 1 – теоретическая прочность кристалла без дефектов. Участок 2 – прочность нитевидных кристаллов (так называемых усов), почти не содержащих дефектов. При дальнейшем увеличении плотности дислокаций прочность падает до некоторого минимального значения на участке 3, соответствующего технически чистым неупрочненным металлам. Затем на участке 4 происходит увеличение прочности сплава за счет того, что образующиеся дислокации ориентированы в различных направлениях в пространстве и мешают друг другу перемещаться.

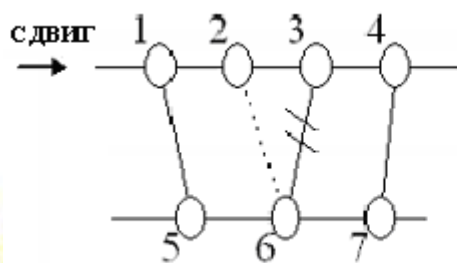


Рисунок 6 – Схема сдвиговой деформации (см. в тексте)

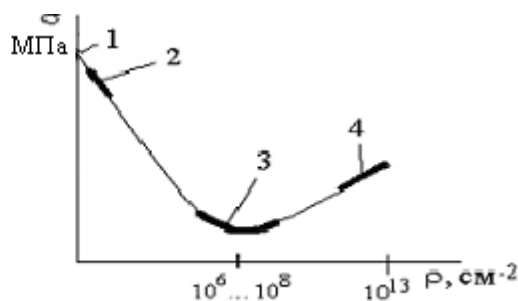


Рисунок 7 – Качественная зависимость прочности материала σ от плотности дислокаций ρ

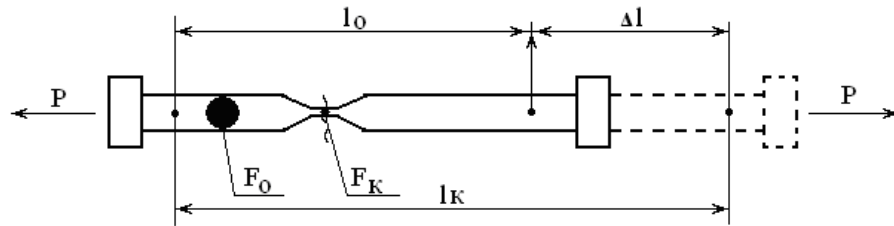
На этом явлении основаны все основные способы упрочнения металлов и сплавов – легирование, термическая обработка, деформационное упрочнение (наклеп) и др. При плотности дислокаций выше примерно 10^{13} см^{-2} (за участком 4) металл становится хрупким и в нем образуются трещины.

1.6 Механические свойства металлов

Упругая и пластическая деформация. Из большого количества свойств, которыми обладают материалы, важнейшими для конструкционных материалов являются механические свойства. Под ними понимают характеристики, определяющие поведение материала под действием приложенных внешних сил (статических, динамических, знакопеременных). Характеристики механических свойств определяются при испытаниях материалов на растяжение, сжатие, кручение, ударную вязкость и др., предусмотренных ГОСТами. По полученным характеристикам можно судить о таких свойствах материала как прочность, пластичность, вязкость, твердость и др.

Прочность – свойство материалов сопротивляться разрушению или пластической деформации под действием внешней нагрузки. Наиболее простым и распространенным методом определения прочности материала является испы-

тание его на растяжение (рисунок 8). Концы образца металла круглого сечения зажимают в разрывной машине и подвергают действию растягивающей нагрузки P .



l_0 - начальная длина; F_0 - начальная площадь поперечного сечения;
 Δl - удлинение; l_k - конечная длина образца в момент разрыва;
 F_k - площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Рисунок 8 – Метод определения прочности на растяжение

Диаграмму растяжения можно построить в координатах «нагрузка P – удлинение Δl » или в координатах «напряжение σ - относительная деформация ε ». $\sigma = P / F_0$ а $\varepsilon = \Delta l / l_0 \cdot 100\%$ (рисунок 9).

Под действием нагрузки в материале возникают деформации. Деформацией называется изменение размеров и формы тела, она может быть упругой и пластической. Упругой называют деформацию, влияние которой на форму, структуру и свойства тела полностью устраняется после прекращения действия внешней силы P . На рисунке 9 упругая деформация характеризуется прямолинейным участком OA . При упругой деформации изменяется расстояние между атомами в кристаллической решетке. При снятии нагрузки атомы становятся на прежние места и деформация исчезает.

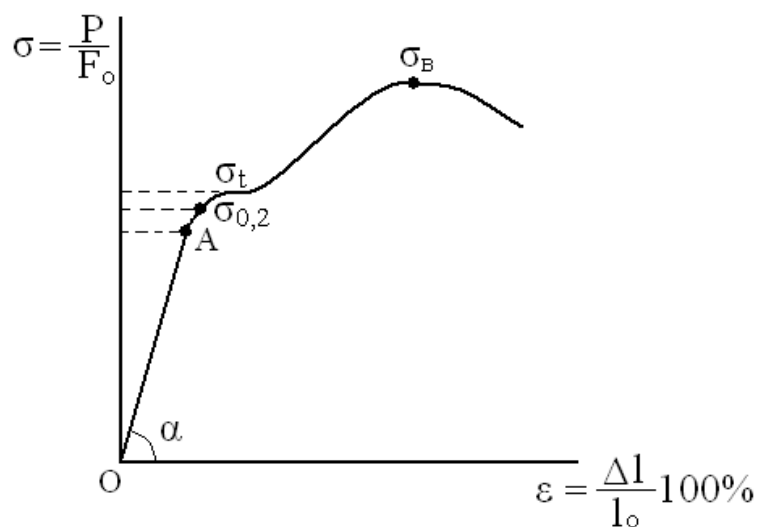


Рисунок 9 - Диаграмма растяжения

Оценить свойства материала в пределах упругих деформаций можно с помощью коэффициента, получившим название модуля упругости E (Гука). Это отношение напряжения к вызванной им деформации:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ [МПа]}. \quad (7)$$

Значение модуля упругости определяется силами межатомного взаимодействия, оно постоянно и характеризует *жесткость* материала. Чем меньшую деформацию вызывает напряжение, тем выше жесткость. Угол α на диаграмме есть геометрическое выражение жесткости и модуля упругости. Чем угол больше, тем выше жесткость материала.

Пластическая деформация наступает, когда напряжение превышает предел упругости (выше точки А) и после снятия нагрузки форма, структура и свойства тела не восстанавливаются полностью, т.е. имеет место остаточная деформация.

На практике напряжение, при котором начинается пластическая деформация, оценивается *пределом текучести* σ_t . Его легко определить, если на диаграмме растяжения имеется площадка текучести (горизонтальный участок). Однако, многие материалы имеют диаграмму растяжения без площадки текучести (медь, латуни, алюминий и др.), тогда за предел текучести принимают напряжение, которое вызывает остаточное удлинение 0,2 % и обозначают $\sigma_{0,2}$. σ_t называют физическим, а $\sigma_{0,2}$ условным пределом текучести. Предел текучести используют в качестве одного из показателей прочности материала.

Напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению, называется *временным сопротивлением* (σ_b) или чаще *пределом прочности*, оно измеряется в МПа. На рисунке 9 это максимальная точка на кривой σ - ε .

При пластической деформации часть кристалла сдвигается относительно другой части. Если нагрузку снять, то перемещенная часть кристалла не возвратится на старое место, деформация сохранится.

Под *пластичностью* понимают свойство твердых материалов изменять без разрушения форму и размеры под влиянием внешней нагрузки или внутренних напряжений, устойчиво сохраняя образовавшуюся форму и размеры после прекращения этого влияния.

Пластичность материала характеризуется:

- относительным удлинением $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%$, (8)

- относительным сужением $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%$. (9)

Способность металла пластически деформироваться является его важнейшим и полезнейшим свойством. Это свойство используется при изготовлении деталей гибкой, вытяжкой, штамповкой и т.д. Большое значение это свойство имеет и для повышения надежности металлических конструкций. Если у материала способность к пластическому деформированию низка, то он в изделиях склонен к внезапным хрупким разрушениям.

Сопротивление материала разрушению при динамических нагрузках характеризует *ударная вязкость*. Ее определяют как удельную работу разрушения призматического образца с концентратором (надрезом) посередине одним ударом маятникового копра: $a_n = A/F_o$ (A - работа разрушения; F_o – площадь поперечного сечения образца в месте концентратора).

Наиболее простым методом испытания механических свойств является измерение твердости. *Твердостью* называют свойство материала оказывать сопротивление деформированию или разрушению при местном воздействии. Различают следующие методы определения твердости вдавливанием: по Бринеллю НВ (по диаметру отпечатка шарика – рисунок 10); по Роквеллу (по глубине вдавливания алмазного конуса (HRC, HRA) или закаленного шарика (HRB)); по Виккерсу HV (по диагонали отпечатка алмазной пирамиды). Твердость также измеряется методом склерометрии (царапание поверхности), ультразвуковым методом, динамическими методами и др.

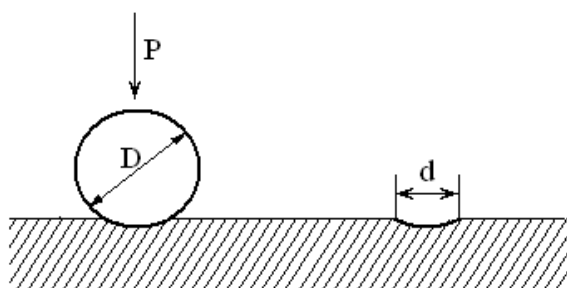


Рисунок 10 – Схема измерения твердости по Бринеллю

Число твердости по Бринеллю характеризуется отношением нагрузки, действующей на шарик, к площади поверхности отпечатка:

$$HB = \frac{P}{F} = P / \left[\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \right], \quad [\text{МПа}] \quad (10)$$

где P - нагрузка на шарик, Н; F - площадь поверхности отпечатка, м^2 ; D – диаметр вдавливаемого шарика, м^2 ; d - диаметр отпечатка, м^2 .

Для многих материалов временное сопротивление σ_b и число твердости по Бринеллю НВ связаны между собой пропорциональностью, поэтому, измерение твердости позволяет судить о прочности материала.

1.7 Наклеп

Металл в процессе пластического деформирования упрочняется до так называемого временного предела прочности σ_b , затем разрушается. Такое упрочнение называется *наклепом* или *нагартовкой*. Оно может происходить при холодной пластической деформации (растяжении, сжатии, изгибе и т.п.). Так, например, согнуть гвоздь значительно легче, чем выправить. После изгиба металл гвоздя упрочняется, но после многократного перегиба наступает разрушение.

Степень холодной пластической деформации (степень наклепа) можно выразить через коэффициент:

$$f = \frac{F_0 - F}{F_0} 100\%, \quad (11)$$

где F_0 - площадь сечения до деформации; F - площадь сечения после деформации.

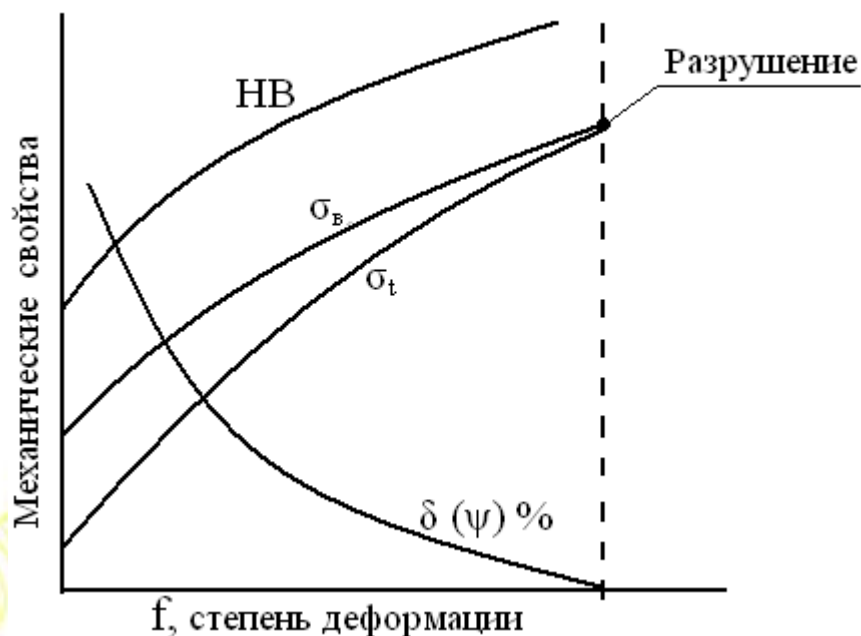


Рисунок 11 – Качественная зависимость между степенью деформации и свойствами низкоуглеродистой стали

При пластическом деформировании увеличиваются прочностные характеристики (HV , σ_b , σ_t) и понижается пластичность $\delta (\psi) \%$ (рисунок 11).

С увеличением степени деформации предел текучести растет быстрее предела прочности. Обе характеристики у сильно наклепанного металла сравниваются, а удлинение становится равным нулю. Такое состояние наклепанного металла является предельным и металл разрушается. Это явление можно объяснить теорией дислокаций.

Пластическое деформирование приводит к искажению кристаллической решетки, деформации зерен и к увеличению плотности дислокаций. Это вначале приводит к торможению дислокаций и повышению прочности и снижению пластичности, а когда плотность дислокаций возрастет на столько, что многие из них начинают сливаться друг с другом, образуя микротрещины, материал разрушается (рисунки 7, 11). Путем наклепа твердость и временное сопротивление материала удастся повысить в 1,5-3 раза, а предел текучести в 3-7 раз.

Наклеп (нагартовка) находят широкое применение в машиностроении. Создавая наклеп на поверхности материала (обдувкой дробью или накаткой) повышают усталостную прочность изделий. Протягивая проволоку через калиброванное отверстие (фильеру) и создавая наклеп по всему сечению, удастся значительно повысить ее прочность. Этот способ, получивший название волочение, использовался с давних времен при изготовлении музыкальных струн.

Влияние нагрева на структуру и свойства наклепанного металла. В результате наклепа повышается плотность дислокаций до $10^9 - 10^{12} \text{ см}^{-2}$, деформируются зерна (как правило, вытягиваются в направлении деформации). Наклеп приводит металл в структурно неустойчивое состояние.

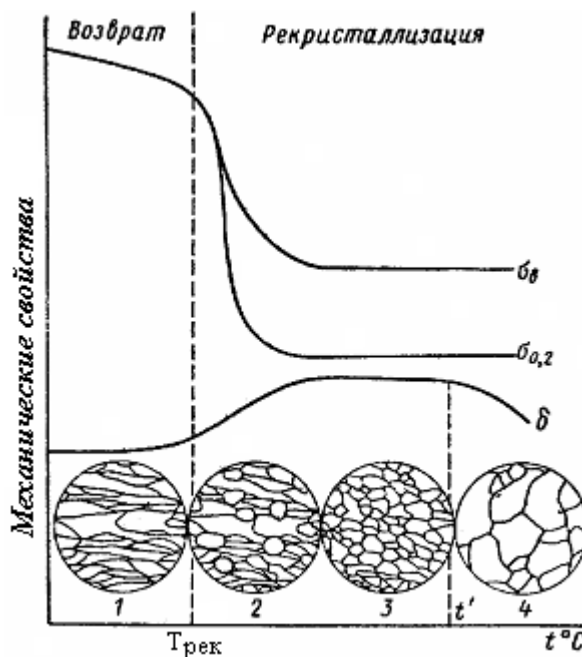
При нагреве в наклепанном металле протекают процессы *возврата и рекристаллизации*. При нагреве до сравнительно низких температур, обычно до $0,2-0,3 T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ - абсолютная температура плавления металла) начинается процесс *возврата*, под которым понимают повышение структурного совершенства наклепанного металла: уменьшение вакансий, перераспределение и уменьшение дислокаций, снятие внутренних напряжений, устранение искажения решетки. Заметных изменений под оптическим микроскопом в структуре металла не наблюдается. Прочность и пластичность изменяются незначительно (рисунок 12).

При дальнейшем повышении температуры, до $T_{\text{рек}}$, в деформированном металле образуются и растут зародыши новых зерен с неискаженной решеткой. Старое зерно при этом не восстанавливается. Образование новых зерен с последующим их ростом при нагреве называется *рекристаллизацией*.

Наименьшая температура начала рекристаллизации $T_{\text{рек}}$ называется *температурным порогом рекристаллизации*. Эта температура не является постоянной физической величиной. Она зависит от степени предварительной деформации, величины зерна до деформации, от длительности нагрева и др. факторов.

Рекристаллизация наступает лишь после деформации, степень которой превосходит определенную минимальную величину, называемую *критической степенью деформации*. Критическая степень деформации невелика – для железа и меди $\sim 5\%$, для алюминия $\sim 2\%$.

Температурный порог рекристаллизации составляет некоторую долю от температуры плавления металла: $T_{\text{рек}} = k \cdot T_{\text{пл}}$, где $k = 0,5-0,6$ для сплавов; $k = 0,3-0,4$ для металлов технической чистоты; $k = 0,1-0,2$ для чистых металлов. Это позволяет в первом приближении определить температуру начала первичной рекристаллизации. Заканчивается первичная рекристаллизация образованием новых зерен во всем объеме металла. С повышением температуры и с течением времени происходит слияние и рост зерен. Эта стадия называется *собирательной рекристаллизацией*. Чем выше температура нагрева, тем более крупными окажутся зерна.



1- возврат; 2, 3 – первичная рекристаллизация;
4 - собирательная рекристаллизация

Рисунок 12 – Влияние нагрева на механические свойства и структуру наклепанного металла

Рекристаллизация полностью снимает наклеп, созданный при холодной пластической деформации. Металл приобретает равновесную структуру с минимальным количеством дефектов кристаллического строения, восстанавливаются все физические и механические свойства.

Для полного снятия наклепа металл нагревают до более высоких температур, чтобы обеспечить высокую скорость рекристаллизации и полноту ее протекания. Такая термическая обработка получила название рекристаллизационный отжиг. Так, для стали температура рекристаллизации 450°C , а рекристаллизационный отжиг проводят при $600-700^{\circ}\text{C}$.

При холодной листовой штамповке глубоких сосудов (стаканов, гильз) прибегают к многократным штамповкам и рекристаллизационным отжигам. Так, например, при изготовлении артиллерийской гильзы из листовой латуни проводят около десяти последовательных штамповок и рекристаллизационных отжигов.

Холодная и горячая обработка. При пластическом деформировании выше температуры рекристаллизации хоть и идет упрочнение металла, но это упрочнение устраняется за доли секунд проходящим процессом рекристаллизации. Такая обработка, при которой нет упрочнения (наклепа), называется *горячей обработкой давлением*. Обработка давлением ниже температуры рекристаллизации, при которой образуется наклеп, называется *холодной обработкой давлением*. Температура рекристаллизации свинца и олова приблизительно равна комнатной температуре. Поэтому при деформации свинца при комнатной температуре не происходит наклепа. Обработку свинца при комнатной темпе-

ратуре следует отнести к горячей обработке, а обработка деталей из стали при 400°С – относится к холодной обработке.

Размер зерна. Металлы и сплавы, имеющие мелкое зерно, обладают повышенной прочностью, пластичностью и высокими упругими свойствами. Размер зерна зависит, кроме того от химического состава сплава, размера исходного зерна, наличия нерастворимых примесей в сплаве и других факторов. При данной степени деформации с повышением температуры и при увеличении продолжительности отжига размер зерна возрастает. При низких температурах образование рекристаллизационного зерна происходит не сразу, а через некоторый отрезок времени – так называемый инкубационный период 01, 02 (рисунок 13).

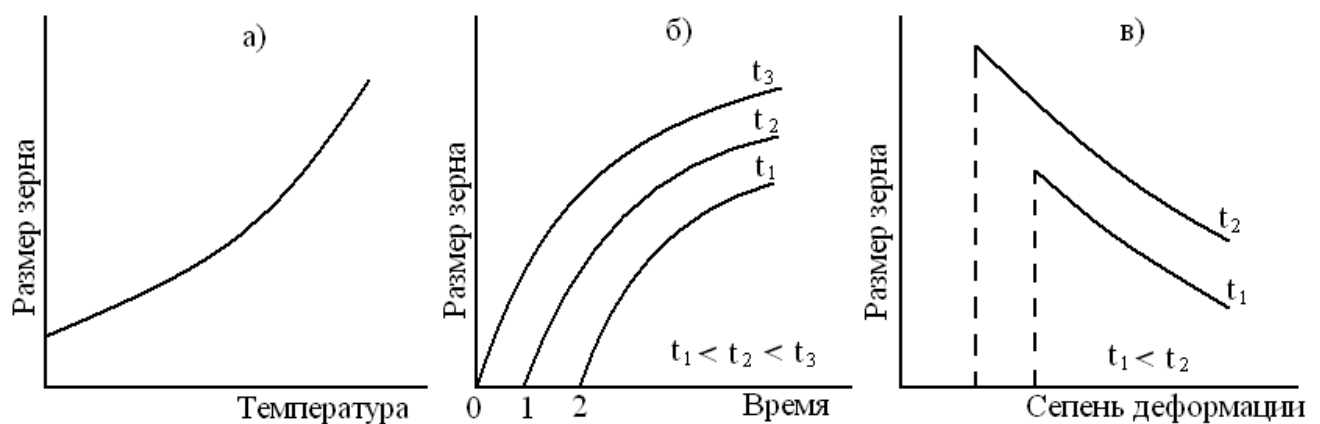


Рисунок 13 – Зависимость величины зерна от температуры (а), продолжительности отжига (б), степени деформации (в).

Величина рекристаллизационного зерна тем меньше, чем больше степень деформации. При высоких степенях деформации скорость образования зародышей зерна выше скорости их роста, что и предопределяет образование мелкого зерна.

Размер зерна существенно влияет на механические свойства материалов. Эти свойства, особенно прочность и вязкость, выше, если металл имеет мелкое зерно. Механизм пластической деформации в большинстве случаев имеет дислокационную природу. Эффективным барьером для движения дислокаций в металлах является межзеренная граница – зернограницное упрочнение. Это объясняется тем, что дислокация не может перейти границу зерна, так как в новом зерне плоскости скольжения не совпадают с плоскостью движения этой дислокации. Дальнейшая деформация продолжается в результате возникновения новой дислокации в соседнем зерне, поэтому чем мельче зерно (больше протяженность границ), тем выше прочность металла. Влияние среднего размера зерна d на характеристики прочности и усталости пропорционально $\sim d^{1/2}$; так, предел текучести σ_T взаимосвязан с размером зерна формулой Петча-Холла:

$$\sigma_T = \sigma_i + k / \sqrt{d} , \quad (12)$$

где σ_i – внутреннее напряжение, учитывающее сопротивление движению дислокаций; k – коэффициент.

1.8 Двухкомпонентные диаграммы состояния (диаграммы состояния для двойных сплавов)

В качестве конструкционных материалов используют, как правило, не чистые металлы, а металлические сплавы, т.к. они дешевле и имеют более высокие механические и технологические свойства.

Сплав – это вещество, полученное сплавлением двух и более компонентов, и состоящее из одной или нескольких фаз, образующих различные структуры.

Компонент – химически индивидуальное вещество, т.е. вещество которое может быть выделено из системы и существовать вне ее. Компонентами могут быть чистые металлы или неметаллы, а также химические соединения.

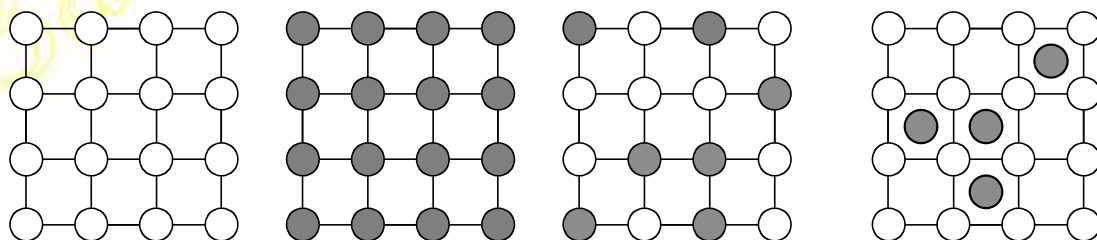
Фаза – совокупность гомогенных частей системы, одинаковых по составу, химическим и физическим свойствам, и отделенных от других частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую структура и свойства изменяются скачкообразно.

Структура – строение сплава, видимое в микроскоп, т.е. взаимное расположение фаз, их форма и размер (зерна).

В сплаве могут образовываться следующие фазы: расплав (жидкий раствор), твердые растворы, химические соединения, индивидуальные вещества (компоненты).

Твердый раствор – фаза, в которой один из компонентов сплава сохраняет свою кристаллическую решетку, а другой отдает свои атомы в решетку первого. В отличие от химического соединения твердый раствор существует в интервале концентраций компонентов. Обозначают твердые растворы греческими буквами α , β , γ , ... Бывают твердые растворы внедрения и замещения.

Твердые растворы замещения образуются, когда атомы растворенного компонента замещают атомы в узлах кристаллической решетки растворителя (рисунок 14 в). При этом размеры решетки растворителя изменяются. Такие твердые растворы образуются, если размеры атомов металлов, образующих твердый раствор, отличаются не очень сильно. **Твердые растворы внедрения** образуются, когда атомы растворенного компонента внедряются в междоузлия кристаллической решетки растворителя (рисунок 14 г). Такие твердые растворы образуются, если растворенное вещество имеет небольшой размер атомов (например, водород, азот, углерод).



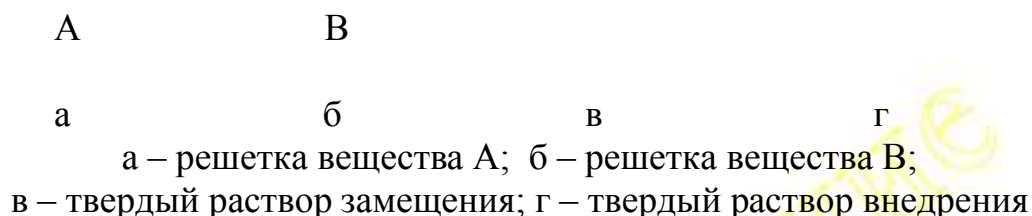


Рисунок 14 – Схема образования твердых растворов

Химические соединения имеют следующие характерные особенности: кристаллическая решетка, отличная от решеток элементов, образующих соединение; кратное весовое соотношение компонентов (A_nB_m); резкое отличие свойств соединения от свойств элементов, образующих соединение. В сплавах встречаются химические соединения металлов с неметаллами – углеродом (карбиды), азотом (нитриды), а также металлов с металлами – **интерметаллиды**.

По структуре в твердом состоянии сплав может состоять из твердого раствора (однофазная система) или из механической смеси двух фаз. **Механическая смесь** образуется, когда нет полной взаимной растворимости компонентов, и может состоять из двух твердых растворов, твердого раствора и химического соединения, а также двух чистых компонентов.

Процесс кристаллизации сплавов наглядно описывается с помощью диаграмм состояния. **Диаграммы состояния** показывают в условиях равновесия фазовый состав сплава (системы) в зависимости от внешних факторов (температура) и соотношения компонентов (состав) и позволяет качественно охарактеризовать многие физико-химические, механические и технологические свойства сплавов. Можно также определить, как изменяется структура сплава, что позволяет направленно регулировать его свойства. Для теоретического анализа диаграмм состояния используется правило фаз Гиббса.

Правило фаз Гиббса – основной закон фазового равновесия – дает количественную связь между числом фаз в системе Φ , числом компонентов K и числом степеней свободы C , отражающим число возможных вариантов изменений внешних условий (давление, температура, состав фаз) без изменения числа фаз в системе:

$$C = K - \Phi + n, \quad (13)$$

где n – число внешних факторов, влияющих на равновесие в системе. При рассмотрении сплавов, находящихся в атмосферных условиях (при атмосферном давлении), такой фактор, как правило, только один – температура. Тогда уравнение принимает вид:

$$C = K - \Phi + 1 \quad (14)$$

По своей сути C – это число независимых переменных, необходимых для описания состояния системы. Например, чистый металл в момент плавления: число фаз равно 2 (расплав и кристаллы металла), число компонентов равно 1, следовательно, число степеней свободы $C=0$. Т.е. в этот момент нельзя изменить внешние факторы (в данном случае один – температуру) без изменения

числа фаз в системе: если температуру повысить, останется одна фаза (расплав), если понизить – тоже одна (кристаллы).

Из правила фаз Гиббса вытекает, что в однокомпонентной системе в равновесии может находиться не более двух фаз, а в двухкомпонентной – не более трех. Диаграммы состояния соответствуют равновесному (стабильному) состоянию, которое достигается при очень медленном изменении температуры. Одним из способов построения диаграмм состояния является снятие кривых охлаждения – зависимостей температуры системы от времени при медленном охлаждении. Точки перегиба на кривых охлаждения соответствуют точкам изменения фазового состава на диаграмме. Строятся диаграммы состояния в координатах состав (в процентах А и В) – температура ($^{\circ}\text{C}$). Каждая точка на диаграмме показывает состояние сплава данного состава при данной температуре. При рассмотрении ниже основных типов диаграмм подразумевается, что компоненты всегда неограниченно растворимы друг в друге в жидком состоянии.

Двухкомпонентная диаграмма равновесного состояния с нерастворимыми друг в друге в твердом состоянии компонентами (образующими механическую смесь)

В этом случае компоненты не растворимы друг в друге в твердом состоянии и не образуют химического соединения, например Pb и Sb (рисунок 15). По оси ординат отложена температура в градусах Цельсия, а по оси абсцисс – состав сплава, самая левая точка соответствует чистому компоненту А (0% В), а самая правая точка соответствует чистому компоненту В (100% В). Линия АЕВ – **линия ликвидус** – геометрическое место точек начала затвердевания сплава при охлаждении. Линия CED – **линия солидус** – геометрическое место точек конца затвердевания сплава. Точка А – температура плавления компонента А, т.В – температура плавления компонента В. Выше линии ликвидус находится расплав, $\Phi=1$ (жидкость), $K=2$ (А и В), $C=2$, т.е. можно изменять два параметра (состав и температуру) без изменения фазового состава системы.

В области АЕС сплав состоит из кристаллов А и жидкости, а в области BED – из кристаллов В и жидкости; $C=2-2+1=1$ – число независимых переменных необходимых для описания состояния системы. Задав в этих областях температуру, мы можем определить химический состав каждой из фаз (см. далее правило отрезков).

В точке Е сплав затвердевает при одной температуре, а не в интервале. В этой точке находятся три фазы: жидкая и две твердые (кристаллы А и В). Точка в которой начинается и заканчивается кристаллизация двух твердых фаз из жидкого расплава называется точкой **эвтектики**. В этой точке образуется мелкодисперсная механическая смесь кристаллов А и В, которая называется **эвтектикой**. Сплавы данной концентрации называются эвтектическими, левее точки Е – доэвтектическими, а правее – заэвтектическими. В точке Е $\Phi=3$ (ж, кр. А, кр. В), $C=2-3+1=0$. Сплав эвтектической концентрации имеет самую низкую температуру плавления.

По фазовому составу сплавы ниже линии ликвидус представляют собой смесь фаз А и В. По структуре доэвтектические сплавы состоят из более круп-

ных кристаллов А и эвтектики (мелкодисперсной смеси кристаллов А и В), эвтектические – из эвтектики, а заэвтектические из более крупных кристаллов В и эвтектики.

Справа на рисунке 15 представлена кривая охлаждения для сплава с концентрацией 25% В (соответственно 75% А). От точки 1 до точки 2 идет охлаждение расплава $C=2-1+1=2$. В т.2 начинается кристаллизация кр. А и продолжается до т.3. При этом химический состав расплава изменяется по кривой 2-Е. В этой области $C=2-2+1=1$. Участок 2-3 на кривой охлаждения более пологий, т.к. при кристаллизации выделяется тепло и охлаждение идет медленнее. В точке 3 расплав имеет химический состав, описываемый точкой Е и из расплава кристаллизуется эвтектика, $C=0$ (фазы – расплав, кристаллы А, кристаллы В). При $C=0$ на кривых охлаждения всегда наблюдаются горизонтальные участки – пока весь расплав не затвердеет, температура не изменяется. На участке 3-4 происходит остывание смеси кристаллов А и В. $C=2-2+1=1$, т.е. при любой температуре в данной области химический состав обеих фаз известен – это чистые компоненты А и В.

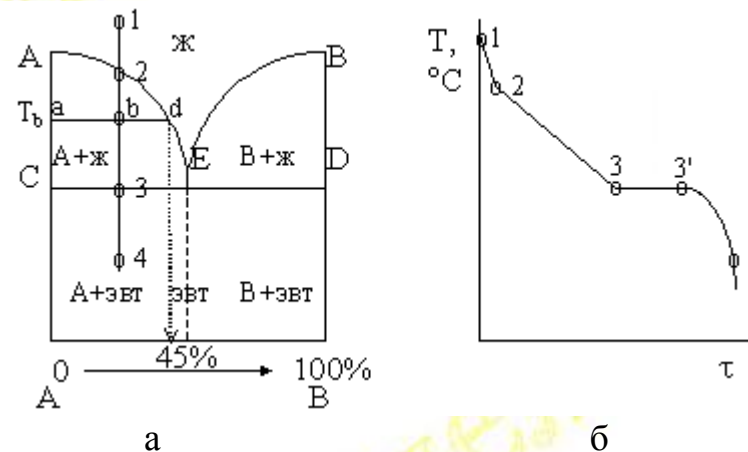


Рисунок 15 – Двухкомпонентная диаграмма равновесного состояния с нерастворимыми друг в друге в твердом состоянии компонентами (а), кривая охлаждения (б)

Правило отрезков (правило рычага). Правило отрезков позволяет для двухфазных областей диаграмм состояния определить химический состав фаз, а также весовое соотношение фаз, находящихся в равновесии при данной температуре. Пусть дана точка b при температуре T_b (рисунок 15). Проведем через точку b горизонтальную линию ad до пересечения с линиями диаграммы AC и AE. Химический состав жидкой фазы (45% В, 55% А) определяется точкой d – пересечение горизонтальной линии ad, проходящей через т. b, и линии ликвидус AE. Состав твердой фазы (кристаллы А) определяется т. a – пересечение горизонтальной линии ad и линии AS. По мере понижения температуры химический состав расплава изменяется по линии dE, а твердой фазы – по линии aC (т.е. не изменяется). Количественное соотношение между массой кристаллов А Q_A и массой жидкости $Q_ж$ обратно пропорционально соответствующим отрезкам. В т. b получим:

$$Q_A / Q_{\text{ж}} = bd / ab; \quad Q_A / Q_{\text{общ}} = bd / ad; \quad Q_{\text{ж}} / Q_{\text{общ}} = ab / ad \quad (15)$$

Двухкомпонентная диаграмма равновесного состояния с неограниченной растворимостью компонентов как в жидком так и в твердом состоянии

В этом случае компоненты неограниченно растворимы друг в друге в твердом состоянии и не образуют химического соединения, например Cu и Ni (рисунок 16). А-2-В – линия ликвидус, А-3-В – линия солидус. Точка А – температура плавления компонента А, т.В – температура плавления компонента В. Выше линии ликвидус находится расплав, $C=2-1+1=2$.

В области между линиями ликвидус и солидус в равновесии находятся кристаллы твердого раствора α и расплава, $C=2-2+1=1$ – задав в этой области температуру (например T_b), мы можем определить химический состав расплава и твердого раствора проведя при данной температуре горизонтальную линию. Пересечение с линией ликвидус (т.а) даст химический состав расплава $c_{\text{ж}}$, а с линией солидус (т.с) – химический состав твердого раствора c_{α} .

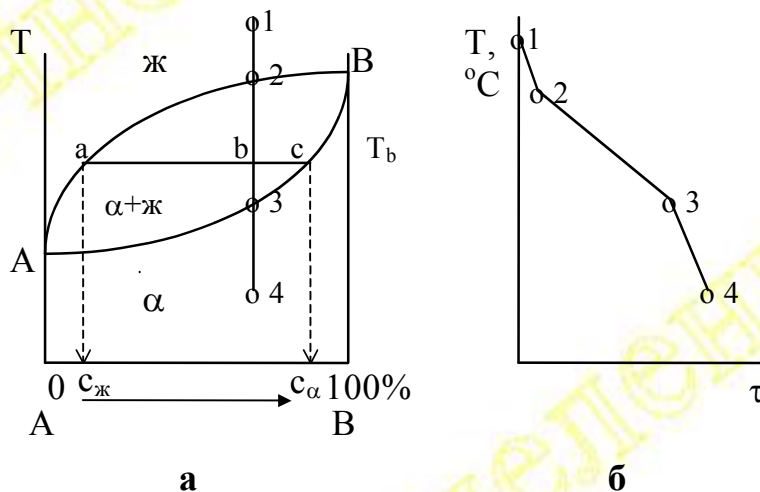


Рисунок 16 - Двухкомпонентная диаграмма равновесного состояния с неограниченной растворимостью компонентов как в жидком так и в твердом состоянии (а), кривая охлаждения (б)

По мере затвердевания химический состав твердого раствора изменяется по линии В-3, и после затвердевания сплав будет иметь неоднородность по химическому составу – он будет разным для кристаллов, выпавших в начале и в конце кристаллизации. Избавиться от этого можно путем длительного нагрева при температуре близкой к линии солидус, при этом химический состав выравнивается за счет диффузии компонентов. Такая операция называется диффузионный отжиг. Ниже линии солидус существует только одна фаза – твердый раствор α , $C=2-1+1=2$. Как видно из рис.10, на кривой охлаждения в данном случае нет горизонтальных участков, т.к. нет точек с $C = 0$.

Двухкомпонентная диаграмма равновесного состояния для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

В этом случае существует ограниченная взаимная растворимость компонентов друг в друге в твердом состоянии (например Fe и C), и образуется два типа твердых растворов: α – твердый раствор на основе компонента А, β – твердый раствор на основе компонента В (рисунок 17).

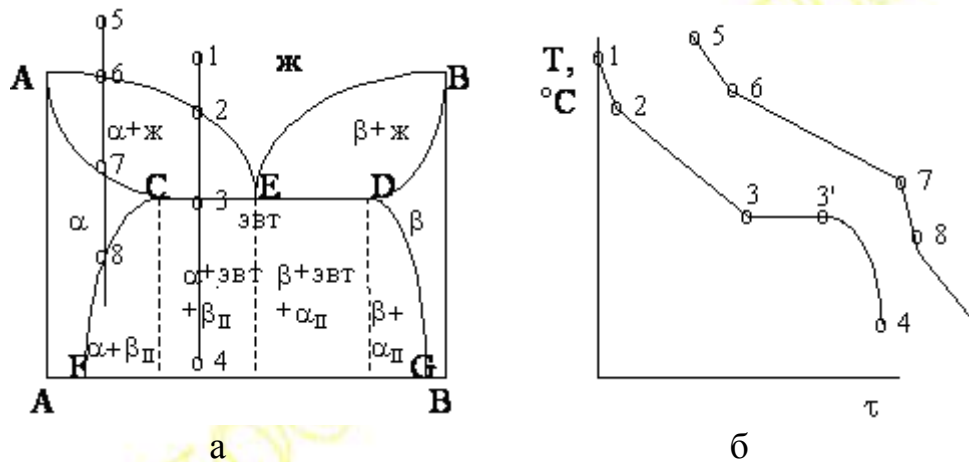


Рисунок 17 - Двухкомпонентная диаграмма равновесного состояния для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а), кривые охлаждения (б)

АЕВ – линия ликвидус, АСЕДВ – линия солидус. Точка А – температура плавления компонента А, т.В – температура плавления компонента В. В области АЕС сплав состоит из кристаллов α и расплава, а в области ВЕД – из кристаллов β и расплава; $C=2-2+1=1$. Задав в этих областях температуру, мы можем определить химический состав каждой из фаз проводя при данной температуре горизонтальную линию. Состав твердой фазы определяется точкой пересечения горизонтальной линии с линией солидус, а жидкой – точкой пересечения горизонтальной линии с линией ликвидус. В области левее АСF существует только твердый раствор α , в этой области компонент В растворим в компоненте А. АСF – это линия максимальной растворимости В в А. В области правее ВDG существует твердый раствор β , в этой области компонент А растворим в компоненте В. ВDG – это линия максимальной растворимости А в В.

В области FCEGDG существует механическая смесь кристаллов твердых растворов α и β . Для всей области $C=2-2+1=1$. Задав температуру в этой области мы, всегда можем узнать состав обеих фаз, проводя горизонтальную линию до пересечения с линиями CF и DG. Химический состав кристаллов α определяется пересечением с линией CF, а химический состав кристаллов β – пересечением с линией DG. Точка Е – эвтектическая, в этой точке выпадает твердая **эвтектика** – мелкодисперсная смесь α и β . В области под линией CF существует смесь кристаллов α и вторичных кристаллов β_{II} . Вторичными они называются т.к. образовались не из расплава, как первичные, а из твердого раствора α . Аналогично в области под линией DG существует смесь кристаллов β и вторичных кристаллов α_{II} . В области под отрезком CE существует смесь кристаллов α , эвтектики и β_{II} , а в области под отрезком ED существует смесь кристаллов β , эвтектики и α_{II} .

При охлаждении расплава от t_5 до t_6 остывает расплав. В t_6 начинается, а в t_7 заканчивается кристаллизация α . В системе при этом существуют две фазы – α и ж, $C=1$. Задав температуру и проведя горизонтальную линию до пересечения с линиями AE и AC , узнаем химический состав расплава и твердого раствора α соответственно. От t_7 до t_8 остывает твердый раствор α система однофазная, $C=2$. В t_8 достигается максимальная растворимость B в A и из α -твердого раствора вследствие уменьшения растворимости выделяются β_{II} кристаллы, система из однофазной переходит в двухфазную, на кривой охлаждения наблюдается перегиб. Т.к. точек с $C=0$ для данного состава нет, то на кривой охлаждения нет горизонтальных участков.

Двухкомпонентная диаграмма равновесного состояния для сплавов с образованием устойчивого химического соединения

В этом случае компоненты A и B образуют устойчивое химическое соединение A_nB_m , например, Cu и Mg (рисунок 18). AE_1BE_2C – линия ликвидус. DE_1F и GE_2H – линии солидус. Точка A – температура плавления компонента A , t_B – температура плавления химического соединения A_nB_m , t_C – температура плавления компонента B .

В области под линией DF существует механическая смесь кристаллов A и A_nB_m , а в области под линией GH существует механическая смесь кристаллов A_nB_m и B . Для обеих областей $C=2-2+1=1$. Точка E_1 – первая эвтектика, в этой точке образуется мелкодисперсная механическая смесь кристаллов A и A_nB_m , точка E_2 – вторая эвтектика, в этой точке образуется мелкодисперсная механическая смесь кристаллов A_nB_m и B .

При охлаждении расплава состава A_nB_m в точке B начнет кристаллизоваться вещество A_nB_m . В этой точке $\Phi=2$ (расплав и кристаллы A_nB_m), $K=1$ (A_nB_m), $C=0$ и на кривой охлаждения присутствует горизонтальный участок.

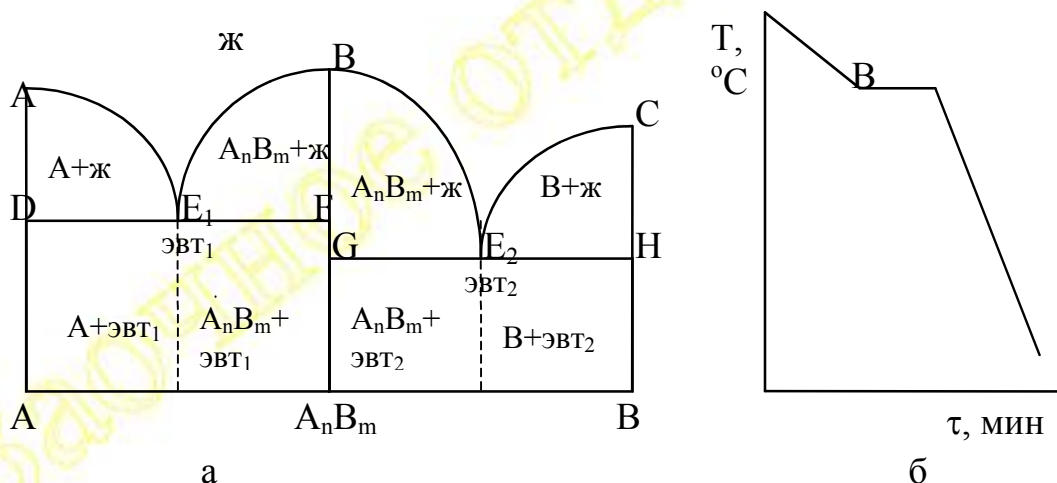


Рисунок 18 – Двухкомпонентная диаграмма равновесного состояния для сплавов с образованием устойчивого химического соединения (а), кривая охлаждения (б)

1.9 Диаграмма равновесного состояния железо-углерод

Эта диаграмма дает представление о структуре медленноохлажденных железоуглеродистых сплавов и является теоретической основой термической обработки этих сплавов. Строится она (рисунок 19) до концентрации углерода 6,67%, соответствующей составу карбида железа (цементит Fe_3C), так как сплавы с более высоким содержанием С из-за хрупкости не применяются.

Компонентами являются железо и углерод. **Железо** – металл серебристо-белого цвета, $t_{\text{пл}}=1539^\circ\text{C}$. В твердом состоянии до 911°C находится в виде Fe_α (о.ц.к. решетка), а выше 911°C – в виде Fe_γ (г.ц.к.). С металлами образует твердые растворы замещения, а с неметаллами (С, N, H) – твердые растворы внедрения. **Углерод** – неметаллический элемент, существующий в двух основных полиморфных модификациях: графит и алмаз.

Фазами на диаграмме являются железо-углеродный расплав (**ж**), аустенит (**А**), феррит (**Ф**) и цементит (**Ц**). **Аустенит** – твердый раствор внедрения углерода в γ -железе (Fe_γ), пластичен, имеет высокую вязкость и низкую прочность и твердость. **Феррит** – твердый раствор внедрения углерода в α -железе (Fe_α), пластичен, имеет относительно низкую прочность и твердость. **Цементит** – карбид железа Fe_3C , обладает высокой твердостью и хрупкостью.

Линии и точки на диаграмме

ACD – линия ликвидус, **AECF** – линия солидус. Точка **А** – температура плавления чистого железа, точка **Д** – температура плавления цементита. Точка **С** – точка эвтектики. Линия **ECF** – линия эвтектики. По линии **АС** из расплава начинает кристаллизироваться аустенит, а по линии **CD** – первичный цементит. **AGSE** – область аустенита. **SEA** определяет зависимость максимальной растворимости углерода в аустените от температуры, точка **Е** определяет максимальную растворимость углерода в аустените (2,14% при 1147°C).

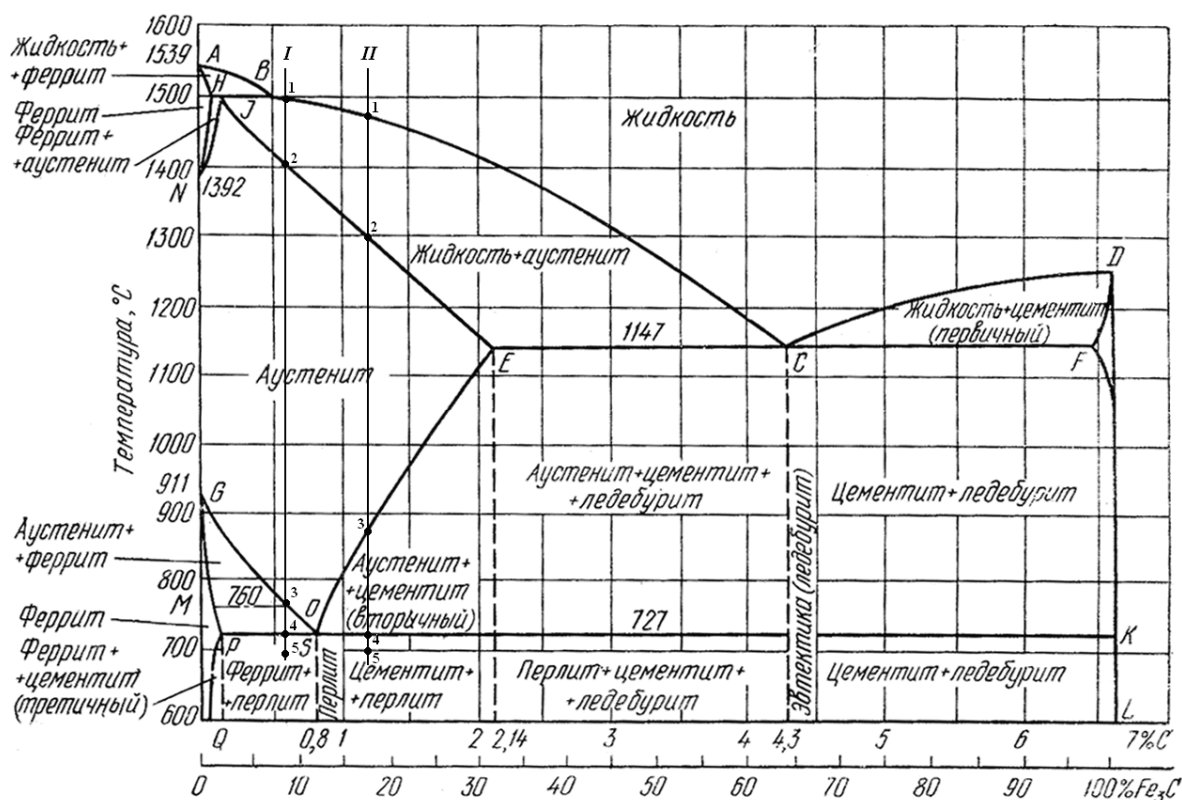


Рисунок 19 - Диаграмма равновесного состояния железо-углерод

Т. G (911°C) – температура полиморфного превращения чистого железа. GS определяет температуру начала выделения феррита из аустенита, а SE – температуру начала выделения вторичного цементита из аустенита. Левее линии GPQ – область феррита. GPQ определяет зависимость растворимости углерода в феррите от температуры, т.Р определяет максимальную растворимость углерода в феррите (0,02 % при 727 °C). Т. S называется эвтектоидной точкой: в т. S аустенит (0,8% C) распадается на феррит с содержанием углерода 0,02% (т.Р) и вторичный цементит с содержанием углерода 6,67% (т.К). Таким образом в т. S выпадает твердый эвтектоид (по аналогии с эвтектикой) **перлит** – эвтектоидная мелкодисперсная смесь феррита и цементита, содержащая 0,8% углерода. PSK называется линией перлитного превращения, на этой линии весь аустенит претерпевает эвтектоидное превращение в перлит. По мере охлаждения сплава ниже температуры 727°C растворимость углерода в феррите падает в соответствии с линией PQ и составляет при комнатной температуре 0,006 % (т. Q). При этом из феррита выделяется третичный цементит.

В точке С из расплава одновременно выпадают кристаллы аустенита с содержанием углерода 2,14% (т.Е) и кристаллы цементита с содержанием углерода 6,67% (т. F). Таким образом в т. С выпадает **ледебурит** – эвтектическая мелкодисперсная смесь аустенита и цементита, содержащая 4,3% углерода. По мере охлаждения сплава ниже температуры 1147°C растворимость углерода в аустените падает в соответствии с линией ES. При этом из аустенита выделяется вторичный цементит. При температуре ниже 727°C аустенит переходит в перлит, и ледебурит состоит из перлита и цементита.

Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 0,02% называются **техническим железом**. Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода от 0,02 до 2,14% называются **сталями**. Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода от 2,14 до 6,67% называются **чугунами**. Отсутствие в структуре сталей хрупкой эвтектики делает их ковкими и пластичными. Наличие в структуре чугунов легкоплавкой эвтектики (ледебурит) повышает их литейные свойства, но делает чугун хрупким.

Критические точки. Это точки на диаграмме состояния, соответствующие температурам, при которых в процессе нагревания или охлаждения происходят фазовые изменения в сплаве. Обозначаются критические точки буквой А с индексом. Буква с в индексе ставится при нагревании, а буква г – при охлаждении. A_1 – находится на линии PSK. A_{c1} при нагревании перлит превращается в аустенит, A_{r1} – при охлаждении аустенит распадается на феррит и цементит (превращается в перлит). A_2 – это линия MO, точка Кюри. A_{c2} – при нагревании сплав теряет магнитные свойства, A_{r2} – при охлаждении наоборот приобретает. A_3 – находится на линии GOS. A_{c3} – при нагревании заканчивается растворении феррита в аустените, A_{r3} – при охлаждении из аустенита выделяются зерна феррита. A_m – лежит на линии SE. A_{cm} – при нагревании заканчивается растворение цементита в аустените, A_{rm} – при охлаждении из аустенита выделяется вторичный цементит.

Превращения в железоуглеродистых сплавах при медленном охлаждении

Рассмотрим превращения в доэвтектоидной стали с 0,6% углерода (кривая I рисунок 19, рисунок 20). В т. 1 из расплава начинает кристаллизоваться аустенит, процесс заканчивается в т. 2. В интервале температур между т. 2 и 3 остывает аустенит с исходной концентрацией углерода 0,6%. В т.3 из аустенита начинает кристаллизоваться феррит. По мере понижения температуры состав аустенита изменяется по линии GS, а феррита – по линии GP.

В т.4 феррит содержит 0,02% углерода (т.Р), а аустенит, содержащий 0,8% углерода, распадается на перлит – смесь феррита (0,02% С, т.Р) и вторичного цементита. При дальнейшем охлаждении растворимость углерода в феррите будет падать по линии PQ и из феррита выделится третичный цементит (рисунок 20).

Рассмотрим превращения в заэвтектоидной стали с 1,2% углерода (кривая II, рисунок 19). До т.3 процесс аналогичен предыдущему. В т.3 из аустенита начинает кристаллизоваться вторичный цементит. По мере понижения температуры состав аустенита изменяется по линии ES. В т.4 имеем цементит и аустенит, содержащий 0,8% углерода, распадающийся на перлит, как было рассмотрено ранее.

Рассмотрим превращения в эвтектическом чугуне, содержащем 4,3% углерода. В точке С образуется эвтектика – ледебурит, состоящий из смеси кристаллов аустенита с 2,14% углерода (т.Е) и первичного цементита (т.Ф). По мере охлаждения растворимость углерода в аустените уменьшается от 2,14% (т. Е) до 0,8% (т. S) и из аустенита выделяется вторичный цементит. В т. S ау-

стенит превращается в перлит, и ледебурит будет состоять из перлита и цементита (рисунок 21).

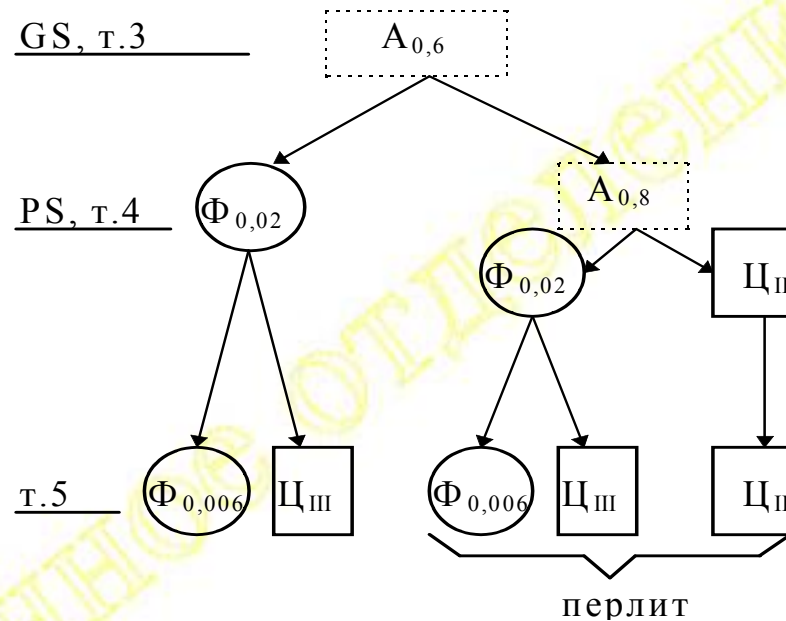


Рисунок 20 – Схема превращения в доэвтектоидной стали при медленном охлаждении

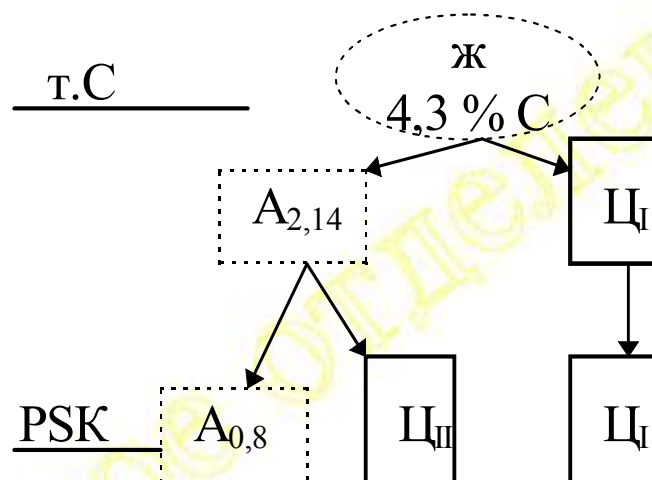


Рисунок 21 – Схема превращения в эвтектическом чугуна при медленном охлаждении

1.10 Виды термической обработки

Термическая обработка сплавов – это совокупность операций нагрева, выдержки при заданной температуре и охлаждения с определенной скоростью металлических сплавов, находящихся в твердом состоянии, с целью изменения их структуры и получения необходимых свойств (прочность, твердость и др.), а также снятия внутренних напряжений. Основные виды термической обработ-

ки – закалка, отпуск, отжиг, нормализация, старение (закалка и старение цветных сплавов будут рассмотрены в разделе «Алюминий и сплавы на его основе»), ХТО. Теоретической основой термической обработки сталей является диаграмма состояния железо-углерод.

Закалка

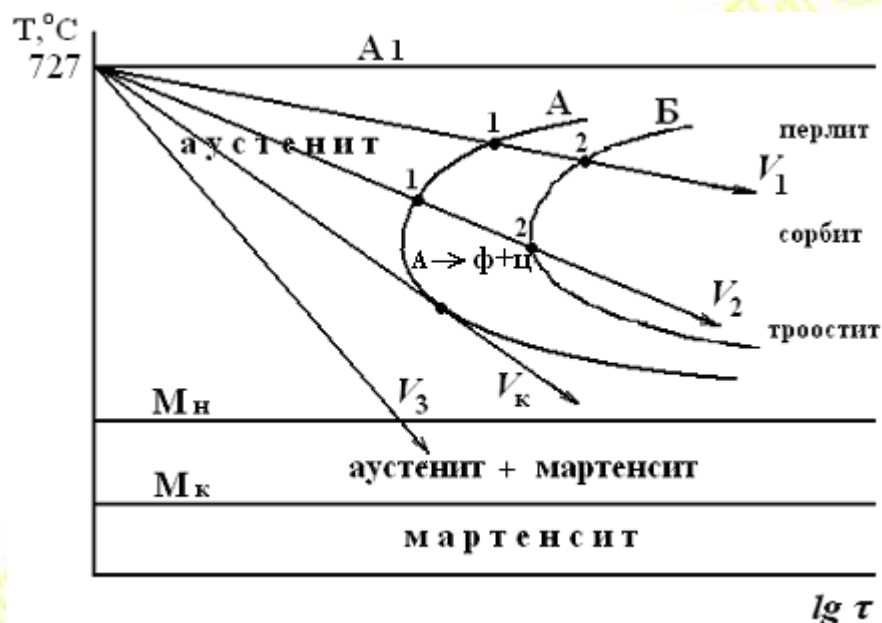
Закалка заключается в нагреве стали до температуры на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше критических точек. Затем следует выдержка при этой температуре для прогрева изделия по всему сечению и быстрое охлаждение. Закалка возможна, если при изменении температуры в сплаве происходят фазовые изменения, и при понижении температуры происходит уменьшение растворимости одного компонента в другом. Целью закалки является получение пересыщенного твердого раствора. При этом сплав переходит в неравновесное состояние: при нагреве выше критических точек происходят фазовые превращения, а при быстром охлаждении обратные процессы не успевают произойти полностью. В частности, при охлаждении аустенита со скоростью выше некоторой критической получается пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе – **мартенсит**, обладающий высокой твердостью, хрупкостью и низкой пластичностью. Углеродистую сталь подвергают закалке для повышения ее прочности и твердости.

Критической скоростью охлаждения (V_k) называют минимальную скорость охлаждения, при которой избыточный углерод не успевает выделиться из аустенита, и весь аустенит превращается в мартенсит (рисунок 22). При малой скорости охлаждения V_1 аустенит распадается на крупнодисперсную смесь феррита и цементита (перлит), а при больших скоростях V_2 распадается на более мелкодисперсные смеси (сорбит, троостит). Если охлаждать сталь со скоростью, не пересекающей кривую начала распада аустенита (линия А), т.е. со скоростью V_3 , то образуется мартенсит.

Превращение аустенита в мартенсит начинается при определенной температуре, называемой *температурой начала мартенситного превращения* M_n . Для того чтобы мартенситное превращение протекало, необходимо непрерывное охлаждение аустенита ниже точки M_n . При достижении определенной температуры дальнейшее превращение аустенита в мартенсит прекращается. Эта температура называется *концом мартенситного превращения* M_k . Положение температур M_n и M_k не зависит от скорости охлаждения и определяется химическим составом стали. Чем больше углерода в аустените, тем ниже располагаются эти температуры. Все легирующие элементы, за исключением Co и Al , понижают M_n и M_k . Мартенситное превращение характеризуется высокой скоростью роста зародышей ($1000-7000$ м/с).

В зависимости от температуры нагрева стали различают полную закалку и неполную. **Полная закалка** состоит в нагреве стали выше критической точки A_{c3} на $30...50^{\circ}\text{C}$, а **неполная** – выше критической точки A_{c1} на $30...50^{\circ}\text{C}$. Дозвлектоидные стали подвергают только полной закалке. Если дозвлектоидную сталь нагреть до температуры выше A_{c1} но ниже A_{c3} , то получится феррито-аустенитная смесь, которая после закалки даст феррито-мартенситную смесь, имеющую меньшую твердость чем мартенсит (т.к. феррит имеет низкую твер-

дость). Заэвтектоидные стали подвергают неполной закалке, после которой получается мартенсито-цементитная смесь, имеющая высокую твердость (цементит имеет твердость даже выше, чем у мартенсита).



- А – линия начала перлитного превращения;
 Б – линия конца перлитного превращения;
 М_н – линия начала мартенситного превращения;
 М_к – линия конца мартенситного превращения

Рисунок 22 – Диаграмма превращения аустенита при непрерывном охлаждении

Закаливаемость – способность данной стали к повышению твердости в результате закалки. Возрастает с увеличением содержания углерода и (в меньшей степени) легирующих элементов в стали.

Прокаливаемость – способность стали получать закаленный слой на ту или иную глубину. Прокаливаемость повышается легированием стали марганцем, хромом, молибденом, бором, а также при увеличении размера зерна. За глубину закаленного слоя условно принимают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны (50% мартенсита+50% троостита), которую легко определить по микроструктуре и по твердости.

Охлаждающими средами при закалке могут быть воздух, вода, растворы солей или минеральное масло. После закалки углеродистая сталь имеет высокую прочность, твердость, износостойкость, низкую пластичность и приобретает внутренние напряжения. Чтобы уменьшить хрупкость и внутренние напряжения, вызванные закалкой, и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки всегда подвергают отпуску.

Отпуск

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже критической точки A_{c1} , выдержке при этой температуре и охлаждении с заданной скоростью (отпуск цветных сплавов называют искусственным старением, см. далее). Чем выше температура отпуска, тем полнее снимаются внутренние напряжения, растет пластичность и сопротивление ударным воздействиям, но снижается прочность и твердость. Отпуск является окончательной операцией термообработки, а как самостоятельная не проводится.

Низкотемпературный отпуск проводят при нагреве до $120...250^{\circ}\text{C}$. При этом мартенсит закалки обедняется избыточным углеродом и превращается в мартенсит отпуска, частично снимаются внутренние напряжения, повышается прочность стали (за счет устранения дефектов и внутренних напряжений), несколько снижается твердость. Применяют для изделий, которые должны отличаться высокой твердостью и износостойкостью – режущий и измерительный инструмент, шарикоподшипники. **Среднетемпературный отпуск** проводят при нагреве до $250...450^{\circ}\text{C}$. При этом мартенсит частично распадается на феррито-цементитную смесь, называемую троостит, сильно снижаются внутренние напряжения, повышается упругость стали. Применяют для пружинных, рессорных и штамповых сталей. **Высокотемпературный отпуск** проводят при нагреве до $450...650^{\circ}\text{C}$. При этом мартенсит полностью распадается на феррито-цементитную смесь сорбит, практически полностью снимаются внутренние напряжения, понижается прочность и твердость, но возрастает пластичность. Применяют для придания изделиям ответственного назначения высокого сопротивления ударным воздействиям в сочетании с достаточной прочностью и пластичностью. Термическую обработку, состоящую из закалки и высокотемпературного отпуска, называют **улучшением**.

Отжиг

Отжиг заключается в нагреве сплава до определенной температуры, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении (вместе с печью). Применяют для перевода сплава в устойчивое равновесное состояние, без внутренних напряжений. Отжиг, как правило, является подготовительной операцией термообработки. Применяется отжиг для следующих целей. **1)** Для устранения химической неоднородности сплавов, например, крупных слитков легированной стали применяют **диффузионный** отжиг. Нагрев при этом должен быть высоким для более полного протекания процессов диффузии, выравнивающих химический состав сплава. Диффузионный отжиг приводит к крупнозернистости структуры стали. **2)** Для получения более мелкозернистой структуры стали, что обеспечивает повышение ее прочности, применяют полный или неполный отжиг. **Полный отжиг** – нагрев на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше точки A_{c3} , применяют для доэвтектоидных сталей; **неполный отжиг** – нагрев на $10...30^{\circ}\text{C}$ выше точки A_{c1} , применяют для заэвтектоидных сталей. Чем меньше размер зерна, тем больше его поверхность, которая задерживает движение дислокаций, затрудняет пластическую деформацию и поэтому способствует увеличению прочности. **3)** Для устранения дефектов и внутренних напряжений, возникших в результате холодной деформации сплава (например, при штамповке, волочении) применя-

ется **рекристаллизационный** отжиг. Температура нагрева при этом отжиге стали зависит от ее состава и находится в пределах 650-700⁰С. Увеличение в стали углерода и легирующих элементов повышают температуру рекристаллизации. При этом в процессе нагрева на месте деформированных зерен образуются и растут новые бездефектные (процесс рекристаллизации).

Нормализация

Нормализация заключается в нагреве стали до температуры на 50...60⁰С выше критических точек $A_{с3}$ (для доэвтектоидной стали) или $A_{сm}$ (для заэвтектоидной стали), непродолжительной выдержке при этой температуре и охлаждении на спокойном воздухе. Нормализацией является только такая термообработка с охлаждением на воздухе, в результате которой аустенит распадается на феррито-цементитную смесь. Если в результате образуется мартенсит, то это закалка (самозакаливающиеся стали), а не нормализация. Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию сплава, устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье или механической обработке, снижает внутренние напряжения. Охлаждение при нормализации происходит быстрее, чем при отжиге, поэтому она экономичнее отжига. Применяют нормализацию как подготовительную операцию перед закалкой и отпуском; вместо отжига для низкоуглеродистых сталей; вместо закалки + отпуска для среднеуглеродистых сталей.

Химико–термическая обработка (ХТО) стали

Химико–термическая обработка (ХТО, поверхностное легирование) – это обработка, заключающаяся в сочетании термического и химического воздействия на сплавы для изменения химического состава, структуры и свойств их поверхностных слоёв. ХТО сводится к диффузионному насыщению поверхности изделия неметаллами (углеродом, азотом, кремнием, бором и т.д.) или металлами (хромом, алюминием и т.д.) в процессе выдержки при определённой температуре в газовой или жидкой среде.

При химико-термической обработке параллельно протекает несколько процессов:

- 1 – образование в окружающей среде активного диффундирующего элемента (в атомарном или ионизированном состоянии);
- 2 – адсорбция атомов (ионов) поверхностью обрабатываемого сплава с образованием химических связей - хемосорбция;
- 3 – диффузия адсорбированных атомов вглубь обрабатываемого изделия;

В результате ХТО на поверхности изделия образуется диффузионный слой, отличающийся от основного материала химическим составом, структурой и свойствами.

Химико-термическая обработка обладает рядом преимуществ (например, перед поверхностной закалкой):

- 1 – повышение механических свойств поверхности изделия не зависит от формы изделия;

2 – различие в свойствах между поверхностью и сердцевиной больше, чем при поверхностной закалке, так как изменяется не только структура, но и химический состав;

3 – последствия нагрева изделия могут быть устранены последующей термической обработкой.

Следует отметить, что ХТО уступает поверхностной закалке в производительности.

Химико–термическая обработка подразделяется на следующие виды: цементация, азотирование, цианирование, нитроцементация, борирование, алитирование, хромирование, силицирование.

Цементация. Цементацией называется процесс поверхностного насыщения стали углеродом. Основная цель цементации – повышение твёрдости и износостойкости поверхности, что объясняется повышением концентрации углерода в поверхностном слое до 0,8 – 1,0%. После цементации проводится закалка и низкий отпуск, что приводит к повышению предела выносливости.

Для цементации используются низкоуглеродистые стали с содержанием углерода 0,1 – 0,2% С, а для крупногабаритных деталей – 0,2 – 0,3% С. При этом твёрдая, износостойкая поверхность (после термообработки) сочетается с вязкой сердцевиной. Часто цементации подвергается только часть детали; тогда участки, не подлежащие упрочнению, защищаются слоем меди толщиной 0,02 – 0,04 мм, нанесённого электролизом, или специальными обмазками.

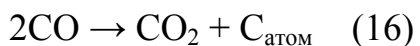
Для насыщения углеродом поверхности стали углерод должен находиться в атомарном состоянии. Это осуществляется при диссоциации углеродосодержащих соединений – СО, СН₄ и др. Атомарный углерод адсорбируется поверхностью стали и диффундирует вглубь металла.

Цементацию проводят при температурах выше точки А₃ (930 – 950°С), когда углерод растворяется в аустените. На практике цементит на поверхности образуется редко, обычно диффузионный слой состоит только из аустенита, а после медленного охлаждения – из продуктов его распада. Цементированный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, которая снижается от поверхности к сердцевине детали. После медленного охлаждения в структуре цементованного слоя различают три зоны: заэвтектоидную (редко), эвтектоидную и доэвтектоидную. За толщину цементованного слоя принимают сумму толщин заэвтектоидного, эвтектоидного и половины доэвтектоидного (переходного) слоя, она составляет обычно 0,5 – 2,0 мм, концентрация углерода – 0,8 – 1,0%.

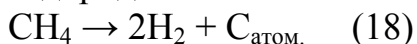
Существует два вида цементации:

- твёрдыми углеродосодержащими карбюризаторами;
- газообразными карбюризаторами.

Твёрдый карбюризатор – активированный древесный уголь с активизаторами – ВаСО₃ и Na₂СО₃ (10 – 40%). Изделия загружаются в стальной ящик, послойно пересыпаются карбюризатором и утрамбовываются. Ящик помещают в печь, где он нагревается и выдерживается при температуре 910 – 930°С 5 – 6 часов. После этого следует охлаждение до 400 – 500°С и ящик вскрывают. В процессе нагрева и выдержки происходят реакции:



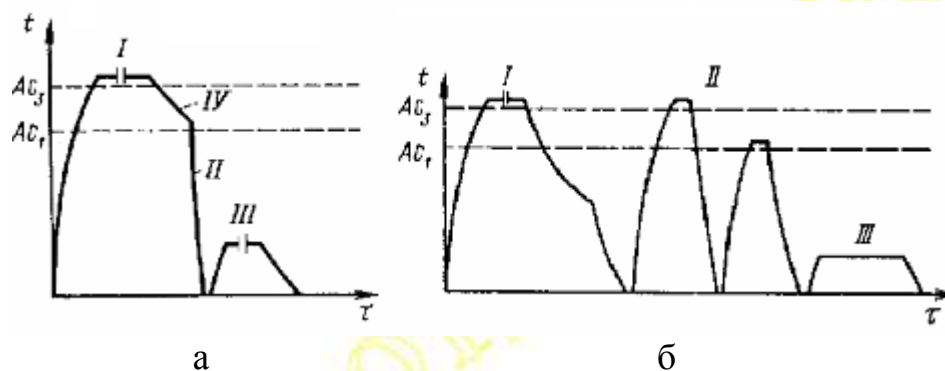
Газовая цементация – она осуществляется при нагревании изделий в среде углеводородных газов.



Этот метод имеет ряд преимуществ:

- при газовой цементации можно регулировать концентрацию углерода в поверхностном слое;
- сокращается длительность процесса, так как не надо прогревать ящик с карбюризатором;
- процесс легко механизуется и автоматизируется;
- упрощается последующая термическая обработка, так как закалку можно проводить прямо из печи.

Термическая обработка после цементации проводится для исправления структуры и измельчения зерна сердцевины и цементованного слоя, так как в процессе цементации неизбежно происходит рост зерна из-за высокой температуры и длительности процесса. Эта термическая обработка состоит в закалке и низком отпуске при 160 – 180°C (для снятия напряжений) (рисунок 23 а). При этом цементованный слой приобретает высокую твёрдость и устраняется цементитная сетка, возникающая при пересыщении поверхности изделий углеродом, а также осуществляется перекристаллизация и измельчение зерна сердцевины.



а – однократная закалка;

б – двукратная закалка (для ответственных деталей машин)

I – цементация; II – закалка; III – отпуск; IV – подстуживание

Рисунок 23 – Режим термической обработки после цементации

Более высокие механические свойства цементованная сталь приобретает при двукратной закалке (рисунок 23 б). При первой закалке нагрев осуществляется до температуры на 30 – 50°C выше точки A_3 . После неё сердцевина приобретает мелкозернистую структуру. При второй закалке нагрев осуществляется до температуры на 30 – 50°C выше точки A_1 . После закалки мелкозернистое строение приобретает науглероженный слой.

Механические свойства цементованного слоя значительно повышается при использовании легированных сталей, если легирующие элементы – хорошие карбидообразователи.

Азотирование. Азотированием называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при высоких температурах. При этом повышается твёрдость, износостойкость, предел выносливости и коррозионная стойкость поверхности стальных изделий. Обычно азотирование проводят в среде аммиака при температуре 500 – 600°C. Твёрдость азотированного слоя выше, чем цементованного и она сохраняется при температуре 600 – 650°C.

Образование молекулярного азота идёт по реакции $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$. На поверхности стали молекулярный азот диссоциирует на атомарный, который диффундирует вглубь металла. В процессе азотирования в соответствии с диаграммой состояния железо – азот в поверхностном слое образуется сложная многофазная структура. Азотирование – длительная операция. Толщина слоя обычно составляет не более 0,5 мм, для этого время обработки составляет 55 часов.

Твёрдость и износостойкость азотированного слоя значительно повышается у специально легированных сталей (нитролоев), содержащих нитридообразующие элементы – Cr, Mo, Al, V, Ti. Поэтому азотированию подвергаются среднеуглеродистые легированные стали.

Хотя азотированная поверхность сталей (особенно легированных) обладает более высокой твёрдостью и износостойкостью, чем цементованная, азотирование применяется реже из-за большей длительности процесса и меньшей толщины упрочнённого слоя.

Технология азотирования состоит из нескольких операций:

1. Предварительная термическая обработка – улучшение. При этом сердцевина детали приобретает высокую прочность и вязкость.
2. Механическая обработка – для получения окончательных размеров.
3. Защита участков, не подлежащих азотированию. Для этого наносят электролитические оловянные покрытия (10 – 15 мкм).
4. Азотирование.
5. Доводка изделия (шлифование).

Ионное азотирование осуществляется в плазме тлеющего разряда. Стальной контейнер, в котором расположены обрабатываемые детали, является анодом. Сами детали – катодом. Через контейнер при низком давлении пропускается азотосодержащая среда (аммиак, азот и т.д.). Сначала при катодном распылении происходит очистка поверхности, затем ионы азота поглощаются поверхностью, далее идёт процесс диффузии. Температура при этом доходит до 450 – 550°C. Общее время процесса снижается в 2 – 3 раза. Процесс катодного распыления постоянно очищает поверхность детали от образующихся оксидных слоёв, препятствующих азотированию.

Ионное азотирование инструментов из быстрорежущей стали повышают их стойкость в 2 – 5 раз.

Нитроцементация – это совместное диффузионное насыщение стали азотом и углеродом. Азот способствует увеличению скорости диффузии углерода, что позволяет снизить температуру процесса до 850°C. Средой для нитроцементации является смесь углеводородных газов с аммиаком (3 – 5%). Про-

должительность процесса 2 – 10 ч., толщина слоя образующихся карбонитридов 0,25 – 1,0 мм.

Газовую нитроцементацию применяют для обработки изделий сложной формы, которые при высоких температурах могут подвергнуться короблению.

Цианирование – одновременное насыщение стали углеродом и азотом в расплавах солей. Ванна для цианирования содержит 20 – 25% NaCN, 25 – 50% NaCl и 25 – 50% Na₂CO₃. Температура процесса 820 – 860°C. За 1 час выдержки образуется слой толщиной 0,3 мм с содержанием углерода – 0,7% и 1% азота. После цианирования проводят закалку из ванны и низкий отпуск при 180 – 200°C.

Цианированный слой по сравнению с цементованным обладает более высокой износостойкостью.

Диффузионная металлизация - поверхностное насыщение стали алюминием (алитирование), хромом (хромирование), кремнием (силицирование), бором (борирование), цинком (цинкование). После насыщения поверхность приобретает жаростойкость, коррозионную стойкость, повышенную износостойкость и твердость.

Процесс может осуществляться в жидкой среде – расплаве металла или газовым методом – с помощью летучих соединений (хлоридов). Диффузия протекает при температуре 900 – 1050°C в течение 6 – 12 часов.

1.11 Конструкционные стали

Конструкционными называют, стали, применяемые для изготовления деталей машин, конструкций и сооружений. Конструкционными сталями могут быть углеродистые и легированные стали. Содержание углерода в этой группе сталей чаще не превышает 0,5÷0,6%.

Детали современных машин и конструкций работают в условиях высоких динамических нагрузок, концентраций напряжений и высоких (низких) температур. Все это может привести к хрупкому разрушению и снизить надежность работы механизмов. Поэтому конструкционные стали помимо высоких механических свойств, определяемых при стандартных испытаниях (σ_b , $\sigma_{0,2}$, a_n , δ , HB), характеризующих механические свойства, должны обладать высокой конструктивной прочностью, т.е. прочностью, которая проявляется в условиях реального применения стали. Конструкционная сталь должна обладать и хорошими технологическими свойствами: обрабатываемостью давлением (прокатка,ковка,штамповка и т.д.) и резанием, хорошей свариваемостью, высокой прокаливаемостью и малой склонностью к деформации и трещинообразованию при проведении термической обработки.

Классификация сталей. По химическому составу стали делят на углеродистые и легированные. Углеродистые стали по **качеству** делятся на обыкновенного качества и качественные. По **содержанию углерода** – на низкоуглеродистые (< 0,3 % C), среднеуглеродистые (0,3...0,6 % C) и высокоуглеродистые (> 0,6 % C).

Влияние углерода и примесей на свойства сталей. После отжига структура углеродистой стали представляет собой смесь феррита и цементита, в которой количество цементита увеличивается с увеличением содержания углерода. Феррит пластичный и малопрочный, а цементит твердый и хрупкий. Поэтому, с увеличением содержания **углерода** в стали прочность возрастает (до примерно 1,4%, т.к. затем сталь становится хрупкой), твердость возрастает, а пластичность и сопротивление ударным нагрузкам падают, снижается способность к деформации. Углерод изменяет и технологические свойства. С увеличением содержания углерода снижается способность деформироваться в горячем и особенно холодном состояниях, ухудшается свариваемость стали, коррозионная стойкость. Стали обладают низкими литейными свойствами.

Вредные примеси. **Сера** – находится в стали в виде FeS и способствует ее хрупкому разрушению при горячей обработке, т.е. красноломкости. **Фосфор** – растворяясь в феррите, делает его хрупким и повышает температуру перехода стали в хрупкое состояние (порог хладноломкости). **Азот, водород и кислород** – снижают пластичность и увеличивают склонность стали к хрупкому разрушению.

Полезные примеси. **Марганец** – упрочняет сталь, устраняет вредную серу (образует MnS , всплывающий и удаляющийся вместе со шлаком) и раскисляет сталь (удаляет FeO по реакции $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{MnO} + \text{Fe}$). **Кремний** – раскисляет сталь (удаляет FeO по реакции $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Fe}$) и повышает ее упругость.

Углеродистые стали

По **структуре** делятся на доэвтектоидные ($< 0,8\% \text{ C}$, состоят из феррита и перлита), эвтектоидные ($0,8\% \text{ C}$, состоят из перлита) и заэвтектоидные ($> 0,8\% \text{ C}$, состоят из перлита и цементита).

Углеродистые стали обыкновенного качества. Эти стали являются наиболее дешевыми. В них допускается высокое содержание вредных примесей и неметаллических включений. Выпускают в виде проката – листов, балок и т.п. Маркируются буквами Ст и цифрами 0...6, обозначающими номер марки по ГОСТу: Ст0...Ст6. Чем выше цифра, тем больше в стали углерода. В зависимости от гарантируемых качеств делят на три группы: **стали группы А** поставляются с гарантированными механическими свойствами, применяются без термообработки. С увеличением содержания углерода в стали предел прочности растет от 300 до 700 МПа, а пластичность понижается с 30% до 12%. **Стали группы Б** поставляются с гарантированным химическим составом, механические свойства не регламентируются, подвергаются термообработке (БСт1...БСт5). **Стали группы В** поставляются с гарантированными химическим составом и механическими свойствами, применяются для изготовления сварных конструкций (ВСт1...ВСт5).

Углеродистые качественные стали. Качественные углеродистые стали имеют пониженное содержание вредных примесей и неметаллических включений. Значительно меньше разброс по содержанию углерода. Поставляются с га-

рантированным химическим составом и механическими свойствами. Маркируются цифрами 08 ... 80, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (сталь 45 содержит 0,42 ... 0,48 % С). Стали 08...20 – **низкоуглеродистые**, имеют сравнительно низкую прочность (320-420 МПа), высокую пластичность (25-32%), хорошую свариваемость и штампуемость. Применяются для изготовления малонагруженных деталей. Стали 30...50 – **среднеуглеродистые**, имеют повышенную прочность (450-650 МПа), пластичность (14-20%). Применяются для изготовления деталей, несущих значительные нагрузки (шестерни, валы др.). Стали 65...85 – **высокоуглеродистые**, имеют более высокую прочность (550-650 МПа), износостойкость и упругость, пластичность (12-14%). Применяются для изготовления пружин и рессор.

Легированные стали

Легированными называются стали, в которые для получения требуемых свойств специально добавляется определенное количество легирующих элементов (ЛЭ).

Основными легирующими элементами конструкционных сталей являются хром, никель, кремний и марганец. Вольфрам, молибден, ванадий, титан, бор и другие элементы не применяют в качестве самостоятельных присадок, а вводят в сталь в сочетании с хромом, никелем и марганцем для улучшения свойств. В зависимости от процентного содержания легирующих элементов стали, подразделяются:

1. Низколегированные – до 2,5 легирующих элементов.
2. Среднелегированные – от 2,5 до 10% легирующих элементов.
3. Высоколегированные – свыше 10% легирующих элементов.

По структуре после нормализации конструкционные легированные стали могут быть отнесены к перлитному или аустенитному классу. Стали, содержащие до 0,25% углерода и более 10% легирующих элементов, образуют аустенитную структуру после нормализации, т.к. легирующие элементы расширяют температурный интервал устойчивости аустенита. Если же концентрация легирующих элементов менее 10%, а содержание углерода до 0,6%, то такие стали, относятся к перлитному классу.

Маркировка. В нашей стране принята буквенно-цифровая система, по которой содержащиеся в стали легирующие элементы обозначаются заглавными буквами русского алфавита: Х – Cr, Н – Ni, М – Mo, Т – Ti, К – Co, В – W, Г – Mn, С – Si, Ф – V, Ю – Al, Д – Cu, Р – B, А – N; количественное содержание их и углерода обозначается цифрами.

Первые две цифры в маркировке легированной стали соответствуют среднему содержанию углерода в сотых долях процента. Содержание легирующих элементов, если оно превышает 1,5%, отмечается следущей за буквой элемента цифрой, величина которой указывает содержание элемента в стали в процентах. Если же содержание элемента менее 1,5%, то цифра не ставится. Буква А в конце маркировки означает, что сталь высококачественная и содер-

жит пониженное количество примесей и инородных включений. Например, сталь 60С2ХФА: 0,6%С, ~2%Si, Cr <1,5%, V<1,5%, высокого качества.

Вводимые в сталь легирующие элементы могут растворяться в феррите, аустените и цементите или образовывать карбиды, а при высоком содержании легирующих элементов и интерметаллидные соединения с железом или между собой.

Легирование позволяет решить следующие задачи:

1. Механические свойства после термической обработки выше, чем у углеродистых сталей с тем же содержанием углерода.
2. Большинство легирующих элементов увеличивают область устойчивого аустенита. Поэтому прокаливаемость (способность стали приобретать закаленный слой на определенную глубину) легированных сталей выше. При закалке можно применять «мягкие» охладители (масло, воздух), что в значительной степени снижает брак по закалочным трещинам и короблению.
3. Повышается запас ударной вязкости и сопротивления хладноломкости.
4. Увеличивается коррозионная стойкость, жаростойкость и жаропрочность сталей.

Склонность стали к хрупкому разрушению связана с количеством присутствующих легирующих элементов. Наиболее благоприятно влияние никеля, меди и кремния. Действие хрома, вольфрама и молибдена весьма слабое, а марганца в большом количестве отрицательное.

Низкоуглеродистые и низколегированные стали содержат повышенное количество марганца и кремния, а также хром, никель, медь и некоторые другие элементы. Эти стали в горячекатаном состоянии или после нормализации применяют для сварных конструкций, магистральных нефте- и газопроводов и реже для изготовления деталей для машиностроения (таблица 1). Эти стали обычно не подвергают термической обработке.

Легирующие элементы, растворяясь в феррите, уменьшают размер зерна и, увеличивая склонность аустенита к переохлаждению, способствуют измельчению карбидной фазы. Поэтому низколегированные стали имеют более высокое значение пределов прочности и текучести при сохранении хорошей пластичности по сравнению с углеродистой сталью обыкновенного качества.

Таблица 1 - Механические свойства и назначение некоторых низколегированных сталей.

Марка стали	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Назначение
-------------	---------------------------	----------------------	--------------	------------

19Г	480	320	22	Сварные нефтепроводы; сварные конструкции доменных печей, пылеуловителей, воздухонагревателей и т.д.
14Г2	470	340	21	
17ГС	520	350	23	Газопроводные трубы, корпуса аппаратов, днищ, фланцев и других сварных конструкций.
14ХГС	500	350	22	Сварные трубы магистральных газопроводов.
15ХСНД	500	350	21	Строительные фермы, мосты, вагоны, рамы и т.д.

Низколегированные низкоуглеродистые стали хорошо свариваются. Это означает, что они не образуют при сварке холодных и горячих трещин, и свойства сварного соединения и участков, прилегающих к нему, близки к свойствам основного металла.

Низколегированные низкоуглеродистые стали могут подвергаться цементации. После цементации, закалки и низкого отпуска поверхностный слой приобретает высокую твердость и износостойкость, а сердцевина имеет высокий предел текучести. *Цементируемые* стали наиболее широко используют для изготовления шестерен, втулок, распределительных валиков и для деталей ответственного назначения, испытывающих при эксплуатации значительные динамические нагрузки. Цементации подвергают хромистые, хромованадиевые, хромомарганцевые и хромоникелевые стали (таблица 2).

Закалка и отпуск после цементации проводятся с целью измельчения зерна сердцевины и устранения сетки цементита в поверхностном слое, которая вызывает хрупкость.

Стали, содержащие $0,5 \div 0,7\%C$; $1,5 \div 2,8\%Si$; $0,6 \div 1,2\%Mn$; $0,2 \div 1,2\%Cr$; $0,1 \div 0,25\%V$; $0,8 \div 1,2\%W$ и $1,4 \div 1,7\%Ni$ используют для изготовления *пружин и рессор*. Эти стали должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, и пределом выносливости (сопротивлением разрушению при знакопеременных нагрузках) при достаточной пластичности и сопротивлении хрупкому разрушению. Сталь должна обладать хорошей закаливаемостью и прокаливаемостью, что достигается выбором соответствующего состава. Для получения всех этих свойств необходимо провести закалку и среднетемпературный отпуск (таблица 3). После закалки мартенситная структура должна быть по всему объему, причем чем мельче зерно, тем выше сопротивление стали малым пластическим деформациям. В случае присутствия легирующих элементов температуру отпуска можно повысить, что позволяет получить также хорошую пластичность и ударную вязкость.

Таблица 2 - Механические свойства цементируемых сталей после закалки и отпуска.

Марка стали	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ, МПа
15Х	650	430	10	1830
20Х	800	650	11	2280
20ХФ	900	800	17	2280
18ХГТ	1000	800	11	2280
20ХГНР	1160	1100	12,5	2280
12ХН4А	1150	950	10	2280
18Х2Н4ВА	1150	820	12	2280

Таблица 3 - Режимы термической обработки и механические свойства пружинных сталей.

Марка стали	Температура, °С		Механические свойства после термообработки		
	закалка	отпуск	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
65Г	830	480	1050	850	7
50С2	870	460	1200	1100	6
55С2А	870	460	1600	1400	6
70С3А	860	460	1800	1600	6
60С2ХФА	850	410	1900	1700	5
60С2ВА	850	420	1900	1700	5
60С2Н2А	880	420	1750	1600	6

Наибольшее применение в промышленности имеют **кремнистые** стали, т.к. кремний повышает закаливаемость, задерживает распад мартенсита при отпуске, значительно упрочняет феррит и обеспечивает высокие пределы текучести и упругости. Однако стали, легированные хромом и марганцем, имеют лучшие технологические свойства.

Безуглеродистые ($\leq 0,03\%$ С) высоколегированные стали называются мартенситностареющими. Эти стали обладают высокой прочностью (таблица 4).

Мартенситностареющие стали представляют собой сплавы железа с никелем (8÷20%), а часто и с кобальтом. Для протекания процесса старения в мартенсит добавляют также Ti, Be, Al, Nb, W, Mo. Упрочнение этих сталей достигается в результате получения мартенситной структуры после закалки и старения.

Никель и кобальт, уменьшая растворимость титана, алюминия, молибдена и вольфрама в α -железе, способствуют упрочнению при старении и одновременно повышают сопротивление хрупкому разрушению. Кобальт значительно повышает температуру мартенситного превращения (M_n), а это позволяет увеличить концентрацию других элементов, не изменяя точку M_n . Кроме того введение кобальта уменьшает количество остаточного аустенита после закалки. Наиболее эффективно упрочняют сталь при старении Be, Ti и Al, образуя интерметаллидные соединения – NiBe, NiTi, Ni₃Ti, NiAl и др.

Таблица 4 - Состав и свойства мартенситностареющих сталей.

Марка стали	Содержание элементов, %					Механические свойства			
	Ni	Co	Mo	Ti	прочие	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	a_{H_2} , Дж/м ²
H18K8M3T	18	8	3	0,2	-	1450	1400	15	0,8
H18K7M5T	18	6-8	5-6	0,5	-	1800	1700	8	0,5
H18K12M3T2	17-18	12-13	3,3-4,2	1,4-1,7	-	2400	2350	9	0,3
H17K11B10M2T	16-17	10-11	1,0-1,2	0,6-0,8	9-10 W	2350	2300	8,5	0,5
X11H10M2T	9-10,3	-	1,8-2,3	0,7-1,1	10-11,3 Cr	1550	1480	12	0,5
X12H9M2DT	8-9	-	0,5-1,0	0,5-1,0	12-13 Cr	1550	1500	10	0,5
X14H4K14M3T	3,8-4,8	13-14	2,6-3,2	0,2-0,5	13-14,5 Cr	1650	1500	20	0,8

Широкое применение в технике получила высокопрочная мартенситно-стареющая сталь H18K9M5T, содержащая $\leq 0,03\%C$; $\sim 18\%Ni$; $\sim 9\%Co$; $\sim 5\%Mo$; $\sim 0,7\%Ti$. Температура нагрева при ее закалке составляет $800-850^\circ C$, а охлаждение проводят на воздухе. После закалки сталь имеет в структуре безуглеродистый мартенсит, обладающий наряду с высокой прочностью, хорошей пластичностью и вязкостью. В закаленном состоянии сталь сравнительно легко обрабатывается давлением, резанием и хорошо сваривается. После закалки проводят искусственное старение. Для этого сталь нагревают до $480-520^\circ C$. Прочность повышается, а пластичность и вязкость снижаются. Механические свойства после старения: $\sigma_B = 1900 \div 2100$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1800 \div 2000$ МПа; $\delta = 8 \div 12\%$. Упрочнение этой стали связано с выделением при старении мартенсита интерметаллидных фаз типа Ni_3Ti , $NiTl$ и Fe_2Mo .

Мартенситностареющие стали используют для изготовления узлов и деталей конструкций, от которых требуется высокая удельная прочность в сочетании с большой эксплуатационной надежностью. К сталям с **особыми свойствами** относятся *коррозионностойкие (нержавеющие), жаростойкие и жаропрочные*.

Коррозией называют разрушение металлов в результате химического или электрохимического взаимодействия их с внешней (коррозионной) средой. Электрохимическая коррозия возникает при действии на материалы кислот, щелочей, влаги или воды и представляет для деталей механизмов и конструкций наибольшую опасность.

Значительное увеличение коррозионной стойкости сталей достигается введением в ее состав повышенного количества хрома. Объясняется это тем, что при легировании стали хромом свыше $12,5\%$ величина электрохимического потенциала стали смещается в положительную сторону. Это происходит вследствие образования тончайшей плотной пленки оксидов, которая защищает сталь от разрушения.

Кроме хрома, для увеличения стойкости против коррозии и улучшения качества стали добавляют и другие легирующие элементы (особенно никель).

Наилучшими коррозионными свойствами обладают *хромистые* и *хромоникелевые* стали (таблица 5).

Таблица 5 - Химический состав и механические свойства сталей с особыми свойствами.

Марка стали	Содержание элементов, %						Механические свойства		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	прочие	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
12X13	0,09-0,15	<0,8	<0,8	12,0-14,0	-	-	600	420	20
20X13	0,16-0,25	<0,8	<0,8	12,0-14,0	-	-	660	450	16
12X17	0,08-0,12	<0,8	<0,8	16,0-18,0	-	-	400	250	20
08X17T	0,04-0,08	<0,8	<0,8	16,0-18,0	-	(5·C-0,8)Ti	500	300	20
15X25T	0,08-0,15	<1,0	1,0-2,0	24,0-27,0	-	(5·C-0,9)Ti	450	300	20
08X18N10	0,04-0,08	<0,8	1,0-2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	-	500	200	50
12X18N9	0,08-0,12	<0,8	1,0-2,0	17,0-19,0	8,0-10,0	-	520	200	-
12X18N12T	0,08-0,12	<0,8	<0,8	17,0-19,0	11,0-13,0	(5·C-0,7)Ti	500	200	40
12X21N5T	0,09-0,14	<0,8	8,0-10,0	20,0-22,0	4,5-5,8	0,25-0,50 Ti <0,08Al	700	400	20
								250	40
20X13N4Г9	0,15-0,30	<0,8	13,0-15,0	12,0-14,0	3,7-4,7	-	700	230	-
10X14Г14N4Т	0,08-0,10	<0,8		13,0-15,0	2,8-4,5	(5·C-0,4) - 0,6Ti	650		

Хромистые нержавеющей стали обычно содержат от 0,08 до 0,45%С и от 12,5 до 18% Cr. Стали с 13% Cr обладают стойкостью против коррозии только при условии, что все содержание хрома в стали приходится на долю твердого раствора. В этом случае он образует на поверхности изделия плотную защитную оксидную пленку типа Cr_2O_3 . Увеличение содержания углерода, приводящее к образованию карбидов, создает двухфазную структуру, уменьшает количество хрома в твердом растворе и поэтому понижает коррозионную стойкость стали.

С целью повышения коррозионной стойкости эти стали подвергают термической обработке, состоящей из закалки (1000-1100°C в масле) и высокотемпературного отпуска (700-750°C).

Значительным недостатком хромистых сталей является их повышенная хрупкость в зонах сварных швов, где образуется очень крупнозернистая структура. Эти стали склонны к *межкристаллитной коррозии* от обеднения хромом границ зерен. Для уменьшения ее в состав сталей вводится небольшое количество титана как более интенсивного карбидообразующего элемента, чем хром. Межкристаллитная коррозия обусловлена тем, что при нагреве часть хрома около границ зерна взаимодействует с углеродом и образует карбиды. Вследствие этого концентрация хрома в твердом растворе у границ зерен становится меньше 13% и сталь в этих участках приобретает отрицательный электрохимический потенциал.

Стали 12X13 и 20X13 применяют для клапанов гидравлических насосов, лопаток гидротурбин, предметов домашнего обихода и т.д. Стали 30X13 и 40X13 используются для карбюраторных игл, пружин, хирургических инструментов и т.д. Эти стали подвергают закалке и низкому отпуску.

Более высокой коррозионной стойкостью обладают низкоуглеродистые высокохромистые стали 12X17, 15X25Т и 15X28. Они относятся к ферритному классу, т.е. высокая концентрация хрома повышает критическую точку A_3 , расширяя область α -Fe. Эти стали используют без термической обработки, т.к. при нагреве и охлаждении никаких изменений в структуре не происходит и она представляет собой твердый раствор легирующих элементов в феррите. Используют эти стали для оборудования заводов пищевой и легкой промышленности.

Хромоникелевые нержавеющие стали имеют в своем составе до 0,3%С; от 18 до 25% Cr и от 8 до 20% Ni. Все хромоникелевые стали благодаря высокому содержанию никеля относятся к *аустенитному* классу. Они обладают более высокими механическими и химическими свойствами.

Термическая обработка аустенитных сталей заключается в закалке с температур нагрева 1000-1050°C в воду. При нагреве происходит растворение карбидов хрома в аустените. Выделение их из аустенита при закалке исключается, так как скорость охлаждения велика. В результате весь хром сохраняется в твердом растворе, вследствие чего коррозионная стойкость стали сохраняется высокой. Обрабатываемость резанием этих сталей плохая, но они хорошо свариваются и штампуются.

Аустенитные стали имеют очень низкий порог хладноломкости и поэтому с успехом используются для конструкций, работающих при температурах до -200°C (сталь 07X21Г7АН5).

Для получения особо коррозионностойких материалов аустенитные стали дополнительно легируют медью или медью с молибденом, например, сталь 06X23Н28МДТ.

Жаростойкими называют стали, способные выдерживать длительные нагревы в области высоких температур без значительного окисления, т.е. без образования окалины (таблица 6).

Так как образование окалины является результатом коррозионного воздействия газов на поверхность, то жаростойкость следует рассматривать как сопротивление металла газовой коррозии. Сопротивляемость газовой коррозии при высоких температурах нагрева достигается за счет образования на поверхности сплава защитных пленок оксидов металлов.

Газовая коррозия при высоких температурах представляет процесс химического взаимодействия металлов преимущественно с кислородом воздуха и с другими газами. В результате этого на поверхности металлов первоначально образуется тонкая пленка оксидов. Если пленка окажется достаточно плотной, то она будет защищать металл от дальнейшего химического воздействия окружающей среды и коррозия прекратится. Рыхлая же пленка не способна защищать металл и процесс окалинообразования будет постепенно развиваться.

При нагревании углеродистой стали образуется неплотная пленка оксидов, состоящая главным образом из FeO и Fe₃O₄, которая не обладает защитными свойствами.

Таблица 6- Химический состав некоторых жаростойких сталей

Марка стали	Содержание элементов, %							Температура интенсивного окажинообразования в воздушной среде
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	прочие	
40X9C2	0,35-0,45	2,0-3,0	<0,8	8,0-10,0	-	-	-	850 °C
40X10C2M	0,35-0,45	1,9-2,6	<0,8	9,0-10,5	-	-	0,7-0,9 Mo	850 °C
30X13H7C2	0,25-0,34	2,0-3,0	<0,8	12,0-14,0	6,0-7,5	-	-	950 °C
15X18CЮ	<0,15	1,0-1,5	<0,8	17,0-20,0	-	0,7-1,2	-	1050 °C
15X28	<0,15	<1,0	<0,8	27,0-30,0	-	-	-	1100-1150 °C
08X18H10T	<0,08	<0,8	<2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	-	5-C-0,7	850 °C
12X18H12T	<0,12	<0,8	<2,0	17,0-19,0	11,0-13,0	-	5-C-0,7	850 °C
20X23H18	<0,12	<1,0	<2,0	22,0-25,0	17,0-20,0	-	-	1050 °C
12X25H16Г7AP	<0,12	<1,0	5,0-7,0	23,0-26,0	15,0-18,0	-	B<0,005	1100 °C

Основным легирующим элементом современных жаростойких сталей является хром, образующий плотную защитную пленку оксидов с поверхности. Чем выше содержание хрома в стали, тем выше ее жаростойкость. Например, сталь содержащая 12-14% Cr, жаростойкая до температуры 750-800°C, хромистая сталь с 25% Cr – до 1000°C, а сталь с 30-35% Cr – до 1100°C (таблица 6). Никель способствует образованию аустенитной структуры. Стали с такой структурой легче обрабатывать, они отличаются хорошими механическими свойствами. На повышение жаростойкости оказывают влияние и добавки Si и Al, но их содержание в сумме должно быть не более 4%, так как при увеличении процентного содержания этих элементов ухудшаются технологические свойства сталей. Титан, ниобий и тантал связывают углерод в карбиды, предотвращая выделение карбидов хрома, которые обедняют близлежащую зону стали хромом и приводит к уменьшению жаростойкости. Молибден и вольфрам несколько повышают жаростойкость, уменьшают склонность стали к ползучести при высоких температурах (не более 3-4%). Церий и бериллий (до 1%) повышают жаростойкость.

Эти стали используют для изготовления труб, теплообменников, клапанов тракторных и дизельных двигателей, деталей печной арматуры и т.д.

Жаропрочными называют стали, обладающие механической прочностью при высоких температурах.

Сталь и другие сплавы, нагретые до определенной температуры, обнаруживают способность постепенно пластически деформироваться (“ползти”) при длительных постоянных нагрузках, несмотря на то, что эти нагрузки значительно ниже показателей сопротивления деформированию при кратковременных испытаниях. Это явление называется ползучестью металлов.

Особенности поведения металлов в области высоких температур вызывают необходимость применения специальных методов испытаний и установления особых критериев механической прочности в нагретом состоянии. В большинстве случаев жаропрочность оценивается с помощью определения следующих характеристик:

1. Предел ползучести ($\sigma_{пл.}$) – напряжение, при котором через определенный промежуток времени деформация ползучести при данной температуре получит заранее заданную величину.
2. Длительная прочность (σ_d) – напряжения, вызывающие разрушение металла при заданной температуре за определенный отрезок времени.

Рабочие температуры современных жаропрочных сплавов составляют примерно $0,45-0,80T_{пл.}$. Требуемые сроки службы таких материалов изменяются от одного-двух часов (ракеты) до сотен (авиационные газовые турбины) и многих тысяч часов (стационарные газовые и паровые турбины).

Повышение жаропрочности достигается легированием и термической обработкой, состоящей из закалки и старения, в результате которых получается специальная структура. Она состоит из вкрапленных в основной твердый раствор и по границам зерен дисперсных карбидных и особенно интерметаллидных фаз.

Рабочие температуры жаропрочных сталей составляют $500-750^{\circ}\text{C}$. При температурах до 600°C чаще используют стали на основе α -твердого раствора, т.е. перлитного и мартенситного классов, а при более высоких температурах стали аустенитного класса.

Стали перлитного класса – низкоуглеродистые, содержащие хром, молибден и ванадий в количестве $\geq 1,0\%$ каждого элемента (таблица 7). Эти элементы увеличивают жаропрочность стали за счет повышения температуры рекристаллизации феррита и затруднения диффузионных процессов. Перлитные стали чаще всего подвергают нормализации и высокотемпературному отпуску. Основное применение их в котлостроении. Хорошо свариваются и обрабатываются давлением.

Жаропрочные стали мартенситного класса в своем составе имеют Cr, W, V, Mo, Nb, Ti, которые, повышая температуру рекристаллизации и образуя карбиды, улучшают жаропрочность (таблица 7). Эти стали подвергают закалке и отпуску. Используют их для изготовления деталей и узлов газовых турбин и паросиловых установок.

Стали аустенитного класса для получения такой структуры содержат большое количество хрома, никеля и марганца. Для достижения высокой жаропрочности их дополнительно легируют W, V, Mo, Nb и B (таблица 7). Эти стали пластичны и хорошо свариваются, однако по сравнению с перлитными и мартенситными обработка их резанием затруднена. Для достижения высокой жаропрочности аустенитные стали подвергают закалке и старению. После термической обработки структура стали состоит из γ -твердого раствора, карбидов и интерметаллидных фаз. Из сталей этого класса изготавливают паронагреватели и трубопроводы силовых установок.

Таблица 7 - Химический состав и механические свойства жаропрочных сталей.

Марка стали	Содержание элементов, %						Механические свойства	
	C	Cr	Mo	V	Ni	Другие элементы	$\sigma_{д10}^{600}$, МПа	$\sigma_{д100}^{700}$, МПа
Стали перлитного класса								
15ХМ	0,11-0,16	0,8-1,0	0,40-0,55	-	-	-	75	-
12ХМФ	0,08-0,15	0,9-1,2	0,25-0,35	0,15-0,30	-	-	80	-
25ХМФ	0,22-0,29	1,5-1,8	0,25-0,35	0,15-0,30	-	-	85	-
Стали мартенситного класса								
15Х11МФ	0,12-0,19	10,0-11,5	0,60-0,80	0,25-0,50	-	0,7-1,1 W	97	-
15Х12ВНМФ	0,12-0,18	11,0-13,0	0,50-0,70	0,15-0,30	-	0,4-0,8 Ni	170	-
Стали аустенитного класса								
09Х14Н16Б	0,07-0,12	13,0-15,0	-	-	14,0-	0,9-1,3 Nb		250
09Х14Н19В2БР	0,07-0,12	13,0-15,0	-	-	17,0- 18,0- 20,0	0,9-1,3 Nb 2,0-2,8 W < 0,005 B < 0,02 Ce		260

1. 12 Инструментальные материалы

К инструментальным материалам относятся материалы, применяемые для изготовления измерительных, режущих инструментов и штампов для холодной и горячей штамповки.

Все материалы, применяемые для изготовления режущих инструментов объединяют по следующим группам:

1. Стали:

- углеродистые (пониженной прокаливаемости);
- легированные (повышенной прокаливаемости).

2. Твердые сплавы:

- металлокерамические;
- минералокерамические.

3. Абразивные материалы.

Требования, предъявляемые к инструментальным материалам:

1. Высокая твёрдость и износостойкость – для режущего и измерительного инструмента.
2. Сохранение твёрдости при длительном нагреве (до красного каления) – красностойкость (теплостойкость) – для режущего инструмента.
3. Высокая вязкость при повышенных температурах – для штампового инструмента.

Углеродистые инструментальные стали. В процессе резания металлов режущая кромка испытывает громадные давления, в 200-300 раз превышающие удельные давления в деталях машин. Работа, затраченная на снятие стружки превращается в тепло, что приводит к нагреву режущей кромки до 500-1000⁰С. Режущий инструмент испытывает вибрации, удары и трение об обрабатываемую деталь и сходящую стружку. Эти условия работы определяют специфические требования к инструментальным материалам.

Углеродистые инструментальные стали подразделяются на качественные (У7, У8, У9...У13) и высококачественные (У7А, У8А, У9А...У13А). В маркировке буква У обозначает, что сталь углеродистая, а цифра – среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква А указывает на то, что в стали меньше серы, фосфора и неметаллических включений, т.е. она высокого качества.

Характерные особенности:

- неглубокая прокаливаемость (10-15 мм), что ограничивает применение для изготовления инструментов больших сечений,
- пониженная устойчивость переохлажденного аустенита, что вызывает необходимость охлаждать инструмент при закалке в воде, что нередко приводит к трещинам и короблению.

После закалки и низкого отпуска твердость составляет HRC 60-64. Эта твердость сохраняется только при нагреве в процессе работы до 200-250⁰С, теплостойкость (красностойкость) невысокая. Поэтому скорость резания при обработке металлов не превышает 10-15 м/мин.

Углеродистые инструментальные стали поставляются в прокате – круглого, квадратного, шестигранного профиля и в виде полосы. Используются эти стали для изготовления напильников, метчиков, сверл и др. инструментов небольшого диаметра, работающих при невысоких нагрузках.

Инструментальные легированные стали повышенной прокаливаемости содержат сравнительно небольшое количество легирующих элементов – 1-3%. Хром, кремний, марганец - для повышения закаливаемости и прокаливаемости. Ванадий, вольфрам, молибден – для обеспечения высоких механических свойств. Содержание углерода указывается в десятых долях процента (например, марка 9ХС содержит 0,9%С, 1%Cr, 1,4%Si). Если стали содержат около 1% углерода, он в маркировке не указывается – ХСВФ, ХГ, ХВГ, В1, ХВ5, Х.

Твердость после закалки (в масле) и низкого отпуска составляет HRC 58-62, теплостойкость невысокая – 200-250⁰С. Свойства этих сталей позволяют изготавливать инструменты больших размеров, чем из углеродистых сталей.

Штампы для холодной и горячей штамповки бывают больших размеров – 500х500х500мм и более. Поэтому стали для их изготовления должны обладать не только глубокой прокаливаемостью, но и высокой износостойкостью (для холодной штамповки) и разгаростойкостью (для горячей штамповки). Под разгаростойкостью понимается способность металла выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования сетки трещин на поверхности, за счет более высокой прочности.

Выпускаются стали для холодной штамповки с содержанием хрома 6-12% (X12, X12BM, X6ВФ, 6X6B3MФC и др.), для горячей штамповки применяют легированные стали с содержанием углерода 0,3-0,6%, которые после заковки подвергают отпуску при 550-680⁰С на троостит или троостосорбит (5XНМ, 5XГМ, 5XНТ, 3X2B8, 4X5B2ФC и др.).

Для изготовления ударных инструментов необходима сталь с повышенной вязкостью и износостойкостью (4XC, 6XBГ и др.).

Быстрорежущие стали – это высоколегированные стали, обладающие высокой теплостойкостью, которая обеспечивается большим количеством вольфрама в сочетании с другими карбидообразующими элементами – молибденом, хромом, ванадием.

Вольфрам и молибден в присутствии хрома связывают углерод в карбиды и задерживают распад мартенсита. Благодаря комплексному легированию инструменты из быстрорежущих сталей сохраняют высокую твёрдость до 560 – 640⁰С и увеличивают производительность резания в 2 – 4 раза, по сравнению с углеродистыми и низколегированными сталями.

Маркировка быстрорежущих сталей начинается с буквы Р – рапид (быстрый), следующая цифра (число) обозначает среднее содержание вольфрама. Во всех сталях этой группы содержание углерода составляет 0,8 – 1%, ванадия ~ 2%, хрома ~ 4%. Поэтому они в маркировке не указываются. Стали, содержащие дополнительно молибден, кобальт или повышенное содержание ванадия соответственно имеют в своей маркировке буквы М, К, Ф, с указанием их процентного содержания. (Р19, Р18, Р6М3, Р6М5, Р9Ф5, Р10К5Ф5, Р9К15, Р9К10).

Основной упрочняющей фазой быстрорежущих сталей являются карбиды и в первую очередь – карбиды вольфрама (в виде карбидов содержится 80 – 95% вольфрама и ванадия). Необходимо, чтобы мелкодисперсные карбиды были равномерно распределены в объёме стали. В связи с этим быстрорежущие стали подвергаются довольно сложной термической обработке.

Сначала проводится закалка. Нагрев под закалку проводится медленно из-за их низкой теплопроводности. Температура нагрева достигает 1300⁰С для растворения карбидов. Охлаждение мелких инструментов проводят на воздухе (самозакаливающиеся стали мартенситного класса), крупных – в масле. После закалки в структуре сталей сохраняется до 30 – 40% остаточного аустенита. Остаточный аустенит превращается в мартенсит при трехкратном отпуске (550 – 570⁰С) или обработке холодом. В процессе выдержки при отпуске из мартенсита и остаточного аустенита выделяются карбиды, и аустенит претерпевает мартенситное превращение.

За один цикл отпуска весь остаточный аустенит не претерпевает мартенситного превращения, поэтому используют трёхкратный отпуск (рисунок 24 а). Обработка холодом значительно сокращает время термической обработки (рисунок 24б). Если инструмент изготавливать из распылённых порошков, то за счёт сильного измельчения карбидов и равномерного их распределения в спечённой стали стойкость инструмента увеличивается в 1,5 – 2 раза.

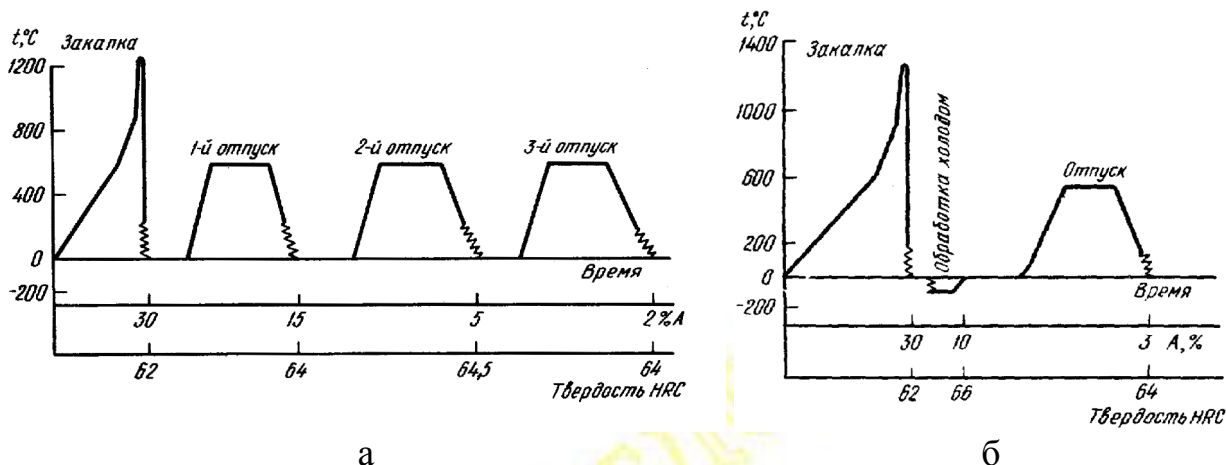


Рисунок 24 - Термообработка быстрорежущей стали с трёхкратным отпуском (а); с использованием обработки холодом (б) (%А – количество остаточного аустенита)

Твёрдые сплавы. Твёрдыми сплавами называются спечённые материалы, состоящие из тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала, соединённых металлической связкой (в основном – кобальтовой). Их получают методом порошковой металлургии, смешивая порошки карбидов с порошком кобальта (связка) и спекая при $T = 1400 - 1550^{\circ}\text{C}$, получая при этом пластины простой формы. Режущие пластины из этих сплавов обладают высокой твёрдостью, износостойкостью и теплостойкостью ($800 - 1000^{\circ}\text{C}$).

Механические свойства изделий из твёрдых сплавов во многом определяются соотношением связки и карбидов. С увеличением содержания связки уменьшается твёрдость, но повышается прочность и вязкость. К недостаткам относится сложность изготовления фасонных изделий и высокая хрупкость.

В зависимости от состава карбидной основы твёрдые сплавы делятся на три группы:

1. *Однокарбидные – вольфрамовая группа $WC - Co$.* Маркировка ВК и цифра, показывающая содержание кобальта в процентах – ВК3–ВК25. Теплостойкость – 800°C . При одинаковом содержании кобальта эти сплавы по прочности превосходят другие твёрдые сплавы, но уступают им по твёрдости.

2. *Двухкарбидные – титановольфрамовая группа $TiC - WC - Co$.* Маркировка ТК и цифры, показывающие содержание в процентах карбида титана и кобальта. При спекании образуется твёрдый раствор $(Ti, W)C$. Этот карбид обладает более высокой твёрдостью, чем WC . Теплостойкость – $900-1000^{\circ}\text{C}$. С увеличением содержания карбида титана теплостойкость повышается. (Т5К10, Т15К6, Т30К4).

3. *Трёхкарбидные – титанотанталовольфрамовые $TiC - TaC - WC - Co$.* Маркировка – ТТ, следующая цифра обозначает суммарное содержание в процентах карбидов титана и тантала в процентах, а после буквы К – количество кобальтовой связки (ТТ7К12, ТТ10К8, ТТ20К9). Карбидная основа представляет собой твёрдый раствор $(Ti, Ta, W)C$ и избыток карбида вольфрама. Эти сплавы отличаются от предыдущих более высокой прочностью, они лучше сопротивляются вибрации.

Абразивный материал применяется в виде режущих зерен, которые могут быть приготовлены как порошок, паста, наклеены на бумагу или связаны в виде брусков или кругов керамической или органической связкой. Режущие свойства обеспечиваются высокой твердостью и хрупкостью зерна. Делятся на природные (алмаз, корунд и наждак) и искусственные.

К искусственным относятся следующие:

1. Синтетический алмаз (АС), теплостойкость алмаза – 800°C . Невысокая теплостойкость сочетается с высокой теплопроводностью алмаза. Твердость по Виккерсу HV 100 000 МПа.

2. Поликристаллический нитрид бора с кубической решёткой – кубический нитрид бора (КНБ, β -BN) имеет алмазоподобную решётку и близкие с алмазом свойства (HV 90 000 МПа), однако превосходит его по теплостойкости (1200°C) и более химически инертен. В зависимости от технологии получения этот материал выпускается под названиями: эльбор, эльбор-Р, боразон.

3. Электрокорунд – окись алюминия Al_2O_3 , получаемая в электрических печах.

4. Карбид кремния (карборунд) – SiC. Получается сплавлением кварцевого песка с углеродом. Обладает большей твердостью и хрупкостью, чем электрокорунд.

Износостойкие сплавы. Типичными случаями износа являются обычное трение скольжения и абразивный износ. В первом случае металла наклепывают с поверхности. Во втором случае, когда частицы металла вырываются с поверхности, износостойкость определяется твердостью и сопротивлением отрыву. Износостойкость может быть повышена химико-термической обработкой.

Высокой стойкостью к износу обладает *графитизированная сталь*. Графит в структуре получается за счет частичного разложения цементита, поэтому графитизирующиеся стали должны иметь высокое содержание углерода (1,5-2%) и кремния (1-2%), последний повышает способность стали к графитизации. После термообработки структура стали состоит из зернистого перлита с некоторым количеством мелких округлых включений графита. При неабразивном износе графит играет роль смазки, предотвращая сухое трение и схватывание. Кроме того, эти стали обладают антивибрационными свойствами.

Аустенитная высокомарганцовистая сталь (сталь Гадфильда) в условиях обычного трения, сопровождаемого большим удельным давлением, при невысокой твердости (HV 2000-2500 МПа) обладает хорошей износоустойчивостью. Эта сталь содержит 1,2% С и 13% Мн (Г13), обладает типичными для аустенитных сталей высокими вязкостью и пластичностью при достаточно хорошей прочности, повышенной способностью к наклепу.

В целях резкого повышения износостойкости, а также восстановления размеров изношенных деталей используются *наплавочные материалы*. В виде прутков (трубок) изготавливаются наплавки из твердых, износоустойчивых, но не обладающих высокой механической прочностью из-за хрупкости, материалов. Например, эвтектической смесью $\text{W}_2\text{C}+\text{WC}$ наполняют железную трубку и расплавляют до жидкого (полужидкого) состояния на той поверхности детали, которая подвергается сплошному износу.

1.13 Алюминий и сплавы на его основе

В мировой промышленности алюминиевые сплавы характеризуются наибольшим объемом производства среди цветных металлов и уступают только стали. Практически нет ни одной отрасли, в которой не использовались бы алюминиевые сплавы. Алюминий и алюминиевые сплавы – первые конструкционные металлы, которые были использованы в самолетостроении. Свое значение в самолетостроении алюминий сохраняет и сейчас – до 75% массы современного самолета составляют детали на его основе. Алюминиевые сплавы также применяют в строительных конструкциях, судостроении, железнодорожном и автотранспорте, электротехнике и т.д. В химическом машиностроении алюминиевые сплавы используют для изготовления хранилищ жидких газов (кислорода, азота природного и др.), ректификационных колонн и трубопроводов.

До конца 80-х годов 19 века алюминий почти не производился и его стоимость была сопоставима со стоимостью золота. Снижение цены началось только после разработки в 1886 году электролизного способа выплавки алюминия.

Алюминий – химический элемент III группы периодической системы элементов. Серебристо-белый металл, при обычных условиях покрытый тонкой оксидной пленкой. Во всех устойчивых соединениях алюминий трехвалентен, но при высоких температурах может быть одновалентен.

По распространенности в природе алюминий занимает первое место среди металлов. Его содержание в земной коре составляет около 8%. В свободном состоянии в природе не встречается из-за высокой химической активности. Наиболее ценной алюминиевой рудой являются бокситы, где содержится около 50% Al_2O_3 . Производство алюминия заключается в получении Al_2O_3 из алюминиевых руд щелочным, кислотным, электротермическим или комбинированным способами, а затем проводится электролиз Al_2O_3 на получение первичного металла. Производство энергоемкое, до 30% стоимости алюминия составляет электроэнергия, поэтому производства располагают вблизи мощных электростанций.

Алюминий обладает гранецентрированной кубической решеткой; низкой плотностью $\gamma=2,7 \text{ г/см}^3$; низкой температурой плавления $t_{пл}=660^\circ\text{C}$; высокой теплопроводностью $\lambda=0,57 \text{ кал/см}\cdot\text{сек}\cdot\text{град}$; высокой электропроводностью, составляющей 65% электрической проводимости меди.

Отожженный алюминий высокой чистоты имеет $\sigma_B=60 \text{ МПа}$; $\delta=40\%$; 25НВ. После холодной прокатки механические свойства меняются: $\sigma_B=180\text{-}240 \text{ МПа}$; 45-60 НВ; $\delta=3\text{-}5\%$.

Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью на воздухе и в кислых средах за счет образования на поверхности оксидной пленки Al_2O_3 . Чем чище алюминий, тем выше его коррозионная стойкость.

Алюминий хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состояниях, но плохо обрабатывается резанием, хорошо сваривается.

В зависимости от способа получения и химического состава различают: алюминий особой чистоты, алюминий высокой чистоты и алюминий технической чистоты.

Алюминий особой чистоты марки А999 содержит менее 0,001% примесей. Получают его зонной плавкой и применяют для научно-исследовательских целей и в полупроводниковой и ядерной технике.

Алюминий высокой чистоты марок А995, А99, А97, А95 содержит 0,005-0,05% примесей. Используют при производстве электрических конденсаторов и другой аппаратуры.

Алюминий технической чистоты марок А85, А8, А7, А6, А5 и др. содержит 0,15-1,00% примесей. Применяют для изготовления фольги, токопроводящих изделий и получения алюминиевых сплавов. Технический алюминий, поступающий в виде листов, профилей, прутков и других полуфабрикатов, маркируется АД и АД1.

Как конструкционный материал алюминий применять нецелесообразно из-за низкой прочности, а вот сплавы на основе алюминия обладают необходимыми механическими свойствами.

Сплавы на основе алюминия. В качестве основных легирующих элементов при производстве алюминиевых сплавов используют Cu, Mn, Mg, Si, Zn и др.

Большинство легирующих элементов образуют с алюминием твердые растворы ограниченной растворимости и интерметаллидные фазы с алюминием и между собой (CuAl_2 , Mg_2Si , Al_3Mg_2 и др.).

Все алюминиевые сплавы можно разделить на три группы:

а) деформируемые, предназначенные для получения полуфабрикатов прокаткой и волочением или ковкой и штамповкой (рисунок 28, участок А);

б) литейные сплавы, предназначенные для получения изделий методом фасонного литья (рисунок 28, участок Б);

в) сплавы, получаемые методом порошковой металлургии (САП – спеченные алюминиевые порошки, САС – спеченные алюминиевые сплавы).

В зависимости от способности сплавов упрочняться термической обработкой их подразделяют на:

- упрочняемые термической обработкой (рисунок 28, участок Г)
- не упрочняемые термической обработкой (рисунок 28, участок В).

Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термической обработкой

К этим сплавам относятся сплавы алюминия с марганцем или магнием концентрации менее точки «а» на рисунке 25.



Рисунок 25 – Диаграмма состояния Al - ЛЭ

Структура этих сплавов после медленного охлаждения состоит только из α -твердого раствора марганца или магния в алюминии. Никаких структурных изменений в этих сплавах при нагревании и охлаждении не происходит, поэтому применение термической обработки с целью повышения прочности невозможно. Упрочнение этих сплавов возможно только за счет холодной пластической деформации, т.е. наклепа (нагартовки).

Маркируются эти сплавы буквами АМц (алюминий с марганцем) или АМг (алюминий с магнием), а цифра, стоящая после буквы легирующего элемента, показывает среднее его содержание в процентах. Если же цифра отсутствует, то содержание легирующих элементов менее 1,5%. Например: АМг2 – Mg – 2%, остальное алюминий.

Химический состав и механические свойства некоторых марок этих сплавов представлены в таблице 8.

Структура сплава АМц представляет собой α -твердый раствор марганца в алюминии и небольшое количество частиц соединения Al_6Mn .

Структура сплавов АМг до содержания магния 1,4% представляет собой α -твердый раствор магния в алюминии (рисунок 26). При большем содержании ($Mg > 3\%$) упрочнение термообработкой возможно (что следует из кривой растворимости в системе Al-Mg), но эффект упрочнения невелик. Для того чтобы повысить прочность и измельчить зерно, в эти сплавы добавляется марганец, который образует дисперсные частицы Al_6Mn .

Сплавы Al-Mn и Al-Mg применяют в отожженном состоянии.

Таблица 8 - Химический состав и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов не упрочняемых термической обработкой

Марка	Химический состав, %			Механические свойства *		
	Al	Mn	Mg	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %

АМц	основа	1,0-1,6	-	130(170)	50(130)	23(10)
АМг2	основа	0,2-0,6	1,8-2,8	200(250)	100(200)	23(10)
АМг3	основа	0,3-0,6	3,2-3,8	220	110	20
АМг5	основа	0,3-0,6	4,8-5,8	300	150	20
АМг6	основа	0,5-0,8	5,8-6,8	340(400)	170(300)	18(10)

* Без скобок приведены свойства сплавов в отожженном состоянии, а в скобках – в полунагартованном состоянии.

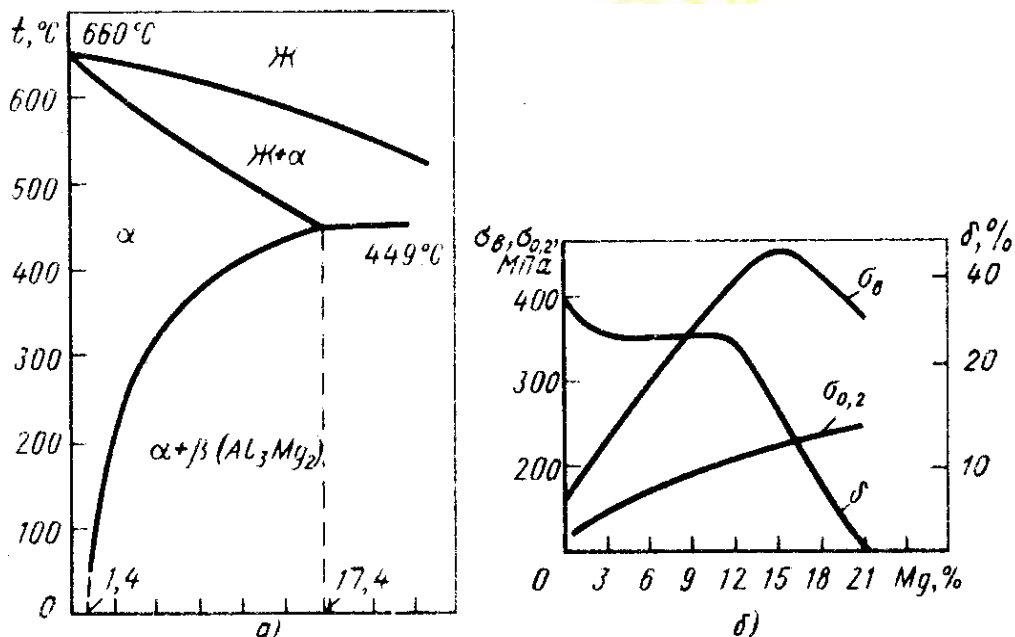


Рисунок 26 - Диаграмма состояния Al-Mg (а)
и зависимость механических свойств сплавов от содержания магния (б)

Эти сплавы легко обрабатываются давлением, а резанием обработка затруднена, хорошо свариваются и имеют высокую коррозионную стойкость. Имеют сравнительно невысокую прочность и твердость, хорошую пластичность. Их применяют для изготовления изделий, испытывающих небольшие нагрузки, например: баки для бензина, оконные рамы и двери, трубные узлы в холодильных установках и др.

Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой

К таким сплавам относятся сплавы алюминия с медью, магнием и другими легирующими элементами с концентрацией от «а» до «б» (рисунок 25). В эту группу входят такие сплавы как дюралюмин, авиаль, высокопрочные, ковочные и жаропрочные.

Дюралюмины. Дюралюминами называют сплавы на основе алюминия и меди, которые содержат также магний и марганец, а в качестве примесей – железо и кремний.

Марганец повышает стойкость дюралюмина против коррозии, повышает температуру рекристаллизации и улучшает механические свойства за счет присутствия в структуре дисперсных частиц $Al_{12}Mn_2Cu$. Железо является вредной примесью, т.к. снижает эффект упрочнения при старении вследствие образования нерастворимого в алюминии соединения Al_7Cu_2Fe . Кремний, как и железо, способствует понижению прочности, но вызвано это уменьшением количества основных упрочняющих фаз ($CuAl_2$ и Al_2CuMg).

Кроме этого вредное влияние железа и кремния сказывается и на трещиностойкости K_{Ic} , т.е. облегчается распространение трещин при действии растягивающих напряжений. Допустимое содержание железа и кремния до 0,5% согласно ГОСТа 4784-74. Снижение содержания железа и кремния 0,1-0,3% и ниже значительно повышает вязкость разрушения K_{Ic} , не изменяя величины σ_B и $\sigma_{0,2}$.

Наибольшее практическое применение имеют такие марки дюралюмина как Д1 и Д16 (таблица 9). Буква Д обозначает в маркировке, что это дюралюмин (дюраль), а цифра после буквы – порядковый номер в ГОСТе.

Таблица 9 - Химический состав и некоторые механические свойства дюралюминов после закалки и старения

Марка	Химический состав, %				Механические свойства		
	Al	Cu	Mg	Mn	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Д1	основа	3,8-4,8	0,4-0,8	0,4-0,8	490	320	14
Д16	основа	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	540	400	11

Для упрочнения дюралюминов проводят закалку и старение. Закалка состоит в нагреве сплавов до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы ($CuAl_2$) полностью или почти полностью растворяются в алюминии (линия абс., рисунок 27) и концентрация меди в α -твердом растворе повышается. После выдержки при данной температуре проводят быстрое охлаждение. При быстром охлаждении медь не успевает выделиться в виде интерметаллида $CuAl_2$ и образуется пересыщенный твердый раствор меди в алюминии. После закалки дюралюмины обладают высокой пластичностью ($\delta = 25\%$) и мягкостью. Это используется при проведении различных формоизменяющих операций в холодном состоянии. Однако пересыщенный α -твердый раствор неустойчив, и из него самопроизвольно начинает выделяться избыточная мелкодисперсная интерметаллическая фаза $CuAl_2$, что придает дюралюмину повышенную твердость и прочность. Этот процесс называется старением. Если старение проводится при комнатной температуре, (естественное старение), то упрочняющий эффект достигается на 5-6 сутки. Если же после закалки сплав нагреть до 150-200°C, то упрочнение произойдет через 10-20 часов, и такое старение называют искусственным. Однако, естественное старение предпочтительнее, т.к. обеспечивает получение более высокой коррозионной стойкости.

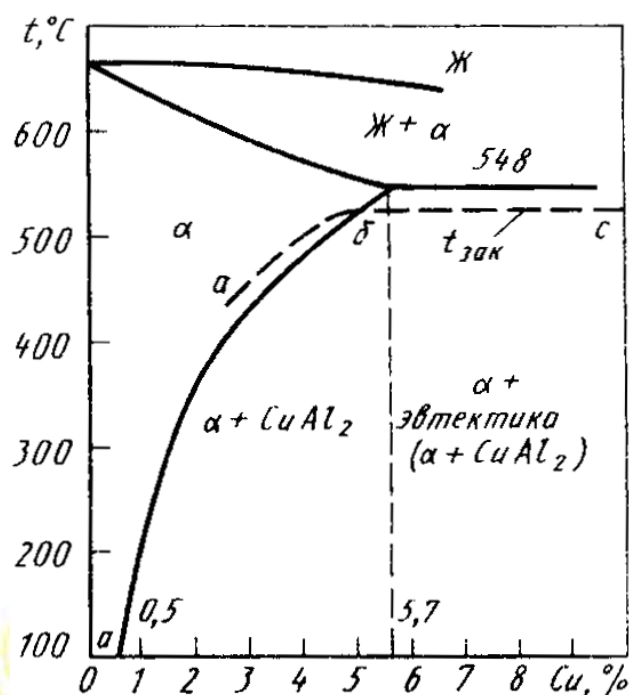


Рисунок 27 - Диаграмма состояния Al - Cu
(штриховая линия – температура закалки сплавов)

Дюралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием после закалки, и после старения, хорошо свариваются точечной сваркой, но сварной шов обеспечивает только 60-70% прочности основного металла поэтому соединение листов дюралюмина осуществляется заклепками. Удельная прочность дюралюмина после закалки и старения близка к удельной прочности легированной стали.

Для повышения коррозионной стойкости дюралюмины подвергают, либо электрохимическому оксидированию, либо плакированию (т.е. наносят тонкий слой алюминия) или покрывают краской. Эти сплавы используют в самолетостроении (т.е. изготавливают обшивки, шпангоуты, стрингеры и лонжероны самолетов), а также силовые каркасы, строительные конструкции, кузова грузовых автомобилей и т.д.

Сплавы авиаль. Это алюминиевые сплавы, содержащие в качестве основных легирующих элементов магний (до 1,2%) и кремний (до 1,2%). Эти сплавы обладают большей пластичностью в холодном и горячем состоянии, чем дюралюмины, но меньшей прочностью.

Кроме Mg и Si, которые образуют упрочняющую интерметаллическую фазу Mg_2Si , в составе авиалей содержатся марганец, хром и медь (таблица 10).

Упрочнение сплавов достигается путем проведения закалки ($t=515-525^\circ C$ и охлаждение в воде) и последующего искусственного старения ($t=160-170^\circ C$, выдержка 10-12 ч.). Авиаль отличается высокой пластичностью (что дает возможность ковать и штамповать детали сложной формы), значительной коррозионной стойкостью, удовлетворительной механической прочностью и свариваемостью, хорошей технологичностью. Наиболее широкое применение имеют сплавы в транспортном машиностроении, строительстве и др. отраслях для из-

готовления конструкций, несущих умеренные нагрузки, кованных деталей двигателей, рам, дверей и т.д.

Таблица 10 - Химический состав авиалей и основные механические свойства после закалки и искусственного старения

Марка сплава	Содержание элементов, %						Механические свойства		
	Al	Mg	Si	Mn	Cr	Cu	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АВ	основа	0,45-0,9	0,5-1,2	0,15-0,35	-	0,1-0,5	360	300	12
АД31	основа	0,4-0,9	0,3-0,7	-	-	-	250	200	12
АД33	основа	0,8-0,12	0,4-0,8	-	0,15-0,35	0,15-0,4	340	280	11

Высокопрочные алюминиевые сплавы. Эти алюминиевые сплавы имеют сложный химический состав. Главными легирующими элементами являются магний, медь, марганец и цинк. Наибольшее распространение среди высокопрочных алюминиевых сплавов имеет марка В95. химический состав этого сплава, кроме алюминия, представляет собой 1,4-2,0% Cu; 1,8-2,8% Mg; 0,2-0,6% Mn; 5-7% Zn и 0,1-0,25% Cr. Механические свойства этого сплава: $\sigma_B = 560-600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 530-550$ МПа, $\delta = 8\%$ (после закалки и естественного старения).

В качестве упрочняющих фаз в этих сплавах выступают такие интерметаллидные соединения как $MgZn_2$, $Al_2Mg_3Zn_3$, Al_2CuMg . Чем выше содержание цинка и магния, тем выше прочность этих сплавов, но пластичность и коррозионная стойкость уменьшаются. Повысить коррозионную стойкость можно путем добавления в сплав марганца и хрома. С целью повышения прочности эти сплавы подвергают закалке ($t=460-470^\circ\text{C}$ и охлаждение в воде) и искусственному старению при температуре $135-145^\circ\text{C}$ в течение 16 ч. По сравнению с дюралюминами высокопрочные сплавы обладают большей чувствительностью к концентраторам напряжений, меньшим пределом выносливости и вязкостью разрушения.

Сплавы обладают хорошей пластичностью в горячем состоянии и сравнительно легко деформируются в холодном состоянии после отжига. Сплав марки В95 хорошо обрабатывается резанием и сваривается точечной сваркой. Его применяют в самолетостроении для наружных конструкций, работающих длительное время при $t \leq 100-120^\circ\text{C}$, например, обшивка, шпангоуты, стрингеры, силовые каркасы строительных сооружений и т.д.

Жаропрочные сплавы. Их используют для изготовления деталей, работающих при температурах до 300°C (поршни двигателей внутреннего сгорания, детали турбореактивных двигателей, обшивка сверхзвуковых двигателей и т.д.), для получения необходимых жаропрочных свойств их легируют не только медью и магнием, но и железом, никелем и титаном.

Упрочняющими фазами жаропрочных сплавов являются $CuAl_2$, Al_2CuMg , Al_3FeNi и Al_6CuNi . После закалки и старения при частичном распаде твердого

раствора эти фазы выделяются в виде дисперсных частиц, которые значительно повышают жаропрочность сплавов. В таблице 11 представлен химический состав и механические свойства после термообработки наиболее применяемых сплавов.

Таблица 11 - Химический состав и типичные механические свойства жаропрочных алюминиевых сплавов

Марка	Химический состав, %						Механические свойства		
	Al	Cu	Mg	Mn	Si	другие элементы	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АК4-1	основа	1,9-2,5	1,4-1,8	-	0,35	0,8-1,4 Fe 0,8-1,4 Ni 0,02-0,1 Ti	430	280	13
Д 20	основа	6-7	-	0,4-0,8	-	0,1-0,2 Ti	400	250	12

Высокая жаропрочность сплава Д20 достигается благодаря высокому содержанию меди и марганца с титаном

Сплавы дляковки и штамповки. Данные алюминиевые сплавы обладают высокой пластичностью в нагретом состоянии и удовлетворительными литейными свойствами. Основными легирующими элементами являются медь, магний, марганец и кремний. Ковку и штамповку сплавов проводят при температуре $\sim 450^\circ\text{C}$. Для повышения прочности проводят температурную обработку, состоящую из закалки и искусственного старения. Упрочняющими фазами при старении являются Mg_2Si , CuAl_2 , $\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{CuSi}_4$. В таблице 12 представлен химический состав и основные механические свойства сплавов.

Таблица 12 - Химический состав и механические свойства алюминиевых сплавов дляковки и штамповки

Марка	Содержание элементов, %				Механические свойства		
	Cu	Mg	Mn	Si	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АК 6	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	0,7-1,2	420	300	12
АК 8	3,9-4,8	0,4-0,8	0,4-1,0	0,6-1,2	480	380	10

Эти сплавы хорошо обрабатываются резанием и удовлетворительно свариваются контактной и аргонодуговой сваркой. Литейные свойства улучшаются за счет добавки кремния. Однако эти сплавы склонны к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением. Используют их для изготовления подмоторных рам, крепежных деталей, лопастей винтов вертолета и т.д.

Литейные алюминиевые сплавы

Литейные сплавы должны обладать высокой жидкотекучестью, сравнительно небольшой усадкой, малой склонностью к образованию горячих трещин и пор, хорошими механическими свойствами и коррозионной стойкостью.

Лучшими литейными свойствами обладают сплавы, в структуре которых имеется эвтектика. Образование эвтектики зависит от концентрации легиру-

щих элементов, т.е. их содержание должно быть больше предельной растворимости в алюминии.

В качестве литейных сплавов применяют сплавы алюминий-кремний, алюминий-медь, алюминий-магний.

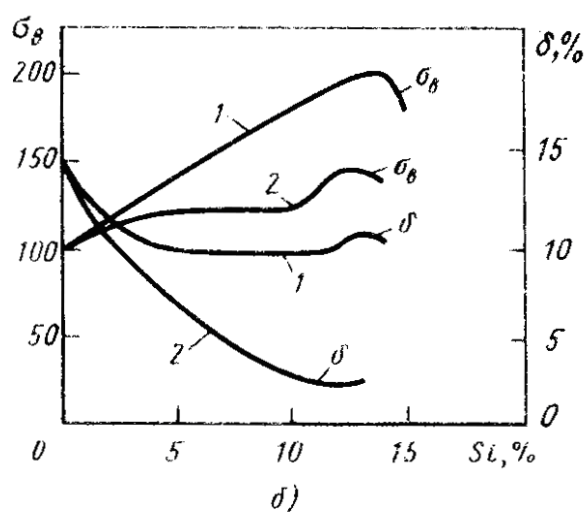
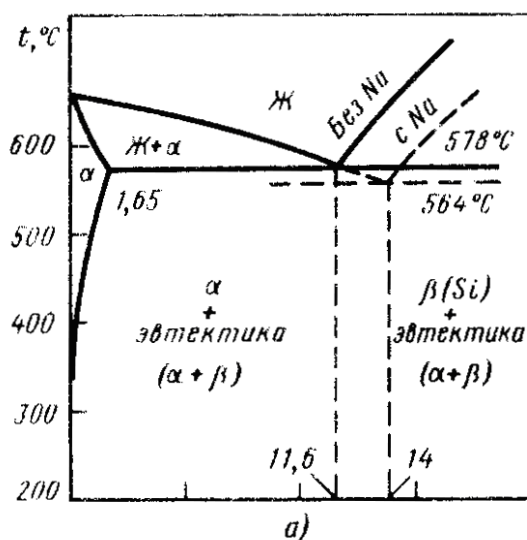
Маркируются эти сплавы буквами АЛ и далее стоит цифра. Буква «А» обозначает что это алюминиевый сплав, буква «Л» - литейный, а цифра соответствует порядковому номеру из ГОСТа, например, АЛ2, АЛ4 и т.д.

Силумины. Широкое применение имеют сплавы Al-Si, получившие название силумины. Их состав близок к эвтектическому сплаву (рисунок 28), поэтому они обладают высокими литейными свойствами. Химический состав и свойства некоторых силуминов представлены в таблице 13.

Наибольшее распространение получил сплав АЛ2, который содержит в структуре эвтектику ($\alpha+\beta$), β -фаза – кристаллы кремния. При затвердевании эвтектики кремний выделяется в виде крупных кристаллов игольчатой формы, которые как бы надрезают пластичный α -твердый раствор. Сплав с такой структурой обладает плохими механическими свойствами.

Для измельчения структуры эвтектики и размеров кристаллов кремния силумины подвергают модифицированию, т.е. в жидкий расплав вводят NaF(2/3) и NaCl (1/3) в количестве 2% от массы жидкого сплава. После модифицирования структура состоит из мелкодисперсной эвтектики и мелкозернистых кристаллов кремния. Измельчение структуры объясняется тем, что силицид натрия Na_2Si обволакивает пленкой кристаллы кремния и затрудняет их рост. Сплав АЛ2 не подвергают упрочняющей термической обработке. Сплавы АЛ4 и АЛ9 дополнительно легируют магнием и подвергают упрочнению термической обработкой, состоящей из закалки и искусственного старения, при этом в 2 раза повышается предел прочности. Упрочняющей фазой служит Mg_2Si .

Силумины легко обрабатываются резанием, хорошо свариваются. Эти сплавы используют для изготовления корпусов компрессоров, картеров, блоков цилиндров двигателей и т.д.



1 – модифицированные сплавы; 2 – без модифицирования

Рисунок 28 -Диаграмма состояния Al – Si (а)
и влияние кремния на механические свойства сплавов (б)

Таблица 13 - Химический состав и механические свойства силуминов

Марка	Химический состав, %					Механические свойства		
	Al	Mg	Si	Mn	другие эле- менты	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АЛ2	основа	-	10-13	-	-	180	90	5
АЛ4	основа	0,17-0,3	8-10,5	0,25-0,5	$\leq 0,15$ Ti	180	140	2
					$\leq 0,1$ Be	260	200	4
АЛ9	основа	0,2-0,4	6-8	-	$\leq 0,15$ Ti	200	140	5
					$\leq 0,1$ Be	220	160	3

Сплавы алюминий – медь. К литейным также относятся сплавы алюминия с медью, отличающиеся от дюралюминов более высоким содержанием меди. В таблице 14 представлены химический состав и механические свойства самых применяемых сплавов.

Таблица 14 - Химический состав и механические свойства литейных сплавов алюминий-медь

Марка	Содержание элементов, %				Механические свойства		
	Al	Mn	Cu	другие элементы	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АЛ 7	основа	-	4 - 5	0,2 Ti	250	180	5
АЛ 19	основа	0,6 - 1,0	4,5 - 5,8	0,15 - 0,35 Ti	340	220	7

Эти сплавы подвергаются упрочнению после закалки и искусственного старения. Они сохраняют высокие механические свойства при повышенных температурах и хорошо обрабатываются резанием. Литейные свойства сплавов невысокие, поэтому их используют для отливок небольших деталей простой формы. Кроме этого они имеют склонность к хрупкому разрушению вследствие выделения по границам зерен грубых включений CuAl_2 и $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$. В сплаве АЛ19 образуются еще такие соединения как $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ и Al_3Ti . Присутствие в твердом растворе марганца и образование интерметаллидных фаз по границам зерен повышает жаропрочность этого сплава, а Ti способствует измельчению зерна. Эти сплавы применяют для изготовления арматуры, кронштейнов и т.д.

Сплавы алюминий – магний. Также как и предыдущие сплавы имеют низкие литейные свойства из-за отсутствия в структуре эвтектики. Однако эти сплавы обладают хорошей коррозионной стойкостью, повышенными механическими свойствами (таблица 15) и обрабатываются резанием. Хорошие механические свойства они приобретают вследствие введения титана и циркония. Добавка бериллия уменьшает окисляемость расплава при плавке.

Таблица 15 - Химический состав и механические свойства некоторых литейных сплавов алюминий-магний

Марка	Содержание элементов, %			Механические свойства		
	Al	Mg	другие элементы	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АЛ 8	основа	9,5-11,5	$\leq 0,07$ Ti $\leq 0,07$ Be	350	170	10
АЛ 27	основа	9,5-11,5	0,05 - 0,15 Ti 0,05 - 0,22 Zr 0,05 - 0,15 Be	360	180	18

Структура этих сплавов представляет собой α -твердый раствор и интерметаллидную фазу Al_3Mg_2 , которая в виде крупных частиц располагается по границам зерен и вызывает охрупчивание. Чтобы избежать этого, сплавы после закалки от 430°C выдерживают в масле ($40\text{-}50^\circ\text{C}$) в течение 12-20 часов для рас-

творения частиц Al_3Mg_2 в α -твердом растворе. Из этих сплавов изготавливают детали для судостроения и авиации.

Жаропрочные сплавы. Эти сплавы используют для изготовления поршней, головок цилиндров и других деталей, работающих при температурах 250-350°C. Жаропрочные свойства этих сплавов обеспечивают добавки Mn, Ti, Ni, Ge, Zr (таблица 16), которые образуют нерастворимые интерметаллидные фазы Al_6Cu_3 , Al_2Ge , Al_2Zr , Al_2CuMg , Al_6Cu_3Ni . Для повышения прочности сплавы подвергают закалке и искусственному старению.

Таблица 16 - Химический состав и свойства жаропрочных алюминиевых литейных сплавов

Марка	Химический состав, %					Механические свойства		
	Al	Mg	Mn	Cu	другие элементы	σ_b , МПа	σ_{D100}^{300} , МПа	δ , %
АЛ 1	основа	1,25-1,75	-	3,75-4,5	1,75-2,25Ti	240	45	1,0
АЛ 21	основа	0,8-1,3	0,15-0,25	4,6-6,0	0,1-0,2Cr 2,6-3,6 Ni	220	50	1,5
АЛ 33	основа	-	0,6-1,0	5,5-6,2	0,8-1,2 Ni 0,05-0,2 Zr 0,15-0,3 Ge	280	90	2,0

Сплавы, получаемые методом порошковой металлургии

На основе алюминия производят две группы таких сплавов: САП – спеченные алюминиевые порошки и САС – спеченные алюминиевые сплавы.

Спеченные алюминиевые порошки. Для изготовления изделий используют алюминиевую пудру и мелкодисперсную Al_2O_3 (таблица 17), которые тщательно перемешивают, засыпают в пресс-формы и прессуют под давлением, а затем проводят спекание при температуре 600°C. Поскольку оксид алюминия не растворяется в алюминиевой основе и не укрупняется, то эти сплавы имеют хорошую жаропрочность, прочность, высокую коррозионную стойкость, хорошую тепло- и электропроводность, высокое сопротивление истиранию.

Свойства изделий из САП зависят в основном от содержания оксида алюминия и степени дисперсности алюминиевой пудры (рисунок 29).

САП применяют вместо нержавеющей сплавов для изготовления деталей и узлов в малонагруженных конструкциях, эксплуатируемых продолжительно при температуре 300-500°C и для кратковременной работы до 1000°C. Сплавы легко обрабатываются резанием.

Спеченные алюминиевые сплавы (САС). Сплавы состоят из спеченного легированного алюминиевого порошка или гранул. Для САС характерны или высокая прочность, или хорошая жаропрочность, или низкий коэффициент линейного расширения, или низкий коэффициент трения. Изменение свойств зависит от легирующих элементов, которые присутствуют в сплаве. Согласно классификации В.И.Добаткина в зависимости от легирующих компонентов САС подразделяются на три группы. Первая группа содержит марганец, хром,

цирконий, титан. В результате технологических нагревов под горячее прессование и экструзию (обработка давлением) они распадаются с выделением дисперсных интерметаллидных фаз, что приводит к повышению прочности.

Таблица 17 - Химический состав и свойства спеченных алюминиевых порошков

Марка	Полуфабрикат	Т°С, испытания	Содержание элементов, %				Механические свойства			
			Al	Al ₂ O ₃	Fe	Жир	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ, МПа
САП-1	Прутки, полосы	20	основа	6-9	0,2	0,2	260-300	200-240	8-12	850
		300					160-180	120-140	3-7	
		500					50-70	50-60	2-6	
	Листы толщиной 1,5 мм	20					320-340	280-300	3-4	-
		300					90-120	-	10-14	
		500					30-40	-	6-8	
САП-2	Прутки, полосы	20	основа	9-13	0,2	0,25	320-360	210-250	6-8	1000
		300					170-180	150-160	4-6	
		500					80-90	80-90	2-3	
САП-3	Прутки, полосы	20	основа	13-18	0,25	0,25	380-450	320-360	3-6	1200
		300					190-210	140-160	4-7	
		500					370-390	320-330	6	
	Штамповка	20					120-130	100-110	8	1000
		350					70-80	50-60	6	
		500								

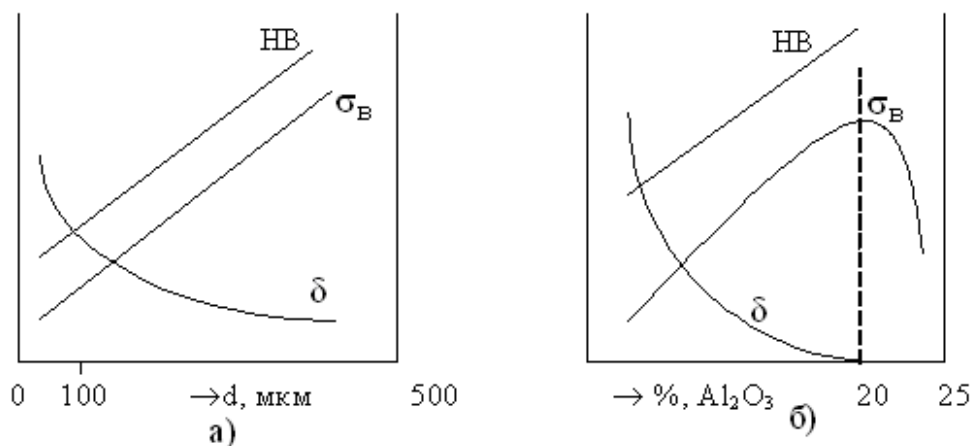


Рисунок 29 – Влияние степени дисперсности алюминиевой пудры (а) и количества Al_2O_3 (б) на механические свойства САП

Вторая группа САС легирована железом, никелем и кобальтом. Большая скорость охлаждения частиц порошка обеспечивает образование гетерогенной (неоднородной) структуры, т.е. интерметаллидные фазы находятся в дисперсном состоянии и равномерно распределены.

Третью группу САС составляют гранулированные сплавы, полученные из алюминиевых сплавов, содержащих свинец, олово, кадмий. Полуфабрикаты из САС получают, нагревая сначала порошки и гранулы в алюминиевой оболочке, а затем подвергая горячему прессованию и экструзии. Для сплавов пер-

вой и второй групп этот процесс проводится при температуре 400-500°C, что обеспечивает создание и сохранение необходимой структуры и получение требуемых свойств. Применяют САС для деталей, работающих в паре со сталью при температуре 20-200°C, которые требуют сочетания низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности, а также в приборостроении, когда путем литья и обработки давлением трудно получить соответствующий сплав.

Необходимо также отметить, что в настоящее время одновременно с традиционной буквенно-цифровой существует новая цифровая маркировка алюминиевых сплавов, примеры приведены в таблице 18.

Таблица 18 - Примеры обозначений с помощью новой маркировки

Легирующие элементы	Маркировка	
	Традиционная	Новая
Al (чистый)	АД00	1010
Mg-Mn	АМг1	1510
Cu-Mg	Д16	1160
Zn-Mg-Cu	В95	1950

1.14 Медь и сплавы на ее основе

Медь – это металл красного, а в изломе розового цвета. Температура плавления 1083°C. Плотность меди 8,94 г/см³. Имеет гранецентрированную кубическую решетку. Медь обладает наибольшей (после серебра) электро- и теплопроводностью, поэтому в электротехнике электропроводность меди принята за 100%. Удельное электросопротивление меди составляет 0,017 МкОм·м. Получают медь из сульфидных руд, содержащих медный колчедан CuFeS₂.

Механические свойства меди: в литом состоянии – $\sigma_b=160$ МПа; $\sigma_{0,2}=35$ МПа; $\delta=25\%$; в горячедеформированном состоянии $\sigma_b=240$ МПа; $\sigma_{0,2}=95$ МПа; $\delta=45\%$. Путем холодного деформирования предел прочности можно повысить до 450 МПа (проволока), но относительное удлинение при этом снизится до 3%.

Маркируется медь буквой М, после которой ставятся цифры порядкового номера по ГОСТу, характеризующие степень чистоты, например: МОО (99,99% Cu), МО (99,95% Cu), М1 (99,9% Cu) и т.д. Присутствующие в меди примеси оказывают различное влияние на ее свойства.

В зависимости от характера взаимодействия примесей с медью их можно разделить на три группы:

1) Примеси образуют с медью твердые растворы: Ni, Zn, Sn, Sb, Al, As, Fe, Р и др. Они повышают прочность, но резко снижают (особенно Sb и As) электро- и теплопроводность меди. Поэтому для изготовления проводников тока используют марки МО и М1, которые содержат $\leq 0,002\%$ Sb и $\leq 0,002\%$ As. Кроме того, сурьма затрудняет горячую обработку давлением.

2) Примеси практически нерастворимы в меди и образуют легкоплавкие эвтектики: Pb, Bi и др. Легкоплавкие эвтектики выделяются по границам зерен и затрудняют обработку давлением. Если медь содержит 0,005% Bi, то при горячей обработке давлением происходит ее разрушение. При более высоком содержании висмута наблюдается хладноломкость меди. На электропроводящие свойства эти примеси не оказывают заметного влияния.

3) Кислород и сера образуют с медью хрупкие химические соединения Cu_2O и Cu_2S , входящие в состав эвтектики. На электропроводность меди эти примеси оказывают небольшое влияние. Сера улучшает обрабатываемость меди резанием. Кислород, образующий закись меди, вызывает «водородную болезнь». При нагревании меди в водородосодержащей атмосфере наблюдается диффузия водорода в глубь меди. Если в меди присутствуют включения Cu_2O , то происходит реакция $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$ и наблюдается увеличение объема из-за образования паров воды. Это создает в отдельных участках металла высокое давление и вызывает появление микротрещин, которые в отдельных случаях приводят к разрушению деталей.

Медь обладает хорошей коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в пресной и морской воде, но не устойчива в сернистых газах и аммиаке. Она легко обрабатывается давлением, но плохо резанием. Литейные свойства из-за большой усадки низкие. Медь плохо сваривается, но легко подвергается пайке.

Изготавливают медь в виде листов, прутков, труб и проволоки. Как конструкционный материал из-за низкой прочности, не применяется. Высокие электропроводящие свойства меди позволяют использовать ее в качестве основного проводникового материала для электротехнической промышленности. Также из меди изготавливают различные теплообменники – нагреватели, холодильники, радиаторы двигателей. Различают две основные группы медных сплавов: латуни и бронзы.

Латуни

Латунями называются двойные или многокомпонентные сплавы на основе меди, в которых основным легирующим компонентом является цинк. На рисунке 30 представлена диаграмма состояния Cu-Zn.

Из диаграммы состояния видно, что медь образует с цинком кроме основного α -раствора интерметаллиды β , γ , ϵ .

Практическое применение имеют латуни, структура которых состоит из α - или $\alpha+\beta'$ фаз. α -фаза представляет собой твердый раствор цинка в меди, предельная растворимость которого составляет 39%. Эта фаза обладает гранцентрированной кубической решеткой. β' -фаза представляет собой упорядоченный твердый раствор на базе электронного соединения CuZn с объемно-центрированной кубической решеткой.

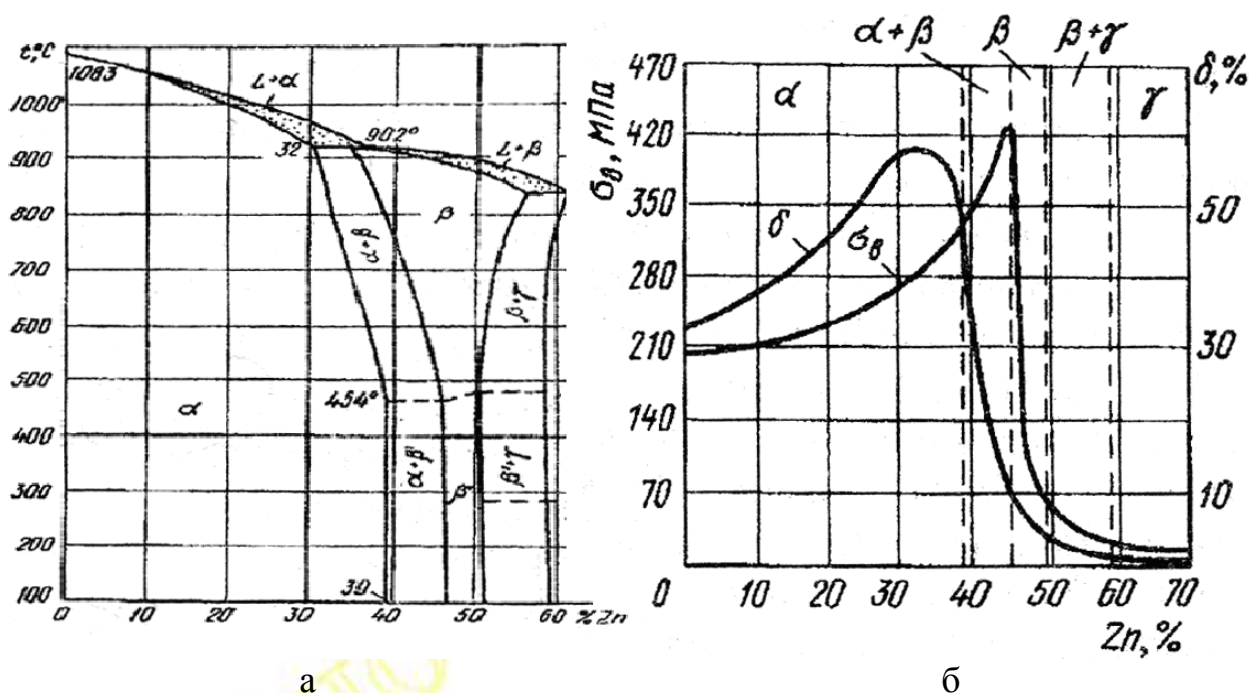


Рисунок 30 – Диаграмма состояния Cu-Zn (а) и график изменения механических свойств латуней в зависимости от содержания цинка (б)

При высоких температурах β -фаза имеет неупорядоченное расположение атомов и обладает высокой пластичностью. При температурах ниже 454-468°C расположение атомов становится упорядоченным, и обозначают ее β' . β' -фаза обладает большей твердостью чем β -фаза и хрупкая. γ -фаза представляет собой электронное соединение Cu_5Zn_8 . На рисунке 30, б представлена зависимость механических свойств латуни от содержания цинка. Как видно из графиков, прочность и пластичность возрастают, а при появлении в структуре β' -фазы пластичность падает, а прочность продолжает расти примерно до 45% Zn. При большей концентрации цинка структура будет состоять из β' -фазы и прочность из-за высокой хрупкости сильно уменьшится.

По химическому составу различают простые латуни и специальные. Простые латуни легируют только цинком, а специальные латуни содержат кроме цинка еще и другие элементы, такие как алюминий, олово, свинец, железо и т.д.

По структуре латуни подразделяются на две группы: однофазные α -латуни и двухфазные $\alpha + \beta'$ -латуни.

По технологическому признаку α -латуни относятся к деформируемым, так как пластичны в холодном и горячем состоянии. $\alpha + \beta'$ -латуни относятся к литейным сплавам, предназначенным для фасонного литья. Они обладают хорошей жидкотекучестью и мало склонны к ликвации.

Маркируются латуни буквой «Л», после которой следуют буквы основных элементов, входящих в состав сплава. Например, О – олово, Ц – цинк, Мц – марганец, А – алюминий, Ж – железо. К – кремний, Ф – фосфор, Б – бериллий и т.д.

В марках деформируемых латуней первые цифры после буквы «Л» показывают содержание меди, а в случае легированных деформированных латуней

указывают еще буквы и цифры, обозначающие название и количество легирующего элемента. Например, Л70 – латунь содержит примерно 70% меди, ЛАЖ60-1-1 – содержит 60% меди, 1% алюминия (А) и 1% железа (Ж), а остальное – цинк.

В марках литейных латуней после буквы «Л» стоит буква «Ц», обозначающая цинк и цифры, показывающие его содержание. Например, ЛЦ30А3 – содержит 30% цинка (Ц), 3% алюминия (А) и остальное медь.

Простые латуни с низким содержанием цинка Л96 (томпак), Л80 (полутомпак), обладают меньшей пластичностью, чем Л68 и Л70, но электро- и теплопроводность выше. Прочность простых латуней 300-350 МПа при однофазной структуре. Прочность однофазной латуни может быть значительно повышена холодной пластической деформацией. α -латуни с высоким содержанием меди не имеют склонности к коррозионному растрескиванию и достаточно устойчивы в атмосфере воды и пара (при условии снятия напряжений, создаваемых холодной деформацией). $\alpha+\beta'$ -простые латуни с большим содержанием цинка (Л62, Л60, Л59) обладают более высокой прочностью, которая составляет 400-450 МПа. Они лучше обрабатываются резанием, дешевле, но их коррозионная стойкость ниже из-за неоднородности структуры. Самой высокой пластичностью обладает Л68, которую используют для изготовления деталей штамповкой.

Автоматная латунь – сплав меди, цинка и свинца, предназначена для изготовления деталей массового производства на станках автоматах. С повышением содержания свинца пластичность немного снижается, но улучшаются антифрикционные свойства за счет мягких частиц свинца, которые служат своеобразной смазкой, и улучшается обрабатываемость резанием, т.к. образуется мелкая и легко отделяющаяся стружка, что позволяет получать поверхность высокой частоты и повысить производительность станков. Структура латуни представляет собой α – твердый раствор цинка в меди и частицы свинца. Введение в эти латуни железа повышает температуру рекристаллизации и прочность (таблица 19). Автоматная латунь отличается также хорошей коррозионной стойкостью на воздухе, в пресной и соленой воде. Она легко поддается накатке, гибке и штампованию. Латунь марок ЛЖС58-1-1, ЛС58-1 и ЛС60-1 обрабатывают давлением, ковкой, прокаткой, волочением в холодном и горячем состоянии, а ЛС63-3, ЛС64-2 и ЛС74-3 – только в холодном состоянии.

Смягчающий отжиг ведут при температуре 600-650°C, горячую деформацию при температуре 640-780°C. Допустимые суммарные обжатия между отжигами – не более 70%.

Из автоматных латуней изготавливают болты, гайки, винты, типографские матрицы, шестеренки, зубчатые колеса, подшипники и другие детали.

Таблица 19 - Химический состав и свойства некоторых марок автоматных латуней

Марка	Химический состав, %				Механические свойства					
	Cu	Pb	Fe	Zn	σ_B , МПа		$\sigma_{0,2}$, МПа		δ , %	
					отожж.	нагарт*	отожж.	нагарт.	отожж.	нагарт.

ЛС59-1	57-60	0,8-0,9	-	остальное	400	650	140	450	45	16
ЛС60-1	59-61	0,6-1,0	-	остальное	370	670	130	560	45	4
ЛС63-3	62-64	2,4-3,0	-	остальное	350	600	120	500	55	5
ЛЖС 58-1-1	56-58	0,7-1,3	0,7-1,3	остальное	420	750	-	-	-	-

* коэффициент нагартовки 30-50%.

Алюминиевая латунь – сплав меди с цинком и алюминием. Алюминий повышает коррозионную стойкость латуни и особенно в морской воде. Введение же дополнительных легирующих элементов: железа, никеля, марганца, кремния позволяет повысить прочность и коррозионную стойкость в щелочах и разбавленных кислотах (таблица 20). Алюминиевые латуни подвергаются отжигу при температуре 600-650°С для уменьшения твердости перед обработкой давлением.

Из алюминиевой латуни изготавливают конденсаторные трубы, детали судовых агрегатов, сильфоны и другие детали.

Таблица 20 - Химический состав и механические свойства алюминиевых латуней

Марка	Химический состав, %								Механические свойства		
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	As	Si	Zn	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
ЛА77-2	76-79	1,75-2,5	-	-	-	0,025	-	остальное	380	140	50
ЛАЖ60-1-1	58-61	0,75-1,5	0,75-1,5	-	0,1-0,6	-	-	остальное	420	200	50
ЛАН59-3-2	57-60	2,5-3,5	-	2,0-3,0	-	-	-	остальное	500	300	42
ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5	73-76	1,6-2,2	-	2,0-3,0	0,3-0,7	-	0,3-0,7	остальное	900	-	8

Марганцовистая латунь – сплав меди, цинка и марганца. Она характеризуется хорошими механическими свойствами при повышенной температуре, легко поддается обработке давлением и имеет повышенную теплопроводность. Выпускаются две марки марганцовистой латуни (таблица 21).

Таблица 21- Химический состав и свойства марганцовистых латуней

	Химический состав, %	Механические свойства
--	----------------------	-----------------------

Марка	Cu	Mn	Al	Zn	σ_b , МПа	δ , %	HB, МПа
ЛМц 58-2	57,0-60,0	1,2	-	остальное	360-440	24-36	1000
ЛМцА57-3-1	55,5-58,5	0,5-3,5	0,5-1,5	остальное	520	30	1200

Добавки марганца и алюминия повышают не только прочность латуни, но и коррозионную стойкость к хлоридам и морской воде. Однако марганцовистая латунь склонна к саморастрескиванию, что можно устранить путем проведения низкотемпературного отжига (250-300°C).

Применяют данную латунь в морском судостроении, электротехнике, в качестве заменителя оловянистых бронз.

Морская латунь – сплав меди, цинка и олова. Содержание олова в количестве 0,5-1,5% повышает прочность и твердость латуни, но снижает пластичность и вязкость, т.к. уменьшает растворимость цинка в меди. Олово повышает коррозионную стойкость латуни в морской воде из-за изменения природы β -фазы. С целью повышения прочности латунь подвергают наклепу. В связи с этим латунь подразделяется на твердую (подвергнута деформированию на 25-50%) и мягкую (после отжига при температуре 600-650°C). В таблице 23 даны химический состав и свойства твердых морских латуней. Морская латунь применяется в судостроении.

Таблица 22 - Химический состав и свойства морских латуней

Марка	Химический состав, %			Механические свойства		
	Cu	Sn	Zn	σ_b , МПа	δ , %	HB, МПа
ЛО 90-1	80,0-91,0	0,25-0,75	остальное	480-560	3-6	1400-1500
ЛО 70-1	69,0-71,0	1,0-1,5	остальное	680-750	3-5	1450-1550
ЛО 62-1	61,0-63,0	0,7-1,1	остальное	680-750	3-5	1400-1500
ЛО 60-1	59,0-61,0	1,0-1,5	остальное	540-600	5-12	1450-1550

Кремнистая латунь – сплав меди, цинка и кремния. Деформируемые кремнистые латуни характеризуются высокой коррозионной стойкостью на воздухе и в морской воде, более стойки против коррозионного растрескивания. Эти латуни хорошо свариваются и паяются обычными припоями, хорошо обрабатываются давлением в холодном и горячем состоянии (таблица 23). Литейные кремнистые латуни отличаются высокой жидкотекучестью, но при охлаждении дают значительную объемную усадку, вызывающую при кристаллизации образование усадочных раковин и межкристаллитной пористости. Увеличение содержания кремния способствует повышению плотности литья и коррозионной стойкости. Добавка свинца не только улучшает обрабатываемость, но и повышает антифрикционные свойства.

Таблица 23 - Химический состав и свойства кремнистых латуней

Марка	Химический состав, %				Механические свойства		
	Cu	Si	Pb	Zn	σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа
Деформируемые							
ЛК80-3	79,0-81,0	2,5-4,0	-	остальное	300-460	15-40	950-1100
ЛКС65-1,5-3	63,5-66,5	1,0-2,0	2,5-3,5	остальное	300	15-20	800
Литейные							
ЛКС80-3-3	79,0-81,0	2,5-4,5	2,0-4,0	остальное	300-400	15-20	900-1000
ЛК80-3Л	79,0-81,0	2,5-4,5	-	остальное	300	15-20	950-1100

Кремнистые латуни находят применение в судо- и машиностроении, для изготовления втулок, подшипников и других антифрикционных деталей вместо оловянистых бронз.

Бронзы

Бронзами называются сплавы меди с различными легирующими элементами, в числе которых и только наряду с другими может присутствовать и цинк. По химическому составу бронзы подразделяются на оловянные и безоловянные. Бронзы отличаются высокими коррозионными и антифрикционными свойствами, большой прочностью и твердостью.

Если концентрация вводимых в бронзу элементов превышает предел растворимости их в меди в твердом состоянии, в структуре сплава появляются кристаллы новых фаз. Эти фазы представляют собой твердые растворы на основе интерметаллидов, например δ -фаза – $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ в оловянных бронзах; β -фаза – Cu_3Al в алюминиевых.

Маркируются бронзы буквами «Бр», после чего следуют буквы, обозначающие легирующие элементы. В марках деформируемых бронз после букв «Бр» ставятся буквы и цифры, обозначающие название и количество легирующих элементов, например БрОЦ 4-3 – содержит олово (О) – 4%, цинка (Ц) – 3% и остальное медь (по разности от 100%). В марках литейных бронз содержание легирующих элементов ставится сразу после буквы, которой его обозначают, например, БрА10ЖЗМц2 имеет в своем составе: алюминий (А) – 10%, железо (Ж) – 3%, марганец (Мц) – 2% и остальное медь.

Оловянные бронзы – представляют собой сплав меди с оловом. На рисунке 31 приведена диаграмма состояния Cu-Sn. Кроме основного α -твердого раствора олова в меди, в сплавах присутствуют электронные соединения: β -фаза (Cu_5Sn); δ -фаза ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$); ϵ -фаза (Cu_3Sn) и γ -фаза – твердый раствор на базе химического соединения, природа которого не выяснена.

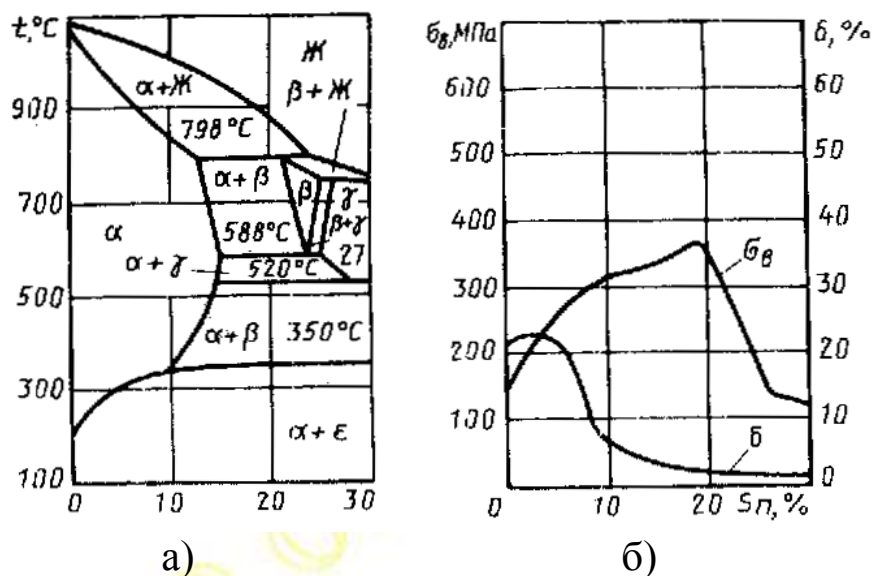


Рисунок 31 Диаграмма состояния Cu-Sn (а)
и влияние олова на механические свойства бронз (б)

При температуре $\sim 350^\circ\text{C}$ и очень медленном охлаждении δ -фаза распадается на α -твердый раствор и ϵ -фазу. В реальных условиях охлаждения бронза состоит из α -твердого раствора и δ -фазы ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$). Практическое применение имеют оловянные бронзы, содержащие до 10-12% олова, т.к. повышенное содержание олова приводит к хрупкости сплавов. При увеличении содержания олова в бронзах возрастает предел прочности и относительное удлинение, но при образовании в структуре эвтектоида (4-6% Sn) оно падает.

По методу обработки оловянные бронзы подразделяются на деформируемые и литейные (таблица 24).

Бронзы, содержащие до 4-5% олова, после деформации и отжига имеют в структуре α - твердый раствор, а после литья в результате сильной ликвации могут иметь включение эвтектоида ($\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$). При более высоком содержании олова структура состоит из α - твердого раствора и эвтектоида ($\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$).

Деформируемые оловянные бронзы обладают хорошей пластичностью и поддаются обработке давлением. Литейные бронзы имеют хорошую жидкотекучесть, малый коэффициент усадки, высокие антифрикционные и антикоррозионные свойства.

Оловянные бронзы с целью улучшения свойств легируют цинком, свинцом, фосфором, никелем и другими элементами. Цинк вводится для улучшения технологических свойств и снижения ее стоимости. Свинец повышает плотность литья, улучшает антифрикционные свойства и облегчает обработку резанием, но снижает пластичность. Фосфор улучшает литейные свойства, повышает предел прочности, твердость, упругость и антифрикционные свойства. Никель измельчает зерно, повышает предел прочности и коррозионную стойкость.

Таблица 24 - Химический состав и свойства некоторых марок

оловянных бронз

Марка	Содержание элементов, %					Механические свойства	
	Cu	Sn	P	Zn	Pb	σ_B , МПа	δ , %
Деформируемые бронзы ¹							
БрОФ6,5-0,4	основа	6,0-7,0	0,3-0,4	-	-	400(750)	65(10)
БрОЦ4-3	основа	3,5-4,0	-	2,7-3,3	-	330(550)	40(4)
БрОЦС4-4-2,5	основа	3,0-5,0	-	3,0-5,0	1,5-3,5	350(650)	35(2)
Литейные бронзы ²							
БрОЗЦ12С5	основа	2,0-4,0	-	8,0-15,0	3,0-6,0	200(170)	5(8)
БрО4Ц4С17	основа	3,5-5,5	-	2,0-6,0	14,0-20	150(150)	4(6)
БрОЗЦ7С5Н	основа	2,5-4,5	Ni-0,5-1,5	6,0-9,5	3,0-6,0	180(210)	8(5)

¹ - в скобках приведены свойства бронз после наклепа, а без скобок – свойства после отжига.

² - в скобках указаны свойства бронз при литье в песчаную форму, а без скобок – свойства при литье в кокиль.

Для облегчения обработки давлением оловянные бронзы подвергают гомогенизации при 700–750°С с последующим быстрым охлаждением.

Из деформируемых бронз изготавливают вкладыши подшипников, пружины, мембраны и др. Литейные бронзы применяют для изготовления герметичной пароводяной арматуры, работающей под давлением, вкладышей подшипников скольжения, втулок и других деталей.

Алюминиевые бронзы. Основной легирующий элемент в этой бронзе алюминий. Сплавы, содержащие до 9% алюминия, однофазные, т.е. их структура представляет собой α -твердый раствор алюминия в меди (рисунок 32). При повышении содержания алюминия в структуре бронзы появляются фазы: β - твердый раствор на базе соединения Cu_3Al , γ' - электронное соединение $\text{Cu}_{32}\text{Al}_9$. γ' -фаза может наблюдаться в сплавах, содержащих 6-8% алюминия при ускоренном охлаждении.

Введение в алюминиевую бронзу дополнительных легирующих элементов, например марганца, никеля, железа, улучшает механические, технологические и антифрикционные свойства, а также жаростойкость, коррозионную стойкость.

Алюминиевые бронзы с однофазной структурой обладают высокой пластичностью, но невысокой прочностью. В двухфазных бронзах в структуре кроме α -твердого раствора присутствует электронное соединение $\text{Cu}_{32}\text{Al}_9$ (таблица 25). Эти бронзы имеют повышенную прочность, но пластичность их ниже. Практическое применение находят бронзы, содержащие до 11% Al. Введение в алюминиевую бронзу дополнительных легирующих элементов позволяет улучшить ее свойства. Например, железо измельчает зерно и тем самым повышает механические, антифрикционные и технологические свойства, а никель улучшает механические свойства и износостойкость. Добавление в алюминиевую бронзу легирующих элементов позволяет повысить ее коррозионную стойкость, жаростойкость и температуру начала рекристаллизации. Однофазные

бронзы, имеющие высокую пластичность, используют для глубокой штамповки, а двухфазные подвергают горячей деформации или применяют в виде фасонного литья.

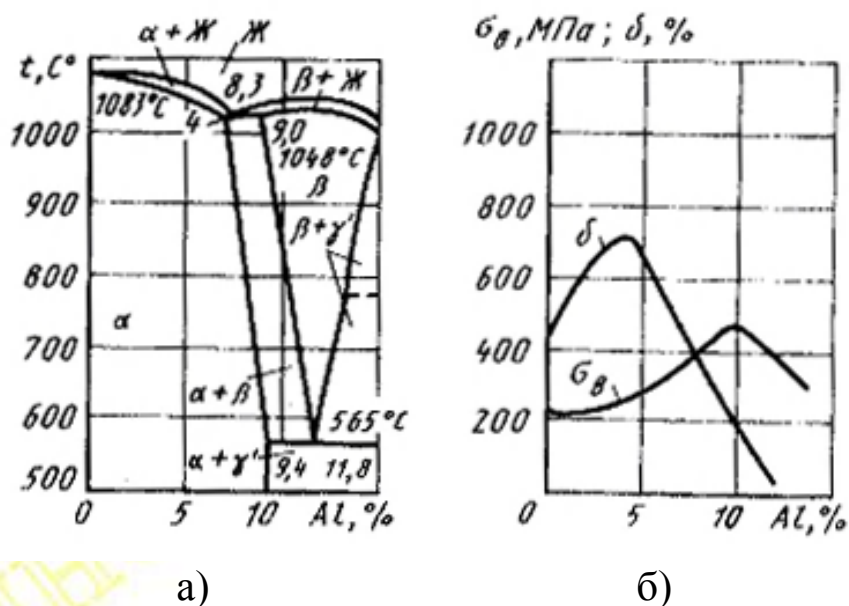


Рисунок 32 Диаграмма состояния Cu-Al (а) и влияние алюминия на механические свойства бронз (б).

Таблица 25 - Химический состав и свойства алюминиевых бронз

Марка бронзы	Содержание элементов, %					Механические свойства		
	Cu	Al	Fe	Mn	Ni	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	HB, МПа
Деформируемые бронзы ¹								
БрА7	основа	4,0-6,0	-	-	-	370	60-70	600-700
БрА7	основа	6,0-8,0	-	-	-	420	65-75	650-750
БрАЖ9-4	основа	8,0-10,0	2,0-4,0	-	-	600	35-45	1000-1200
БрАЖ10-4-4	основа	9,5-11,0	3,5-5,5	-	3,5-5,5	650	35-45	1300-1500
Литейные бронзы ²								
БрА7Ж1,5С1,5	основа	6,0-8,0	1,0-1,5	1,0-1,5	Pb	300	18	-
БрА11Ж6Н6	основа	10,5-11,5	5,0-6,5	-	5,0-6,5	400	10	1000
БрА10Ж3Мц1,5	основа	9,0-11,0	2,0-4,0	1,0-2,0	-	500	20	1200
БрА10Мц2	основа	9,0-11,0	-	1,5-2,5	-	500	12	1100

¹ – свойства после смягчающего отжига,

² – свойства после литья в песчаную форму.

Литейные свойства алюминиевых бронз ниже, чем оловянных, но выше плотность отливок. По прочности и коррозионной стойкости они превосходят оловянные бронзы, но хуже паяются. Температура горячей обработки алюминиевых бронз составляет 750-850°C, а смягчающего отжига – 600-750°C. Брон-

зы, содержащие 9-11% алюминия и дополнительно легированные никелем, марганцем и железом, могут быть упрочнены закалкой и старением.

Алюминиевые бронзы применяют для изготовления ободов подшипников, направляющих втулок, маслоуплотнительных колец, зубчатых колес, фланцев и других мелких, но ответственных деталей в судостроении и авиационном строительстве, электротехнике, химическом машиностроении.

Кремнистые бронзы – бронзы, представляющие собой сплав меди с кремнием (рисунок 33). Практическое применение находят бронзы, содержащие до 4% кремния (таблица 26). По технологическим свойствам кремнистые бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

Деформируемые бронзы обрабатываются в холодном и горячем состоянии, обладают хорошей коррозионной стойкостью, легко обрабатываются резанием и свариваются. Добавка цинка в состав литейных бронз облегчает плавление, улучшает их механические и антикоррозионные свойства.

Перед прокаткой или штамповкой отливки нагревают до температуры 890-910°C.

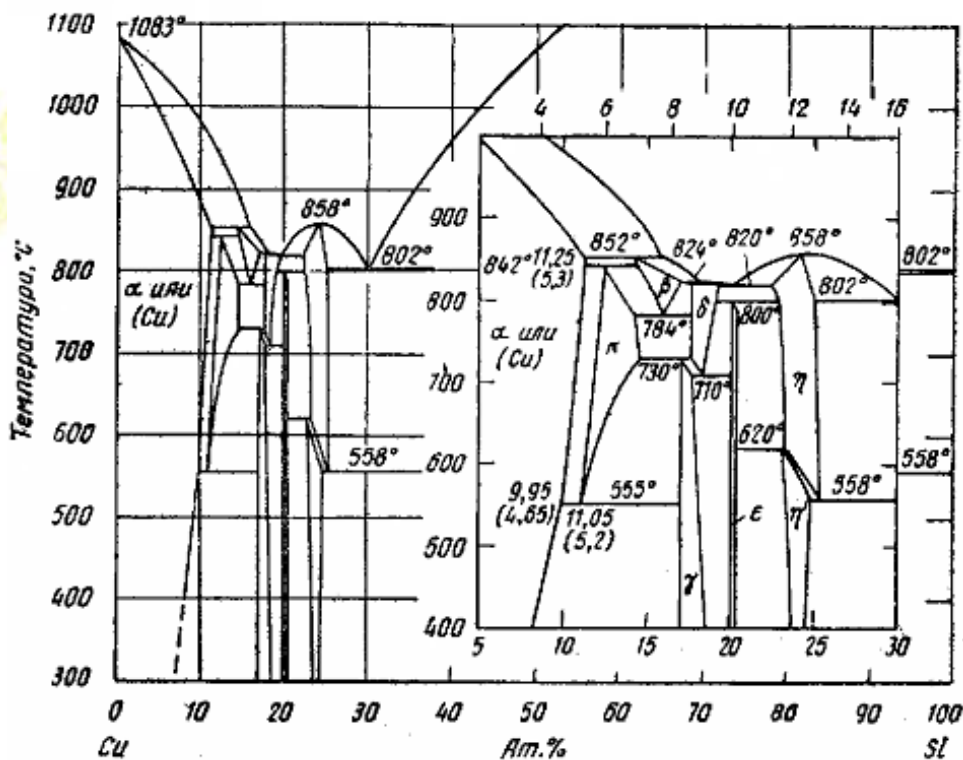


Рисунок 33 - Диаграмма состояния Cu-Si.

Кремнистые бронзы, содержащие до 1,5% Si, упрочняются закалкой (850-870°C) и старением (при температуре 450-500°C) с выдержками 0,5-3 часа и охлаждением на воздухе. Если же содержание кремния более 1,5%, то бронза не упрочняется термической обработкой, так как имеет однофазную структуру.

Таблица 26 - Химический состав и механические свойства кремнистых бронз

Марка бронзы	Содержание элементов, %					Механические свойства		
	Cu	Si	Mn	Ni	Zn	σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа
Деформируемые бронзы								
БрКМц3-1	основа	3	1	-	-	380-900	1-2	900
БрКЗ	основа	3	-	-	-	250	10-12	-
Литейные бронзы								
БрКЗЦ9	основа	3	-	-	9	250	10-20	-
БрК4Ц4	основа	4	-	-	4	300	10	-
БрК1НЗ	основа	0,6-1,1	0,1-0,4	2,4-3,4	-	600	12	1750

Вследствие высоких механических свойств, упругости, коррозионной стойкости эти бронзы используют для изготовления пружин и пружинящих деталей, металлических сеток, решеток и труб, испарителей, дымовых фильтров, деталей в сварных конструкциях.

Бериллиевые бронзы – бронзы, представляющие собой сплав меди с бериллием, причем бронзы одних и тех же марок применяют как деформируемые и как литейные бронзы. В качестве дополнительных легирующих элементов они могут содержать никель, кобальт, железо, марганец, магний и другие элементы, которыми частично заменяют дорогостоящий бериллий (таблица 27).

Таблица 27 - Химический состав и механические свойства бериллиевых бронз

Марка бронзы	Содержание элементов, %					Механические свойства		
	Cu	Be	Ni	Ti	Примеси	σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа
БрБ2	основа	1,9-2,2	0,2-0,5	-	0,5	450	40	900
БрБ2,5	основа	2,3-2,6	0,2-0,5	-	0,5	500	30	1150
БрБНТ1,9	основа	1,8-2,15	0,2-0,5	0,1-0,25	0,5	450	40	900
БрБНТ1,7	основа	1,65-1,85	0,2-0,5	1,0-0,25	0,5	440	50	850

Медь с бериллием образует ряд твердых растворов. Предельная растворимость бериллия в меди составляет 2,7% при температуре 864°C. С понижением температуры растворимость падает и при температуре 300°C составляет от 0,2%. Следовательно, бериллиевую бронзу можно упрочнять с помощью закалки и старения. Нагрев под закалку осуществляют при температуре 750-790°C с охлаждением в воде для получения пересыщенного α -твердого раствора. Затем проводят старение при температуре 300-350°C и при этом из перенасыщенного α -твердого раствора выделяются дисперсные частицы γ -твердого раствора на

базе интерметаллида CuBe. Этот твердый раствор обладает высокими твердостью и прочностью.

Наряду с высокими прочностью, жидкотекучестью, твердостью, упругостью и коррозионной стойкостью, бериллиевые бронзы отличаются высокой электропроводностью, теплопроводностью, высоким сопротивлением ползучести, хорошо свариваются и обрабатываются резанием.

Эти бронзы применяют для изготовления высоконагруженных подшипников, различных мембран, втулок, пружин, зубчатых колес, шестерен и других деталей. Кроме того, бериллиевую бронзу можно применять как безыскровой инструмент, так как при ударе о металл или камень не возникает искры, как у стали.

Свинцовые бронзы – бронзы, представляющие собой сплав меди и свинца. Свинец не растворяется в меди и образует механическую смесь (рисунок 34). Эвтектика по составу почти совпадает с чистым свинцом (99,98% Pb). После охлаждения структура сплавов состоит из кристаллов меди и включений свинца, которые располагаются по границам зерен или заполняют междендритные пространства. Такая структура обеспечивает высокие антифрикционные свойства бронз, поэтому их используют в подшипниках скольжения. Свинцовые бронзы относятся к литейным бронзам (таблица 28). Эти бронзы дополнительно легируют никелем или оловом, которые, растворяясь в меди, улучшают механические свойства и коррозионную стойкость.

Таблица 28 - Химический состав и механические свойства свинцовых бронз

Марка бронзы	Содержание элементов, %			Механические свойства		
	Cu	Pb	Ni	σ_B , МПа	δ , %	HB, МПа
БрС30	основа	27-33	-	60	4	250
БрС60Н2,5	34,25-40,75	57-63	2,25-2,75	30	5	140

Свинцовые бронзы хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой теплостойкостью. Теплопроводность БрС30 в 4 раза выше, чем у оловянных бронз, поэтому она отлично отводит тепло, возникающее при трении. Но из-за низкой прочности свинцовые бронзы наплавляют тонким слоем на стальные ленты, т.е. получают биметаллические подшипники, которые просты в изготовлении и легко заменяются при износе. Применяют свинцовые бронзы также для изготовления нагруженных подшипников, сальников и антифрикционных деталей.

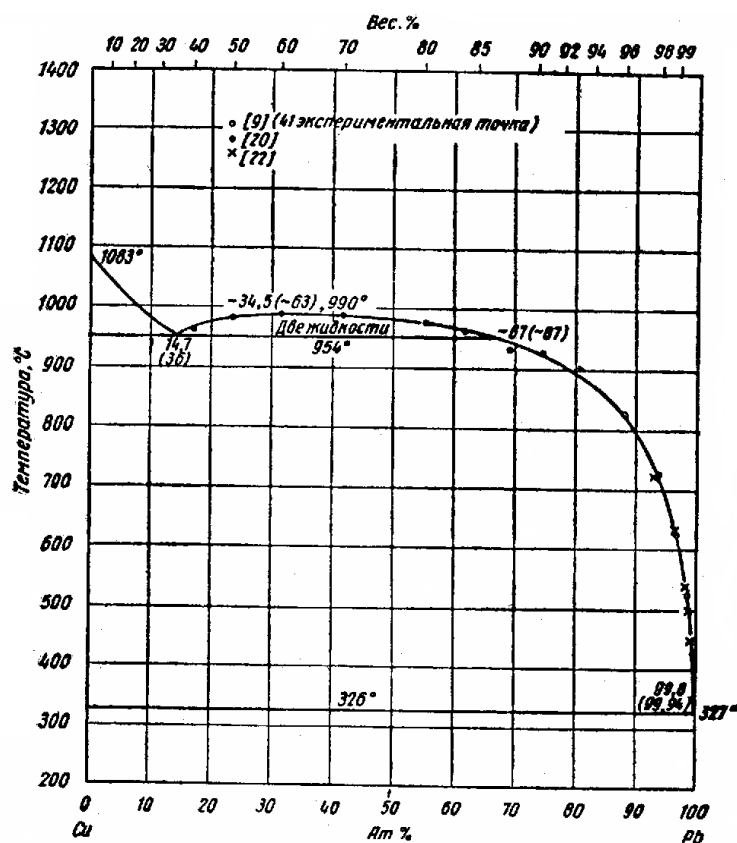


Рисунок 34 - Диаграмма состояния Cu-Pb

1.15 Сплавы на основе титана

Титан – металл серебристо-белого цвета, плотность $4,5 \text{ г/см}^3$, температура плавления 1668°C , $\sigma_{\text{в}} = 450\text{-}600 \text{ МПа}$, $\delta \geq 25\%$. Существует в двух полиморфных модификациях: α -титан, имеющий ГПУ-решетку при температурах ниже 885°C , и β -титан с ОЦК-решеткой, устойчивый при температурах выше 885°C .

Механические свойства титана характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности. Титан обладает высокой прочностью не только при комнатной температуре, но и в условиях глубокого холода. При этом, если содержание водорода мало, он сохраняет высокую пластичность.

Пластическая деформация значительно повышает прочность титана. При степени деформации 60-70% прочность увеличивается в 2 раза. Для снятия наклепа проводят рекристаллизационный отжиг при температуре $650\text{-}750^\circ\text{C}$.

Титан обладает высокой коррозионной и химической стойкостью благодаря образованию защитной оксидной пленки на его поверхности. Он не корродирует в пресной и морской воде, не растворяется во многих органических и минеральных кислотах, в царской водке и других агрессивных средах.

Технический титан хорошо обрабатывается давлением при комнатной и повышенных температурах. Из него изготавливают все виды прессованного и катанного полуфабриката. Хорошо сваривается аргонодуговой и точечной сваркой. Титан плохо обрабатывается резанием, налипает на инструмент и быстро его изнашивает. Для обработки титана требуются инструменты из быстро-

режущих сталей и твердых сплавов, малые скорости резания при большой подаче и глубине резания, интенсивное охлаждение.

Такие элементы, как Al, N, O, повышают температуру полиморфного превращения $\alpha \leftrightarrow \beta$, расширяя область твердых растворов на основе α -титана и таким образом являются α -стабилизаторами. Учитывая охрупчивающее действие азота и кислорода, практическое значение для легирования титана имеет только алюминий. Алюминий является основным упрочняющим ЛЭ, к тому же имеющим малую плотность, поэтому он присутствует в большинстве титановых сплавов.

Большинство других легирующих элементов, наоборот, понижают температуру полиморфного перехода $\alpha \leftrightarrow \beta$ и расширяют область существования твердых растворов на основе β -титана, являясь β -стабилизаторами. Некоторые β -стабилизаторы могут образовывать с титаном интерметаллические соединения типа TiX. В этом случае при охлаждении β -фаза претерпевает эвтектоидное превращение $\beta \rightarrow \alpha + \text{TiX}$. Упрочняющая термическая обработка, состоящая из закалки и старения, применима только для сплавов с $(\alpha + \beta)$ -структурой. Сплавы с устойчивой α -структурой нельзя упрочнить термической обработкой.

Нейтральные элементы Sn, Zr, Hf, Th не оказывают существенного влияния на температуру полиморфного превращения и не меняют фазового состава титановых сплавов.

Промышленные титановые сплавы. Преимуществом титановых сплавов по сравнению с техническим титаном являются более высокая прочность, жаропрочность, жаростойкость при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости и малой плотности. Поэтому титановые сплавы получили широкое применение в авиации, ракетной технике, судостроении, химической и других отраслях промышленности.

По характеру обработки металла сплавы титана делятся на деформируемые и литейные. По механическим свойствам – на сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности. По способности упрочняться с помощью термообработки титановые сплавы делятся на упрочняемые и не упрочняемые термообработкой.

Маркируются титановые сплавы буквенно-цифровой индексацией, причем буквы и цифры не дают информации о классе сплава и содержании легирующих элементов. Механические свойства некоторых титановых сплавов приведены в таблице 29.

Деформируемые сплавы. Сплавы с α -структурой (BT5, BT5-1) характеризуются средней прочностью при комнатной температуре, высокими механическими свойствами при криогенных температурах, хорошей жаропрочностью, сопротивлением ползучести и жаростойкостью. Сплавы имеют высокую термическую стабильность и обладают отличной свариваемостью и коррозионной стойкостью. Обрабатываемость резанием удовлетворительная.

Недостатки этих сплавов: отсутствие способности упрочняться термообработкой и низкая технологическая пластичность. Сплавы с оловом более технологичны и жаростойки, обладают высоким сопротивлением ползучести. Это

самые дорогие из α -сплавов. В горячем состоянии сплавы куят, прокатывают и штампуют.

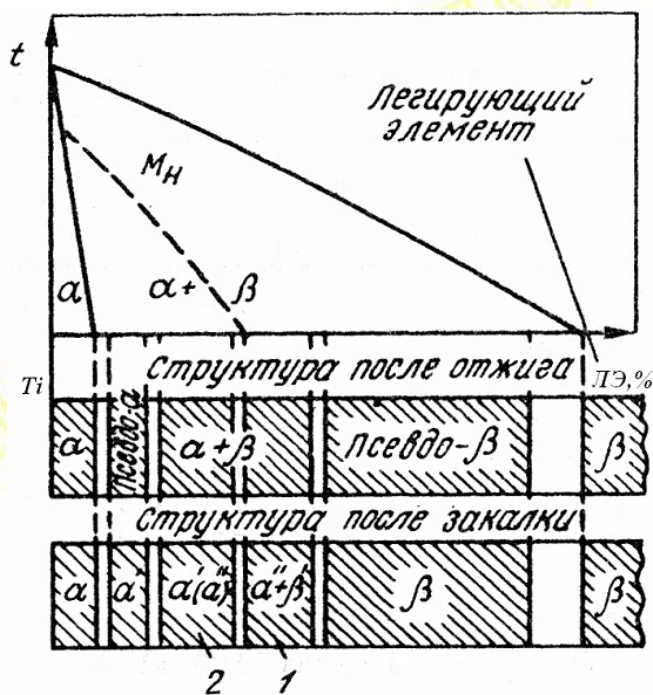
Таблица 29 - Механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	Класс по структуре	Средний хим.состав, % (масс.)	σ_B , МПа	δ , %	Термо-обработка	Область применения
Технический титан BT1-0	α	Нелегированный титан	390-540	≥ 20	Отжиг	Хим.промышленность, криогенные установки
BT5	α	Ti-5Al	750-950	≥ 10	Отжиг	Детали для работы при криогенных и повышенных температурах до 450°C
BT5-1	α	Ti-5Al-2,5Sn	750-950	≥ 10	Отжиг	
OT4	Псевдо- α -сплав	Ti-3,5Al-1,5Mn	700-900	≥ 12	Отжиг	
BT6	($\alpha + \beta$)-сплав мартенситного класса	Ti-6Al-4,5V	1100-1150	≥ 14	Отжиг, закалка, старение	Сварные конструкции для длительной работы при 400°C, кратковременной до 750°C
BT16	($\alpha + \beta$)-сплав мартенситного класса	Ti-2,5Al-5Mo-5V	1150-1250	≥ 4	Отжиг, закалка, старение	Детали для длительной работы до 350°C
BT22	($\alpha + \beta$)-сплав переходного класса	Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr	1100-1500	≥ 9	Отжиг, закалка, старение	Детали, работающие при 500 °C
BT15	Псевдо- β -сплавы	Ti-3Al-7Mo-11Cr	1300-1800	≥ 4	Отжиг, закалка, старение	Детали для длительной работы до 350°C, кратковременной до 750°C
BT5Л	α	Ti-5Al	700-900	6-8	Без отжига	Фасонное литье

К группе α -сплавов относятся чистый титан, а также псевдо- α -сплавы (рисунок 35), имеющие небольшое количество β -фазы (1-5%) вследствие дополнительного легирования марганцем (OT4, BT4 и др.) Сохраняя достоинства α -сплавов, последние благодаря наличию β -фазы обладают высокой технологической пластичностью.

Сплавы OT4-1, OT4, содержащие меньше алюминия (2-3%), обрабатывают давлением в холодном состоянии и только при изготовлении сложных деталей их подогревают до 500-700°C. Сплавы с большим содержанием алюминия (BT4 и OT4-2) при обработке давлением требуют подогрева до 600-800°C. Недостатком сплавов этой группы является склонность к водородной хрупкости, поэтому допустимое содержание водорода колеблется в пределах 0,02-0,05%.

Двухфазные ($\alpha+\beta$)-сплавы (BT3-1, BT6, BT8, BT14 и др.) обладают лучшим сочетанием технологических и механических свойств (рисунок 35). Их упрочняют термообработкой – закалкой и старением. В отожженном и закаленном состоянии они имеют хорошую пластичность, а после закалки и старения – высокую прочность. При этом чем больше β -фазы содержится в структуре сплава, тем он сильнее упрочняется при термообработке.



1 – переходный класс; 2 – мартенситный класс

Рисунок 35 – Структура титановых сплавов в отожженном и закаленном состоянии

Сплавы BT14, BT15, BT16 являются особо высокопрочными. Большое количество β -фазы в этих сплавах объясняется высоким содержанием ванадия, молибдена, хрома. Сплавы BT3-1, BT8 и BT9 являются жаропрочным. В этих сплавах присутствует алюминий. Алюминий значительно снижает плотность ($\alpha+\beta$)-сплавов, несмотря на присутствие в этих сплавах тяжелых β -стабилизаторов. Двухфазные сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием и свариваются. После сварки требуется отжиг для повышения пластичности шва. Сплавы ($\alpha+\beta$) куется, штампуются и прокатываются легче, чем сплавы с α - или β -структурой. Их поставляют в виде поковок, штамповок, прутков, листов, лент.

Однофазные β -сплавы не имеют промышленного применения. Они дороги, обладают пониженной удельной прочностью.

В настоящее время применяются так называемые псевдо- β -сплавы (BT15). В равновесном состоянии сплав BT15 имеет преимущественно β -структуру с небольшим количеством α -фазы. Этот сплав имеет небольшую плотность ($4,8 \text{ г/см}^3$) и высокую удельную прочность, удовлетворительно обрабатывается резанием. Недостатки этого сплава – пониженная пластичность

сварных швов и низкая термостабильность. Поставляют в виде листов, полос, прутков, поковок. Рекомендуются для длительной работы при температуре до 350 °С.

Литейные сплавы. Титановые сплавы имеют хорошие литейные свойства. Большой температурный интервал кристаллизации обеспечивает им высокую жидкотекучесть и хорошую плотность отливки. Они обладают малой склонностью к образованию горячих трещин и небольшой линейной усадкой (1%). Объемная усадка составляет около 3%.

Недостатком литейных титановых сплавов являются большая склонность к поглощению газов и высокая активность при взаимодействии со всеми формовочными материалами. Поэтому их плавку и разливку ведут в вакууме или среде нейтральных газов.

Для фасонного литья применяют сплавы, аналогичные по химическому составу некоторым деформируемым (BT5Л, BT6Л, BT9Л, BT14Л), а также специальные литейные сплавы (BT20Л, BT21Л, BT35).

Литейные сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые. Упрочняющая термообработка резко снижает пластичность литейных сплавов и поэтому не применяется. Сплав BT5Л – самый дешевый и распространенный, обладает хорошими литейными свойствами, достаточно вязок и пластичен, но прочность его невысока. Сплав BT35Л – наиболее прочный из промышленных сплавов. Литейные титановые сплавы применяют для изготовления трубных заготовок и различных фасонных отливок.

Термическая обработка титановых сплавов. Титановые сплавы подвергают термической обработке – рекристаллизационному отжигу, закалке и старению, а также химико-термической обработке.

Отжиг титановых сплавов проводят после холодной деформации. Температура их рекристаллизации составляет в среднем 500 °С, и отжиг при температуре 700-800 °С вполне достаточен для устранения наклепа. Структура после отжига показана на рисунке 35.

Преобразования при закалке и старении в титановых сплавах в принципе похожи на соответствующие превращения в стали. Однако из-за того, что пересыщенный α -твердый раствор в титановых сплавах мало отличается по прочности от равновесной α -фазы, столь существенного упрочнения, как в сталях, в титановых сплавах не происходит. В результате фазовой перекристаллизации происходит измельчение зерна, что положительно сказывается на их пластических свойствах.

Титановые сплавы обладают низкими антифрикционными свойствами. Для повышения износостойкости их подвергают азотированию в среде газообразного азота при 900 °С, что повышает поверхностную твердость.

Для повышения жаростойкости титановые сплавы подвергают силицированию и другим видам диффузионной металлизации.

1.16 Электротехнические материалы

По своим электрическим свойствам материалы разделяются на:

1. Проводники ($\rho_v = 10^{-8} - 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; с ростом температуры увеличивается).
2. Полупроводники ($\rho_v = 10^{-5} - 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; с ростом температуры уменьшается).
3. Диэлектрики ($\rho_v = 10^8 - 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; с ростом температуры уменьшается).

Материалы высокой электрической проводимости

Высокая проводимость металлов обусловлена строением их кристаллов. Металлическая связь образуется за счет большого количества свободных электронов. Это «электронное облако» внутри кристаллической решетки решетки легко привести в движение с помощью электрического поля; следовательно, металл – хороший проводник электричества. Самую высокую проводимость имеют непереходные металлы Cu, Au, Ag, Al, Na, меньшую – переходные металлы Fe, Cr, Ni и т.д. Электрическое сопротивление металла складывается из сопротивления, вызванного тепловым рассеиванием и примесным рассеиванием. В меньшей степени сопротивление увеличивают деформация и остаточные напряжения.

Влияние легирующих элементов на проводимость сплавов зависит от вида образующихся фаз:

- при образовании твёрдых растворов электрическое сопротивление меняется в соответствии с правилами Н.С. Курнакова – нелинейно, проходя через пологий максимум в области 50%;

- при образовании промежуточных фаз электрическое сопротивление резко изменяется, эти фазы имеют полупроводниковый характер проводимости (электронные фазы, фазы Лавеса, фазы внедрения, σ -фазы).

При образовании смесей из различных фаз электрическое сопротивление подчиняется правилу Н. С. Курнакова. Сплавы уступают чистым металлам по электропроводности, но обладают более высокой твёрдостью и износостойкостью, а температура их плавления ниже, (в случае наличия эвтектики в их структуре). Это позволяет получить материалы, удовлетворяющие различным требованиям электротехнической промышленности.

Деформация и остаточные напряжения незначительно влияют на проводимость чистых металлов, поэтому для них можно использовать наклёп с целью увеличения прочности. У сплавов наклёп сильно (до 25%) снижает электропроводность, поэтому упрочнение достигается за счёт снижения проводимости.

В зависимости от применения проводниковые материалы подразделяются на:

1. Металлы и сплавы высокой проводимости
2. Припой
3. Сверхпроводники
4. Контактные материалы
5. Сплавы с повышенным электрическим сопротивлением.

Металлы и сплавы с высокой проводимостью кроме низкого электрического сопротивления должны быть:

- прочными
- пластичными
- коррозионно-стойкими в атмосферных условиях
- обладать высокой свариваемостью и хорошо паяться
- износостойкими (в особых случаях)

Припой

Припой – это сплавы, используемые при пайке металлов высокой проводимости. Припой должны сочетать в себе низкое переходное (контактное) сопротивление и достаточную прочность. Для этого они должны хорошо смачивать поверхность соединяемых металлов, иметь более низкую температуру плавления и высокую жидкотекучесть, а температурные коэффициенты их расширения должны быть близки.

Припой бывают двух типов:

- для низкотемпературной пайки ($T_{\text{пл}} < 400^{\circ}\text{C}$);
- для высокотемпературной пайки ($T_{\text{пл}} > 400^{\circ}\text{C}$);

Наиболее широко используются припои на основе Sn, Pb, Zn, Ag. Они имеют высокую электропроводность и образуют эвтектики, сопротивление которых мало отличается от сопротивления самих металлов.

Для **низкотемпературной пайки** в основном применяются оловянно-свинцовые и оловянно-цинковые сплавы. Сплав олова и свинца эвтектического типа содержит 61% олова и 39% свинца (ПОС-61, $T_{\text{пл}} = 183^{\circ}\text{C}$). Применяются также доэвтектические (ПОС-18, ПОС-30, ПОС-40, ПОС-50) и заэвтектические (ПОС-90) сплавы.

Оловянно-цинковые сплавы этого класса применяются для пайки алюминия и его сплавов. Это эвтектический сплав – 90% олова и 10% цинка (ПОЦ-90, $T_{\text{пл}} = 199^{\circ}\text{C}$) и другие (ПОЦ-70, ПОЦ-60, ПОЦ-40). Если требуется очень низкая температура пайки ($T < 100^{\circ}\text{C}$), то используются сплав Вуда ($T_{\text{пл}} \approx 60^{\circ}\text{C}$) или Розе ($T_{\text{пл}} \approx 110^{\circ}\text{C}$). Это сплавы на основе висмута со свинцом, оловом и кадмием, обладающие низкой прочностью.

Припой для **высокотемпературной пайки** образуют более прочное соединение проводников, так как при высоких температурах взаимная диффузия металлов идёт более интенсивно. По этой же причине и переходное сопротивление этих припоев ниже. В качестве высокотемпературных припоев используется медь, медно-цинковые (ПМЦ-36,¹ ПМЦ-48, ПМЦ-54, $T_{\text{пл}} = 825 \div 880^{\circ}\text{C}$) и медно-фосфористые (ПМФ-7²) сплавы. Медно-фосфористые припои позволяют осуществлять пайку без применения флюсов.

¹ Цифра указывает процентное содержание меди.

² Цифра указывает процентное содержание фосфора.

Для высокотемпературной пайки любых металлов и сплавов особенно пригодны припои на основе серебра. Кроме серебра в их состав входят медь или медь с цинком (ПСр-72,³ ПСр-61, ПСр-45, ПСр-10, $T_{пл} = 780 \div 920^\circ\text{C}$).

Контактные материалы

Контакты делятся на: разрывные (подразделяются на слабонагруженные и высоконагруженные), скользящие и неподвижные. Для всех видов контактов основным требованием является низкое переходное сопротивление электрическому току.

Разрывные контакты – периодически замыкают и размыкают электрические цепи, поэтому они работают в наиболее тяжёлых условиях. В процессе работы этих контактов возникает **искра и электрическая дуга**, что приводит к их **коррозии** (окислению) и **эрозионному износу**. При этом повышается контактное сопротивление, происходит нагрев контактов и их сваривание (залипание). Из-за коррозии и эрозии металл контакта плавится, испаряется, в паре контактов появляется кратер и игла.

Сопротивление электроэрозионному изнашиванию увеличивается с ростом температуры плавления, твёрдости и прочности.

Слабонагруженные разрывные контакты изготавливаются из благородных металлов и сплавов: золота, серебра, платины, палладия. Эти материалы обладают низким переходным сопротивлением и повышенной стойкостью к окислению. Электроэрозионной стойкостью они не обладают.

Основным металлом для производства таких контактов является серебро, как самое дешёвое из благородных металлов, легко обрабатывается давлением и обладает высокой электропроводностью, но под воздействием электрической дуги оно окисляется и подвергается электроэрозионному износу. Окисление не ведёт к значительному росту переходного сопротивления, так как оксид серебра электропроводен, а при нагревании легко восстанавливается. В связи с этим чистое серебро используется в слабонагруженных контактах с небольшой частотой переключений.

Для слабонагруженных контактов широко применяются сплавы серебра с медью – они дешевле, обладают большей твёрдостью (поэтому более устойчивы к электроизносу), но медь снижает стойкость сплава против окисления.

Высоконагруженные разрывные контакты изготавливают из вольфрама, молибдена и их сплавов. Эти металлы и их сплавы благодаря высокой температуре плавления хорошо сопротивляются электроэрозионному изнашиванию. Вольфрам и молибден легко окисляются, их оксиды легко испаряются, поэтому их используют в среде инертных газов или в вакууме. Вольфрамовые контакты используют и на воздухе, так как он обладает достаточно высокой проводимостью, не свариваются, а его оксиды при работе разрушаются.

Сплавы вольфрама и молибдена (40 – 50 % Мо) обладают высокой устойчивостью к эрозионному изнашиванию, но из-за образования твёрдых растворов у них понижена проводимость и велико переходное электрическое сопро-

³ Цифра указывает процентное содержание серебра.

тивление. Для мощных контактов используют спечённые композиции из порошков вольфрама и серебра или меди. Также методом спекания получают пористый вольфрам, который затем в вакууме пропитывают жидким серебром или медью.⁴

В настоящее время используются серебряно-медные контакты, полученные методом внутреннего окисления. Сплав серебра и меди (СОМ-10, 10%Cu) подвергают длительному окислению (50 ч., 700°C) на воздухе. Медь окисляется и получается композиция – серебряная матрица с равномерно распределённым мелкодисперсным оксидом меди. Оксид меди повышает стойкость контакта к свариваемости электроэрозионному изнашиванию. Поэтому этот материал можно использовать и в тяжело нагруженных контактах и в скользящих контактах.

Скользящие контакты должны отвечать тем же требованиям, что и разрывные, но главным из них является высокое сопротивление свариванию. Для этого кроме окисленных серебряно-медных сплавов применяют композиции из порошков медь-графит (МГЗ, МГ5), серебро-графит (СГЗ, СГ5)⁵

Неподвижные контакты – должны иметь низкое переходное электрическое сопротивление, которое должно быть стабильным при небольших контактных усилиях. Для этого используют коррозионностойкие материалы, не образующих оксидных плёнок на контактной поверхности – медь, латунь, цинк.

Сплавы с высоким сопротивлением

Сплавы с высоким сопротивлением делятся на **реостатные**⁶ (для изготовления элементов сопротивления (таблица 30)) и **сплавы для нагревательных элементов** (таблица 31). В первую очередь эти сплавы должны обладать высоким сопротивлением электрическому току, следовательно иметь структуру твёрдых растворов. Также эти сплавы должны иметь малый температурный коэффициент сопротивления, высокую пластичность (так как используются в виде проволоки и шин). Реостатные сплавы должны также обладать низкой ТЭДС в паре с медью, а сплавы для нагревателей – жаростойкостью.

В зависимости от рабочей температуры все сплавы с высоким электросопротивлением делятся на три группы:

1. Сплавы для работы при температуре до 500°C – реостатные сплавы;
2. Сплавы для работы при температуре до 1200°C – реостатные сплавы и сплавы для нагревателей;
3. Сплавы для работы при температуре до 1500°C – сплавы для нагревателей.

Реостатные сплавы – константан (МНМц40-1,5⁷), манганин (МНМц3-12), копель (МНМц43-0,5⁸).

⁴ Сплав вольфрама с 45% Мо используют для нитей накаливания для нитей электрических лампочек и катодов электронных ламп как сплавы повышенного сопротивления.

⁵ Цифра в марке указывает содержание графита в процентах.

⁶ К ним иногда относят и сплавы для термопар.

⁷ Цифры указывают содержание Ni и Mn, остальное - Cu.

Сплавы для нагревателей:

- на основе никеля – нихромы (X20H80, X15H60);
- на основе железа – сплав № 1 (1X17Ю5), сплав № 2 (1X25Ю5).

Нагреватели на основе металлических сплавов работают при температурах до 1100°C (кратковременно до 1300°C). Для достижения более высоких температур в вакуумной или инертной среде используются вольфрам, молибден, тантал, платина и сплавы на их основе. При работе в окислительной атмосфере используются керамические материалы: силит – карбид кремния (до 1500°C), дисилицид молибдена (до 1700°C), хромит лантана (до 1700°C).

Таблица 30 - Реостатные сплавы

Сплав	Ni	Mn	Cu	T _{раб} , °C
МНМц 40-1,5 (константан)	39 - 41	1 - 2	Остальное	500
МНМц 3-12 (манганин)	2,5 - 3,5	11,6 - 13,5	Остальное	200
МНМц 43-0,5 (копель)	42,5 - 44,0	0,1 - 1,0	Остальное	500

Таблица 31 - Сплавы для нагревательных элементов

Сплав	Cr	Al	Fe	Ni	T _{раб} , °C
X23Ю5 (хромаль)	21,5 - 24,5	4,6 - 5,3	остальное	Не более 0,6	1200
X20H80 (нихром)	20 - 23	0,2	Не более 1,5	75 - 78	1100
X15H80 (нихром)	15 - 18	0,2	Не более 1,5	55 - 61	1050
X13Ю4 (фехраль)	12 - 15	3,5 - 5,5	-	0,6	1000
1X17ЮА (сплав № 1)	16 - 19	4,6 - 6,0	-	0,6	1000
1X25Ю5 (сплав № 2)	23 - 27	4,5 - 6,5	-	0,6	1150

Алюмель 2% Al, остальное Ni.

Хромель 10% Cr, остальное Ni.

1.17 Композиционные материалы

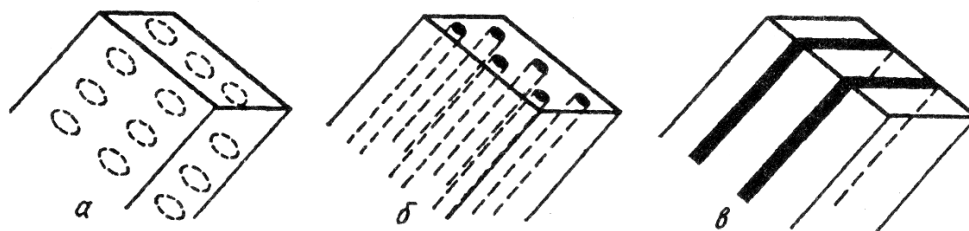
Композиционными материалами (КМ) называются сложные материалы, состоящие из сильно отличающихся по составу и структуре, а, следовательно, и по свойствам нерастворимых или малорастворимых друг в друге компонентов, разделённых в материале ярко выраженной границей. Композиционные материалы могут быть естественного происхождения (стволы и стебли растений, кости животных и человека) и искусственного.

Свойства композиционных материалов зависят от физико-механических свойств компонентов и прочности связи между ними, причём в композиционных материалах проявляются достоинства компонентов, а не их недостатки. В связи с этим композиционные материалы обладают такими свойствами, которыми не обладают компоненты, их составляющие. Наибольший эффект даёт сочетание компонентов, обладающих резко отличающимися свойствами, дополняющими друг друга. В связи с этим композиционные материалы превосхо-

⁸ Также относится к термпарным сплавам.

дят обычные материалы по удельной прочности и прочности при высоких температурах, по жёсткости, по сопротивлению усталостным разрушениям.

По структурным признакам композиты можно разделить на три группы: 1) волокнистые; 2) слоистые; 3) дисперсноупрочненные (рисунок 36).



а) дисперсноупрочненные; б) волокнистые; в) слоистые КМ

Рисунок 36 – Схемы строения композиционных материалов

Для **армирования** композиционных материалов могут использоваться:

- мелкодисперсные тугоплавкие частицы (карбиды, оксиды, нитриды и др.);
- проволока (стальная, титановая, бериллиевая и др.);
- волокно (углеродное, стекловолокно, из оксида алюминия и др.);
- нитевидные кристаллы (из оксида алюминия, карбида кремния и др.).

Основой композиционного материала является **матрица**, в соответствии с которой они делятся на:

1. Композиционные материалы на **металлической основе**;
2. Композиционные материалы на **неметаллической основе** – полимерные, углеродные, керамические.

Матрица связывает композицию, придаёт ей форму, от свойств матрицы зависят технологические режимы получения композиционного материала и важнейшие эксплуатационные характеристики: рабочая температура, сопротивление усталостному разрушению, коррозионная стойкость, плотность и удельная прочность.

У волокнистых и слоистых материалов несущим элементом является армирующий компонент (проволока, волокно, нитевидные кристаллы). Матрица является средой, передающей нагрузку на волокна, а в случае разрушения отдельных волокон матрица перераспределяет напряжения между волокнами. В дисперсноупрочненных материалах, несущим элементом является матрица, в которой мелкодисперсные частицы создают торможение распространению дислокаций.

Получение композиционных материалов. *Пропитка волокон расплавом матрицы.* Этот способ получения КМ заключается в пропитке расплавленным материалом матрицы упрочнителей в виде волокон, нитевидных кристаллов, уложенных в литейную форму в определенном порядке или произвольно.

К преимуществам этого метода можно отнести возможность получения готового изделия, не требующего дополнительной механической обработки.

Применять этот метод можно только при хорошей смачиваемости волокон жидкой матрицей.

Существенным недостатком такого метода пропитки является наличие после заливки пустот, сильно снижающих прочность КМ. Образование таких пустот связано с тем, что при большом содержании упрочняющих волокон (40-80% по объему), расстояния между волокнами настолько малы, что расплавленный металл под собственным весом не может залить все поры.

Как разновидность этого способа является *непрерывная пропитка* пучка волокон, проходящего через расплавленный металл при нормальном давлении.

Для изготовления КМ, применяемых при температурах ниже 200°С используют *полимерные матрицы*. К таким композитам относятся *стеклопластики*, армированные короткими стеклянными волокнами. В качестве матриц используют термореактивные полимеры (эпоксидные смолы), которые благодаря поперечным связям имеют высокую термостойкость. На рисунке 37 схематически показан способ изготовления такого композита. Готовые ленты собирают в слоистый листовый материал (аналог фанеры) или же наматывают в более сложные формы и отверждают термообработкой.

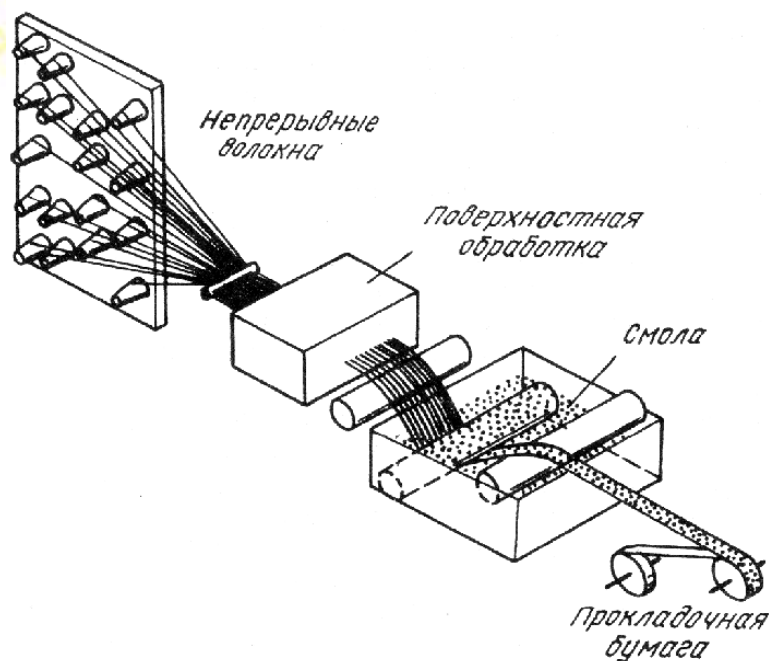


Рисунок 37 – Схема изготовления композиционного материала

Диффузионная сварка под давлением. Является промышленным способом соединения однородных и разнородных металлов. Процесс сварки происходит без расплавления основного металла. В месте сварки деталей происходит диффузия одного металла в другой. Матрицу чаще всего применяют в виде фольги. В качестве упрочнителей применяют волокна, проволоку из различных металлов и нитевидных кристаллы. Принципиальная схема получения КМ диффузионной сваркой под давлением показана на рисунке 38.

Основными технологическими параметрами этого процесса являются давление прессования, температура и время выдержки. Упрочнители могут применяться в виде жгутов, тканей, сеток, волокон и др. Прессование может

проводится в пресс-формах, обеспечивающих получение готовой детали сложной формы или между обогреваемыми плитами. Таким способом получают листы КМ алюминий – стальная проволока. Собирается пакет, состоящий из чередующихся слоев алюминиевой фольги и проволоки диаметром 0,2мм. Режим процесса: температура 480⁰С, давление 10000МПа и выдержка 20 мин.

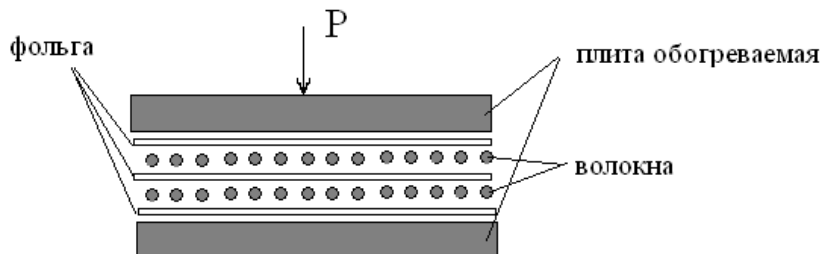


Рисунок 38 – Схема получения КМ диффузионной сваркой

Находят применение и другие способы изготовления композиционных материалов – сваркой взрывом, нанесение слоя металла на волокна напылением и др.

К композиционным материалам относятся и материалы, *упрочненные дисперсными фазами*. Чистые металлы не обладают достаточной прочностью, т.е. способны деформироваться при относительно низких напряжениях. Для повышения предела текучести в металлическую матрицу вводят мелкодисперсные частицы, как правило, это оксиды (Al_2O_3 , SiO_2) или другие соединения (нитриды, карбиды, бориды и т.д.), которые создают эффективное торможение распространению дислокаций. Несущим элементом в таком материале является матрица. Дисперсноупрочненные материалы используются главным образом для работы при высоких температурах (САП, САС).

Армирующие компоненты. Создание КМ стало возможным благодаря разработке армирующих компонентов, обладающих высокой прочностью, так как напряжения, возникающие в материале, воспринимаются в основном именно ими.

Волокна из металлов и их сплавов – стали, вольфрама, бериллия, молибдена, титана и др. получают различными методами. Наибольшее распространение получил метод волочения, т.е. протягивания проволоки через фильеру меньшего сечения по диаметру, чем исходящая проволока. В результате наклепа волокна приобретают высокую прочность. Так, например, предел прочности стальной струны 2400-3600 МПа, вольфрамовой 4200 МПа, титановой 1500-2000 МПа, бериллиевой 1000-1300 МПа. На прочность волокон оказывает влияние масштабный фактор. Чем меньше диаметр волокна, тем выше прочность. Так, например, предел прочности вольфрамовой проволоки диаметром 0,5мм равен 2000 МПа, а диаметром 0,05мм повышается до 3270 МПа.

Для армирования жаропрочных КМ волокна изготавливают из тугоплавких материалов – вольфрама и молибдена.

Углеродные волокна получают на основе нефтяных смол. Их можно разделить на две группы:

- высокопрочные волокна с пределом прочности 2500-3200 МПа и сравнительно невысоким модулем упругости – 180-220 ГПа,
- высокомодульные волокна с пределом прочности 1400-2200 МПа и модулем упругости 350-550 ГПа.

Плотность углеродных волокон низкая – 1,6-2,0 г/см³. Диаметр волокон 5-12 мкм.

Волокна бора, карбида кремния, оксида алюминия и др. имеют прочность в пределах 2500-4000 МПа. Применяются в качестве армирующих компонентов с алюминиевой, магниевой и титановой матрицами.

Нитевидные кристаллы (усы) в промышленности получают достаточно сложно. Для КМ используются нитевидные кристаллы оксида алюминия, нитрида алюминия, карбида кремния, нитрида кремния и др. Диаметр нитевидных кристаллов (усов) составляет от долей микрона до нескольких десятков микрон и длину до 60-80 мм. Усы обладают уникально высокой прочностью (таблица 32).

Таблица 32 – Механические свойства нитевидных кристаллов, полученных в лабораторных условиях

Материал	Предел прочности, МПа	Плотность, г/см ³	Удельная прочность, $\frac{\text{МПа}}{\text{г/см}^3}$
Оксид алюминия	2800	3,9	710
Карбид кремния	3700	3,2	1150

В итоге композиционный материал обладает сочетанием свойств:

- мягкая матрица обеспечивает материалу высокое сопротивление распространению трещин, т.е. высокие показатели пластичности, ударной вязкости,
- прочные волокна обеспечивают материалу высокое сопротивление начальному течению, т.е. высокие показатели прочности.

Другим видом композиционных материалов с металлической матрицей являются **эвтектические композиционные материалы**. В этих композитах упрочняющей фазой являются ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации. При охлаждении жидкостей определенного состава может идти кристаллизация с образованием двух фаз. Если при этом удастся создать плоский фронт кристаллизации, то возникает упорядоченная ориентированная микроструктура.

Практически это один из путей формирования нитевидных кристаллов непосредственно в матрице. Направленная ориентированная структура может быть получена на уже готовых изделиях. Процесс разрушения в таких композитах начинается с разрушения «усов», что свидетельствует о высокой прочности связи на поверхности раздела.

К преимуществам таких композитов следует отнести простоту их получения и возможность длительной работы при повышенных температурах.

Нанокпозиционными материалами (НКМ) называются материалы, имеющие средний размер одной из фаз менее 100 нм и содержанием ее в КМ от долей до нескольких процентов. Но этого достаточно, чтобы существенно изменить важные физические свойства металлов.

Основными параметрами наночастиц являются их форма, размер, а также распределение частиц по размерам. В нанометровых кристалликах отсутствуют дислокации. Уникальные свойства наночастиц определяются их чрезвычайно высокой удельной поверхностью (отношение поверхности к объему) и существенно отличаются как от свойств блочного материала, так и от свойств индивидуального атома. Для наноструктур доля поверхностных атомов соизмерима с числом атомов в объеме частицы. Энергетика такова, что они способны взаимодействовать с любыми химическими соединениями, включая инертные газы.

Другими важнейшими факторами, определяющими свойства конечного материала, являются природа взаимодействия между фазами и строение межфазных областей, объемная доля которых чрезвычайно велика. Но из-за очень малых размеров наноструктуры являются достаточно неравновесными системами. Даже при комнатной температуре происходит рост зерна и материал теряет нанокристаллические свойства.

Значительный интерес к наноструктурам связан с перспективами их широкого применения в микроэлектронике, оптике, акустоэлектронике.

1.18 Неметаллические материалы

Пластические массы

Пластмассы – это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров. Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, составляющих их основу. Состоят пластмассы из нескольких компонентов – связующего вещества, наполнителя, пластификатора и др.

Обязательным компонентом является *связующее вещество*. Такие простые пластмассы, как полиэтилен, вообще состоят из одного связующего вещества. *Наполнителями* служат твердые материалы органического и неорганического происхождения. Они придают пластмассам прочность, твердость, теплоустойчивость, а также некоторые специальные свойства, например антифрикционные, или, наоборот, фрикционные. Кроме того, наполнители снимают усадку при прессовании. *Пластификаторы* представляют собой нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Их вводят для расширения температурной области высокоэластического состояния, они снижают жесткость пластмасс и температуру хрупкости. В состав пластмасс могут входить также *стабилизаторы*, применяемые для предотвращения старения, красители и другие вещества.

Для пластмасс характерны следующие свойства. Малая плотность (обычно 1,0-1,8 г/см³, в некоторых случаях до 0,02-0,04 см³). Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и ще-

лочей. Высокие электроизоляционные свойства. Хорошая окрашиваемость в любые цвета. Некоторые пластмассы могут изготавливаться прозрачными, не уступающими по своим оптическим свойствам стеклам. В зависимости от природы выбранных полимеров и наполнителей пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими. Ряд пластиков по своей механической прочности превосходит чугун и бронзу. Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов. Например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без смазки. Все пластмассы, как правило, плохо проводят тепло, а теплопроводность таких теплоизоляторов, как пено- и поропласты, почти в 10 раз меньше теплопроводности обычных пластмасс. Высокие адгезионные свойства. Хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии – литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений в вакууме.

Недостатком большинства пластмасс является их невысокая теплостойкость (до 100-120°C). В настоящее время температурный потолок для некоторых видов поднялся до 300-400°C. Пластмассы могут работать при умеренно низких температурах (до -70°C), а в отдельных случаях – при криогенных температурах. Недостатками пластмасс также являются их низкая твердость, склонность к старению, ползучесть, нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам. Однако положительные свойства значительно превышают их отрицательные свойства, что обуславливает их широкое применение.

По характеру связующего вещества пластмассы разделяются на термопластичные (термопласты), получаемые на основе термопластичных полимеров, и терморезистивные (реактопласты), т.е. неразмягчающиеся.

Большое применение находят термопластичные пластмассы на основе полиэтилена, пропилена, полистирола, поливинилхлорида, фторопластов, полиамидов и других полимеров.

Основу всякого реактопласта составляет химически затвердевающая терморезистивная смола – связующее вещество. Кроме того, в состав реактопластов входят наполнители, пластификаторы, отвердители, ускорители или замедлители и растворители. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы. К пластмассам с порошковыми наполнителями относятся фенопласты и аминопласты. Реактопласты с волокнистыми наполнителями представляют собой композиции, состоящие из связующего и волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (волокниты), асбеста (асбоволокниты), стекловолокна (стекловолокниты). С листовыми наполнителями – гетинакс, текстолит, древесно-слоистые пластики (ДСП). Связующими при производстве слоистых пластиков служат феноло-формальдегидные, эпоксидные кремнийорганические и другие смолы.

Таблица 33 – Физико-механические свойства некоторых пластмасс

Пластик	Плотность ρ , г/см ³	E (20°C), ГПа	σ , МПа	Относительное удлинение δ , %
Термопластичные				

Полиэтилен (низкой плотности)	0,910-0,935	0,15-0,24	12-16	150-600
Полиэтилен (высокой плотности)	0,955-0,960	0,55-0,80	22-32	300-800
Полипропилен	0,890-0,910	0,67-1,19	28-40	150-600
Поливинилхлорид (жест- кий)	1,38-1,40	2,6-3,0	35-63	10-50
Полистирол	1,05-1,06	2,8-3,5	35-40	1-2
Полиамид-6 (капрон)	1,13	0,54	66-80	80-150
Т е р м о р е а к т и в н ы е				
Фенопласты (общетехни- ческого назначения)	1,40-1,85	7,0-31,7	28-30	0,3-0,7
Полиэфирные смолы (не- насыщенные отвержден- ные)	1,10-1,40	2,2-3,9	25-65	0,5-8,0
Эпоксидные смолы (от- вержденные)	1,20-1,25	2,1-4,5	43-75	1,0-4,0

Резины

Резинотехнические изделия получают при специальной термической обработке (вулканизации) прессованных деталей из сырой резины, являющейся смесью каучука с серой и другими добавками.

Главным исходным компонентом резины является каучук. Каучуки являются полимерами с линейной структурой. При вулканизации они превращаются в высокоэластичные редкосетчатые материалы – резины, за счет образования поперечных химических связей между полимерными молекулами. С увеличением содержания вулканизатора (серы) сетчатая структура резины становится более частой и менее эластичной. При максимальном насыщении серы (до 30-50%) получают твердую резину (эбонит), при насыщении серой до 10-15% - полутвердую резину. Обычное содержание серы в резине – 5-8%. Кроме серы, в состав резин входят наполнители, пластификаторы, противостарители и красители. Резиновые изделия часто армируют тканью или металлической сеткой.

Резина имеет высокие эластические свойства, высокую упругость и сопротивляемость разрыву. Кроме того, резина обладает малой плотностью, высокой стойкостью против истирания, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами.

Совокупность химических, физических и механических свойств позволяет использовать резиновые материалы для амортизации, демпфирования, уплотнения, герметизации, химической защиты деталей машин, при производстве тары для хранения масла и горючего, различных трубопроводов, для изготовления покрышек и камер колес автотранспорта, декоративных изделий и т.д.

В зависимости от условий эксплуатации различают резины общего и специального назначения. Резины специального назначения делятся на бензомаслостойкие, морозостойкие, теплостойкие, стойкие к действию агрессивных сред. Нижней границей рабочих температур резин специального назначения является температура до -80°C , резин общего назначения до $-30 \dots -50^{\circ}\text{C}$.

Клеящие материалы

Клеями называют сложные вещества на основе полимеров, способные при затвердевании образовывать прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам. По сравнению с другими видами соединений клеевые соединения имеют ряд преимуществ. Клеи позволяют соединять разнородные материалы в различных сочетаниях. Клеевые швы атмосферостойки, не подвержены коррозии, позволяют обеспечивать герметичность соединений, могут выдерживать высокие и низкие температуры. Масса конструкции при клеевой сборке почти не увеличивается, отсутствуют снижающие прочность и являющиеся концентраторами напряжений отверстия под болты, заклепки, гвозди.

Недостатками клеевых соединений являются сравнительно невысокая теплостойкость при длительной эксплуатации и низкая прочность при несимметричном нагружении и неравномерном отрыве.

Работоспособность клеевых соединений зависит от процессов адгезии и когезии. Адгезия характеризует прочность сцепления клеевой пленки со склеиваемой поверхностью, когезия – прочность собственно клеевого слоя.

Для приготовления клеев используют термопластичные или термореактивные полимеры. Клеи на основе термопластичных полимеров дают менее прочные соединения и используются ограниченно, обычно для склеивания материалов, не подвергающихся тепловому воздействию. С повышением температуры клеевой слой размягчается, и склеенные поверхности разъединяются. Клеи на основе термореактивных полимеров, содержащие также отвердители и ускорители процессов отверждения, наполнители и пластификаторы, дают более прочные соединения. Клеи этой группы могут быть холодного и горячего отверждения. Клеи холодного отверждения смешиваются с отвердителями и ускорителями непосредственно перед процессом склеивания. Клеи горячего отверждения готовят на заводе-изготовителе.

К группе клеев на основе термореактивных смол относятся феноло-формальдегидные клеи (Б-3, Ф-9), клеи на основе водных растворов мочевино-формальдегидных смол (КМ-12), а также клеи на основе эпоксидных смол. Универсальные клеи: БФ (феноло-формальдегидная смола модифицированная бутваром), ВК-32-ЭМ (продукт взаимодействия феноло-формальдегидной и эпоксидной смол), ВК-32-200 (феноло-формальдегидная смола и синтетический каучук), ВС-350 (феноло-формальдегидная смола, полиацеталь, полисилоксан) и многие другие.

По внешнему виду клеи бывают жидкими, пастообразными, пленочными. Широкое распространение получили пленочные клеи на эпоксидной основе, использование которых позволяет получать не только прочные клеевые соединения, но и дает существенные технологические преимущества. При применении пленочных клеев часто используют армирующие материалы – полиамидные, стеклянные и другие синтетические ткани.

Широко используют кремнийорганические клеевые композиции, полиуретановые (ПУ-2, ВК-20), а также резиновые и некоторые другие клеи.

Склеиваемые поверхности должны быть механически очищены (например, пескоструйной обработкой, наждачной бумагой) и обезжирены (спиртом, ацетоном). Толщина пленки клея должна составлять 0,1-0,6мм. Меньшая тол-

щина грозит нарушением сплошности пленки, большая – уменьшает прочность соединения.

Лакокрасочные материалы

Лакокрасочные материалы представляют собой многокомпонентные составы, наносимые в жидком состоянии наносящиеся на поверхность изделий и высыхающие с образованием пленок, удерживаемых силой адгезии. Высохшие пленки называют лакокрасочными покрытиями.

Основные компоненты: пленкообразователи, растворители и пигменты. Пленкообразователи придают лакокрасочным материалам способность к образованию пленки и определяют ее основные свойства. Пленкообразующими веществами могут быть высыхающие растительные масла, синтетические смолы и эфирные целлюлозы. Различают неотверждаемые термопластичные и отверждаемые термореактивные пленкообразователи.

Растворителями служат скипидар, уайт-спирит, ацетон, спирты и ароматические углеводороды типа бензола и толуола в зависимости от пленкообразующего вещества. Для ускорения высыхания покрытий применяют каталитически действующие сиккативы, представляющие собой растворы оксидов кобальта, цинка, свинца, марганца в растительном масле.

Пигменты применяют для получения цвета, улучшения адгезии, антикоррозионных свойств и водостойкости. Это оксиды или соли металлов, порошки алюминия или элементарного углерода. Применяют также пигменты органического происхождения.

Наполнителями служат мел, каолин, тальк, слюда, асбест и другие вещества. В зависимости от состава и назначения лакокрасочные материалы делятся на лаки, краски (в том числе эмали), грунты и шпаклевки.

Контрольная работа №1.

Номер Вашего варианта определяется первой буквой Вашей фамилии, см. первую и вторую колонки в таблице 34.

Таблица 34 - Варианты заданий контрольной работы № 1

В-т		П.1.1. Номер диа- граммы	П.1.3. Хим. состав	П.1.4. Структура*	П.1.5. Кривая охлаждения	П.1.6. Число степеней свободы	П.1.10. Кривая охлаждения Fe-C	П.1.11. Правило отрезков Fe-C
1	А	1	20%B T=250°C	$Q_{(A+B)}=75\%$ $Q_A = 25\%$ T=100°C	10%B	20%B T=150°C	0,5%C	1000°C 750°C
2	БВ	1	40%B T=50°C	$Q_B=70\%$ $Q_{ж} = 30\%$ T=350°C	50%B	20%B T=300°C	0,75%C	1450°C 650°C
3	ГД	2	10%B T=350°C	$Q_{ж} = 20\%$ $Q_B = 80\%$ T=300°C	50%B	90%B T=250°C	1%C	1000°C 650°C
4	ЕЁ	2	15%B T=300°C	$Q_B=30\%$ $Q_A = 70\%$ T=100°C	90%B	50%B T=300°C	1,5%C	850°C 650°C
5	ЖЗ	3	20%B	$Q_A=50\%$	70%B	50%B	2%C	1000°C

			$T=600^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{ж}} = 50\%$ $T=500^{\circ}\text{C}$		$T=300^{\circ}\text{C}$		650°C
6	ИЛ	3	80%B $T=400^{\circ}\text{C}$	$Q_{\alpha}=20\%$ $Q_{\text{ж}} = 80\%$ $T=600^{\circ}\text{C}$	60%B	80%B $T=600^{\circ}\text{C}$	2,5%C	1100°C 700°C
7	К	4	10%B $T=300^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{B}}=60\%$ $Q_{\text{ж}} = 40\%$ $T=400^{\circ}\text{C}$	50%B	30%B $T=200^{\circ}\text{C}$	3%C	900°C 650°C
8	МН	4	50%B $T=400^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{B}}=33\%$ $Q_{(\text{AnBm+B})} = 67\%$ $T=100^{\circ}\text{C}$	30%B	20%B $T=450^{\circ}\text{C}$	3,5%C	850°C 650°C
9	ОП	5	10%B $T=400^{\circ}\text{C}$	$Q_{(\text{A+B})}=67\%$ $Q_{\text{A}} = 33\%$ $T=100^{\circ}\text{C}$	80%B	20%B	4%C	1000°C 700°C
10	РТ	5	80%B $T=400^{\circ}\text{C}$	$Q_{(\text{A+B})}=90\%$ $Q_{\text{B}} = 10\%$ $T=100^{\circ}\text{C}$	20%B	70%B $T=150^{\circ}\text{C}$	4,5%C	1000°C 650°C
11	С	6	30%B $T=250^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{B}}=20\%$ $Q_{\text{ж}} = 80\%$ $T=300^{\circ}\text{C}$	5%B	90%B $T=250^{\circ}\text{C}$	5%C	1000°C 650°C
12	УФ Х	6	75%B $T=100^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{B}}=60\%$ $Q_{\alpha} = 40\%$ $T=100^{\circ}\text{C}$	5%B	95%B $T=250^{\circ}\text{C}$	5,5%C	1000°C 650°C
13	ЦЧ	7	50%B $T=350^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{ж}}=10\%$ $Q_{\alpha} = 90\%$ $T=500^{\circ}\text{C}$	20%B	80%B $T=300^{\circ}\text{C}$	6%C	1000°C 650°C
14	ШЩ	8	15%B $T=450^{\circ}\text{C}$	$Q_{(\text{A+AnBm})}=33\%$ $Q_{\text{AnBm}} = 20\%$ $T=100^{\circ}\text{C}$	90%B	50%B $T=600^{\circ}\text{C}$	3%C	1200°C 800°C
15	ЭЮ Я	8	35%B $T=200^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{ж}}=10\%$ $Q_{\text{AnBm}} = 90\%$ $T=400^{\circ}\text{C}$	20%B	10%B $T=150^{\circ}\text{C}$	5,5%C	1200°C 850°C

* $Q_{(\text{A+B})}$, $Q_{(\text{A+AnBm})}$, $Q_{(\alpha+\beta)}$, $Q_{(\text{AnBm+B})}$ – означает массу соответствующих эвтектик.

- 1.1. Начертить диаграмму под №, соответствующим Вашему варианту (таблица 34, П.1.1), диаграммы изображены на рисунке 39.
- 1.2. Описать превращения по диаграмме, т.е. дать ее название, описать все точки, линии, фазы, структуры имеющиеся на диаграмме.
- 1.3. Определить при помощи правила отрезков массовое соотношение фаз в точке (таблица 34, П.1.3.), химический состав фаз.
- 1.4. Определить при помощи правила отрезков химический состав сплава по структуре (таблица 34, П.1.4).
- 1.5. Построить кривую охлаждения для сплава (таблица 34, П.1.5.)
- 1.6. Найти число степеней свободы в точке (таблица 34, П.1.6.).
- 1.7. Начертить диаграмму Fe-C.
- 1.8. Описать линии, точки, фазы и структуры.
- 1.9. Построить кривую охлаждения для сплава с содержанием углерода, указанным в таблице 34 (П.1.9.).
- 1.10. Для данного сплава (таблица 34, П.1.10.) найти массовое соотношение фаз при двух температурах, указанных в таблице 34 (П.1.11.), химический состав фаз.

Диаграмма № 1

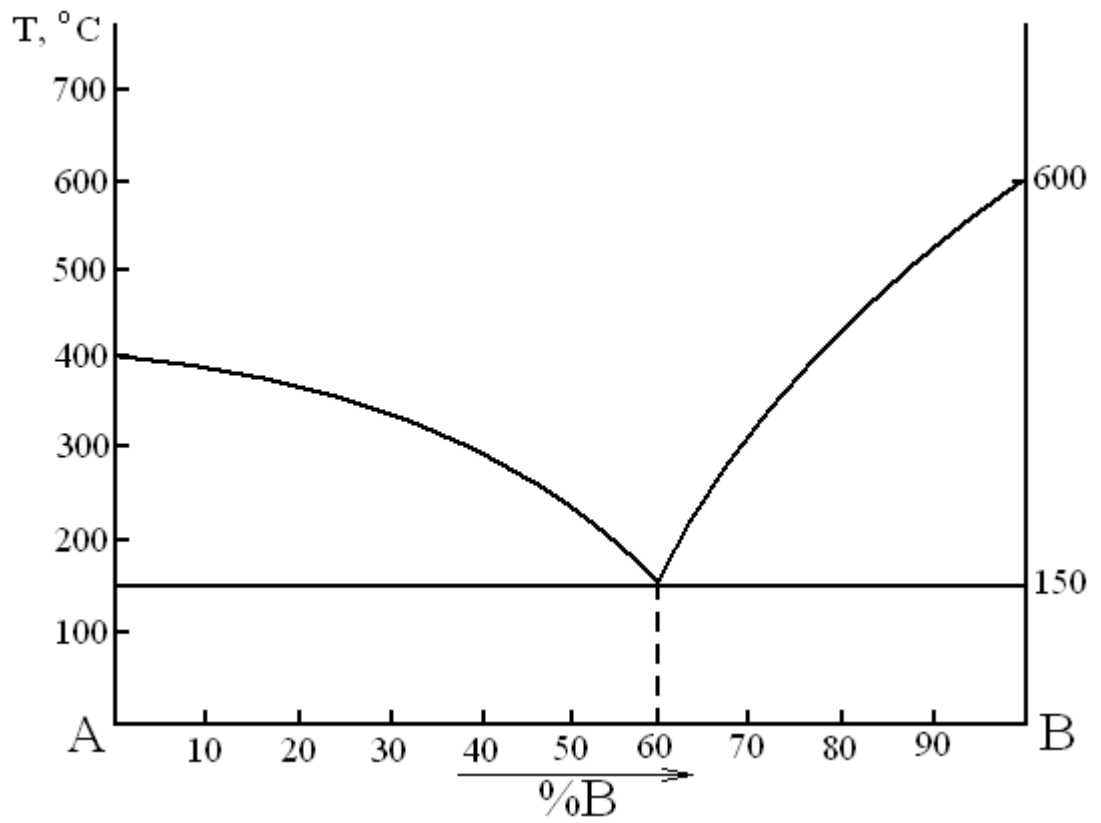


Диаграмма №2

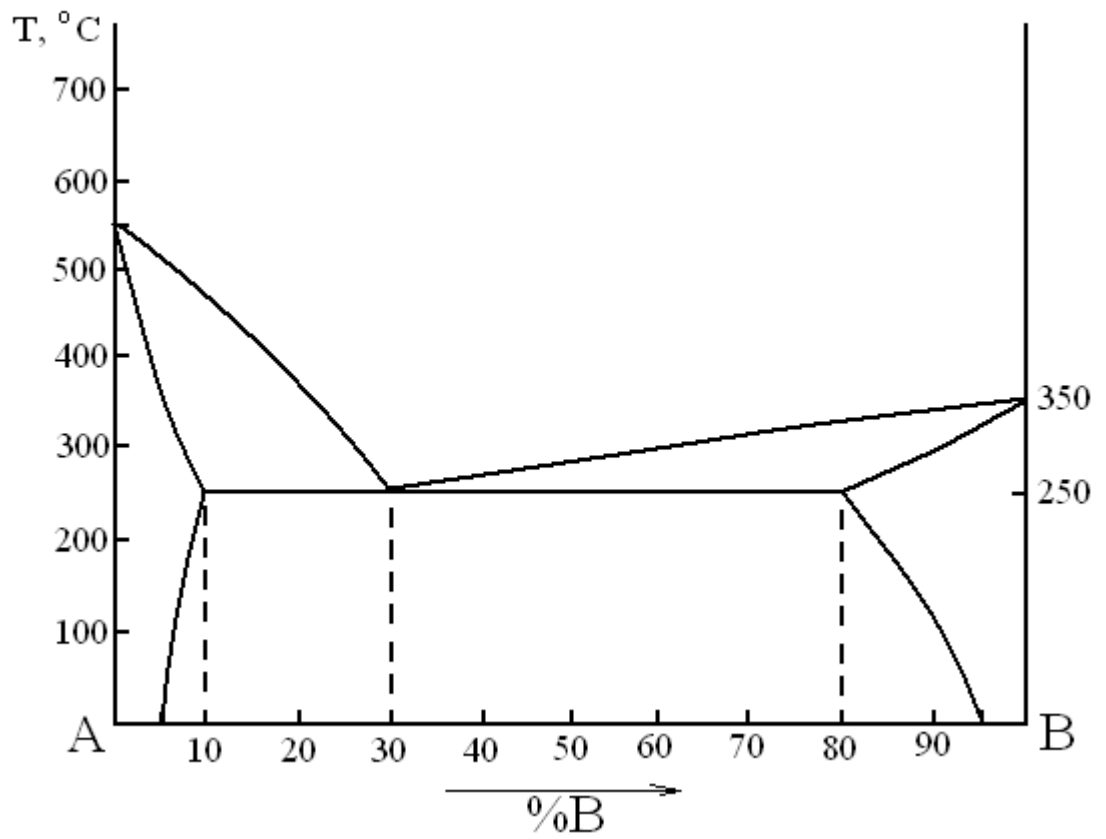


Диаграмма №3

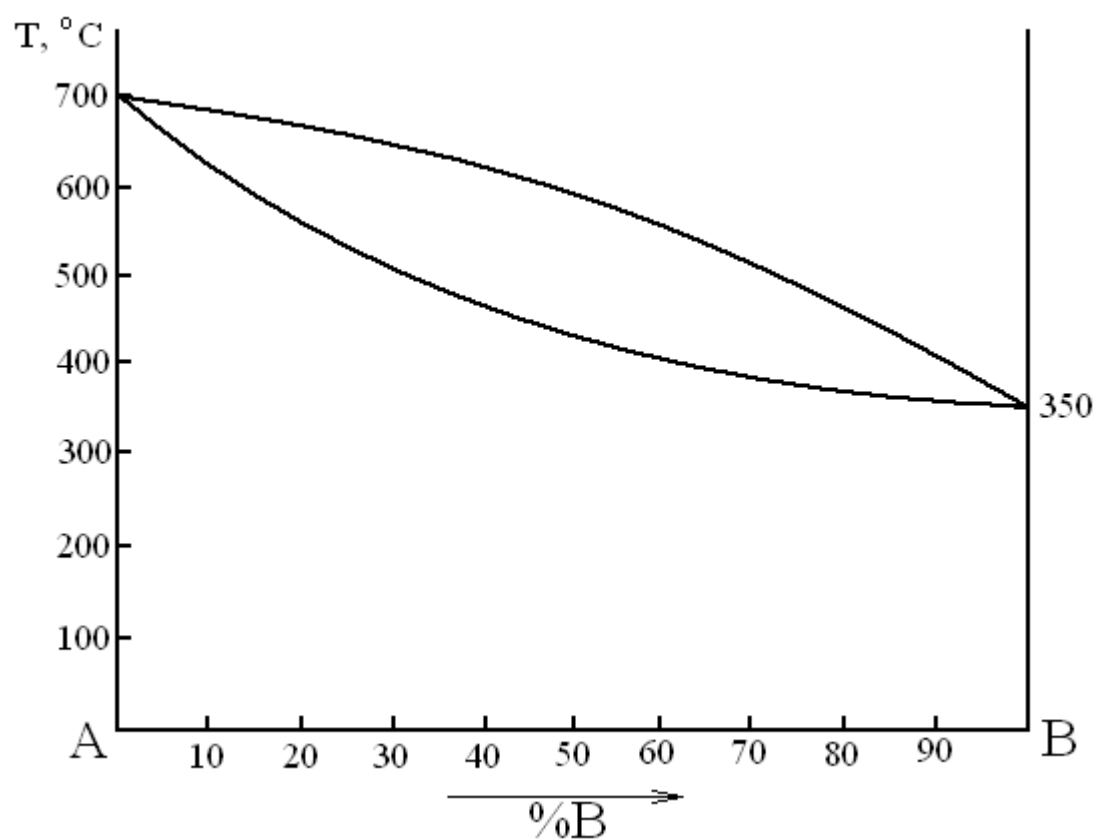


Диаграмма № 4

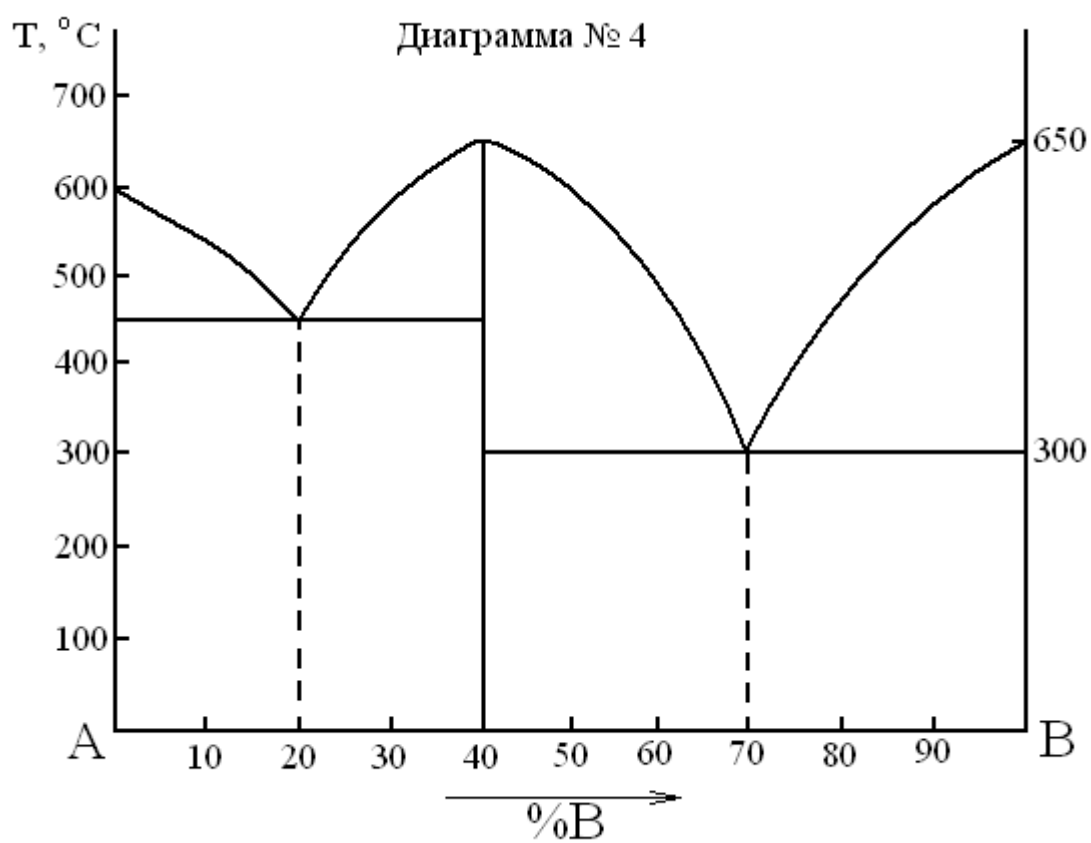


Диаграмма № 5

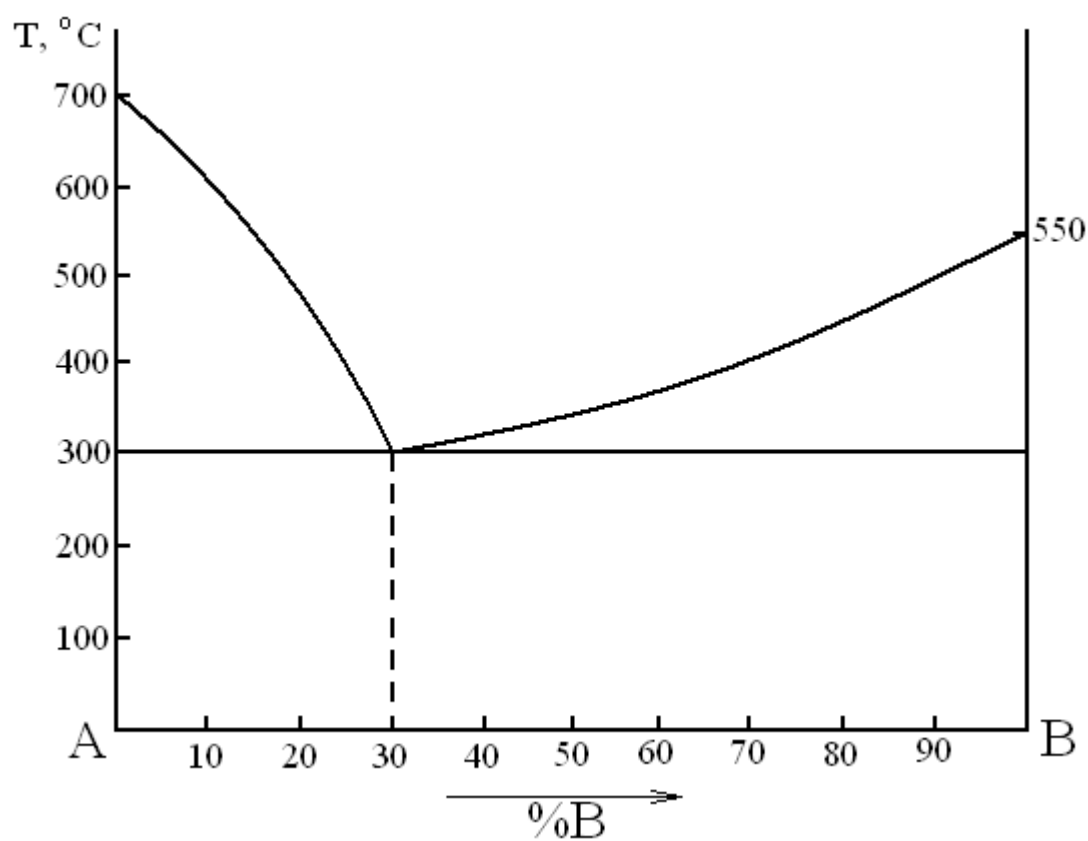


Диаграмма № 6

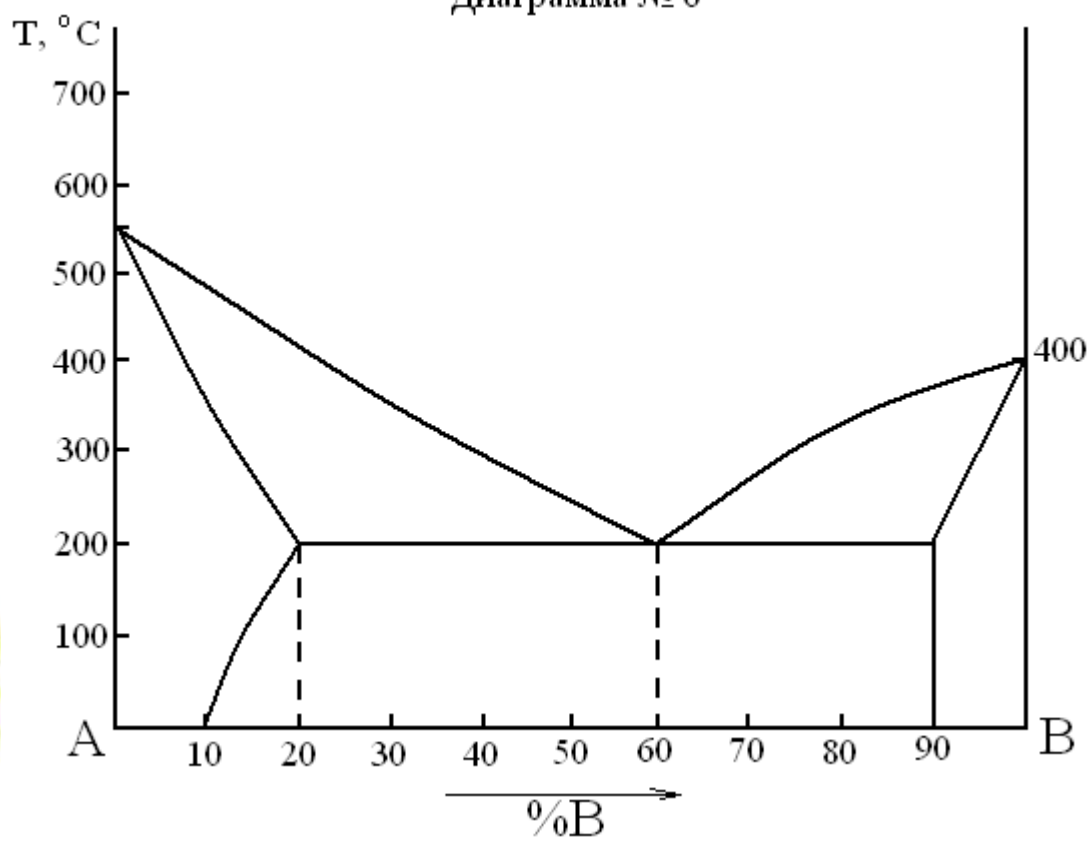


Диаграмма № 7

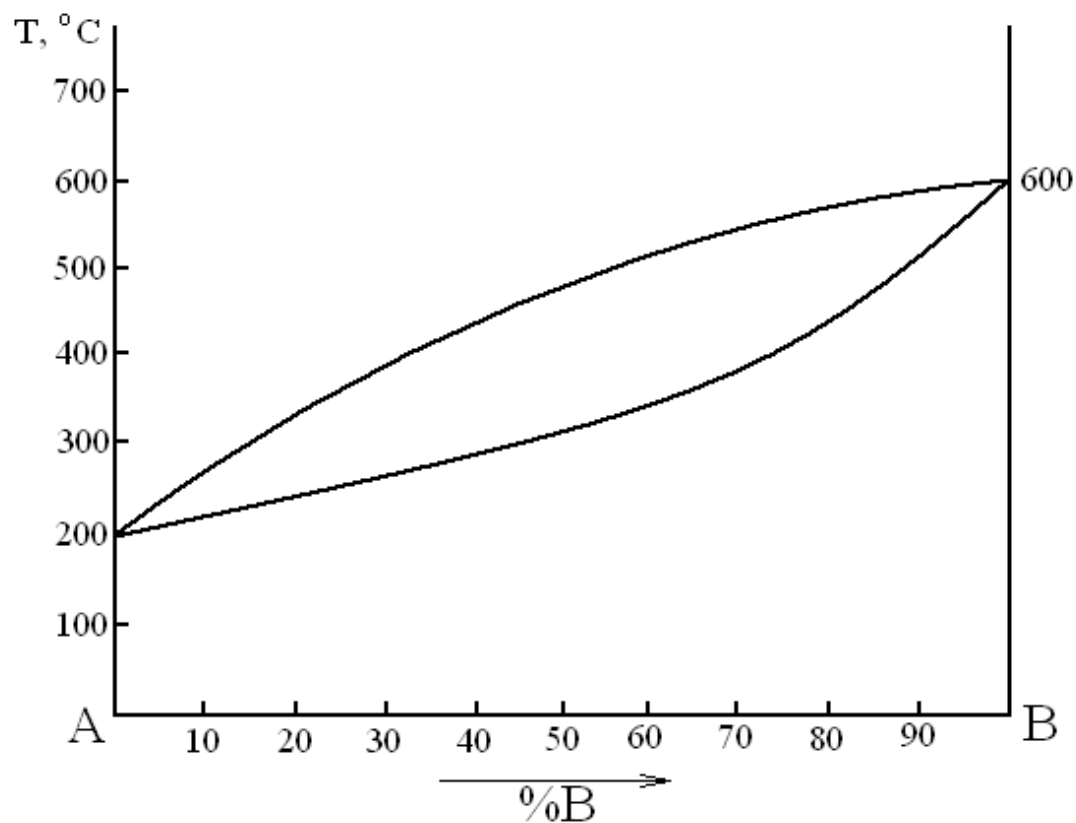


Диаграмма № 8

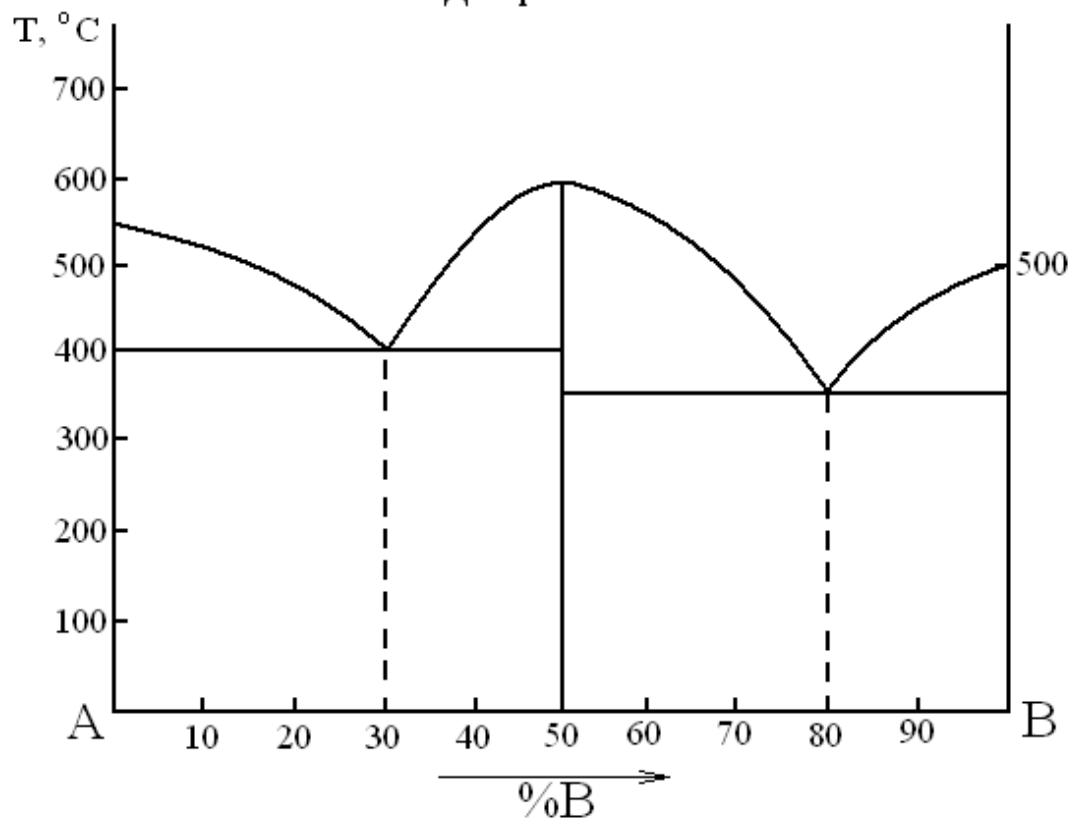


Рисунок 39 – Двухкомпонентные диаграммы состояния
(задания к контрольной работе №1)

Пример решения контрольной работы № 1

Пусть дана диаграмма, представленная на рисунке 40 – зарисовываем ее и дальнейшее решение проводим с помощью этого рисунка.

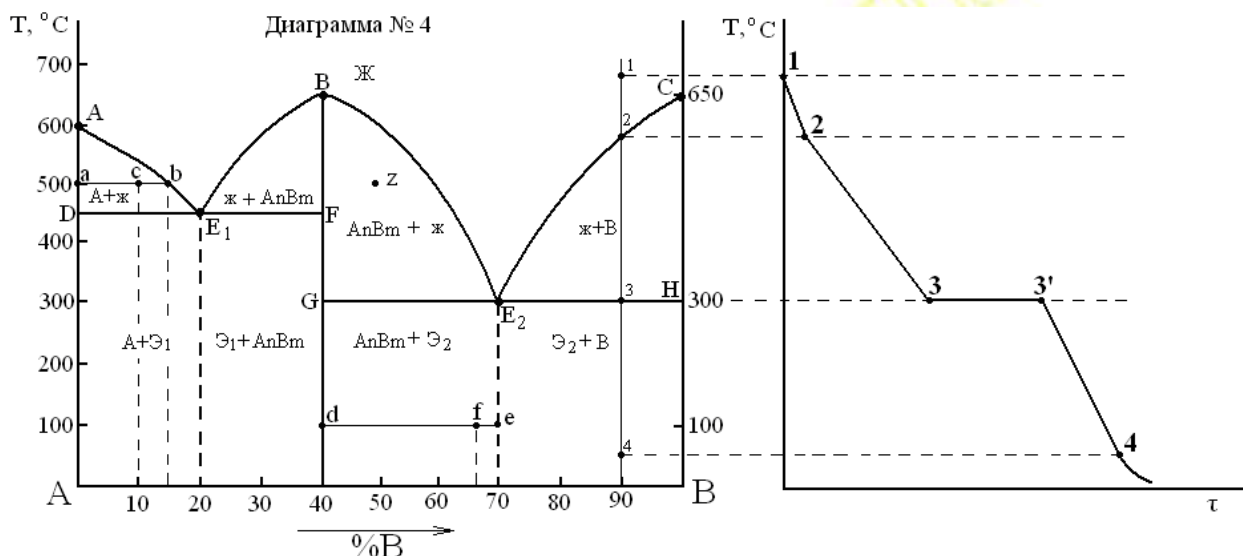


Рисунок 40 – Диаграмма состояния для сплавов с образованием устойчивого химического соединения и кривая охлаждения сплава 90%B+10%A.

1.2. Описать превращения по диаграмме.

Название: диаграмма состояния для сплавов с образованием устойчивого химического соединения.

Точки: $(\cdot)A$ – температура плавления компонента A; $(\cdot)C$ – температура плавления компонента B; $(\cdot)B$ – температура плавления химического соединения A_nB_m ; $(\cdot)E_1$ – первая точка эвтектики; $(\cdot)E_2$ – вторая точка эвтектики.

Линии: AE_1BE_2C – линия ликвидус; DF и GH – линии солидус.

Фазы и структуры: **Ж** – расплав компонентов A и B; **A** – кристаллы компонента A; **B** – кристаллы компонента B; **A_nB_m** – кристаллы A_nB_m ; **Ξ_1** – первая эвтектика – мелкодисперсная механическая смесь кристаллов A и A_nB_m ; **Ξ_2** – вторая эвтектика – мелкодисперсная механическая смесь кристаллов A_nB_m и B.

1.3. Определить при помощи правила отрезков структуру сплава в точке.

Дано: 10%B, $T=500^\circ\text{C}$.

Этим данным соответствует точка **c** на диаграмме (см. рисунок 40). В этой точке две фазы, расплав и кристаллы компонента A, т.е. правило отрезков применимо. Через точку **c** проводим горизонтальный отрезок **ab** до пересечения с линиями диаграммы. Составляем пропорцию и решаем ее измерив длину всех отрезков (буквой **Q** обозначаем массу). При решении необходимо помнить, что при составлении пропорции отрезок, соответствующий данной фазе, это дальний от нее отрезок, т.е. расплаву соответствует отрезок **ac**, а кристаллам A – **cb**. Общая масса – это 100%, и ей соответствует общий отрезок **ab**.

$$\frac{Q_A}{Q_{\text{общ.}}} = \frac{cb}{ab}; \quad \frac{Q_A}{100\%} = \frac{5}{15}; \quad Q_A = \frac{5}{15} \cdot 100\% = 33,3\%, \quad Q_{\text{Ж}} = 100\% - 33,3\% = 66,7\%$$

Химический состав расплава описывается точкой **b** (15%B + 85%A), а твердой фазы – точкой **a**.

Ответ: $Q_A = 33,3\%$; $Q_{\text{ж}} = 66,7\%$; $C_A = 100\% \text{ A}$; $C_{\text{ж}} = 15\% \text{ B} + 85\% \text{ A}$.

1.4. Определить при помощи правила отрезков химический состав сплава по структуре. Дано: $Q_{AnBm} = 10\%$, $Q_{(AnBm+B)} = 90\%$, $T = 100^\circ \text{C}$.

Эта задача является обратной задаче 1.3, т.е. нам дано весовое соотношение и надо найти точку на диаграмме, которой оно соответствует. Из данных задачи следует, что в искомой области присутствуют кристаллы A_nB_m и вторая эвтектика – это область под отрезком GE_2 на диаграмме. В этой области проводим горизонтальный отрезок **de** при температуре 100°C . На этом отрезке существует некоторая точка **f**, которая соответствует условиям задачи, соответственно можно составить пропорцию и решить ее:

$$\frac{Q_{AnBm}}{Q_{\text{общ.}}} = \frac{fe}{de}; \quad \frac{10\%}{100\%} = \frac{fe}{30}; \quad fe = 3$$

Т.к. длина отрезка **fe** найдена, можно определить химический состав сплава в точке **f**: 67%B и 33%A

Ответ: $C_{\text{сплав}} = 67\% \text{ B} + 33\% \text{ A}$.

1.5. Построить кривую охлаждения для сплава. Дано: 90%B.

Проводим вертикальную линию для данного химического состава и все точки пересечения этой линии с линиями диаграммы последовательно нумеруем, первая точка должна быть в расплаве – см. рисунок 40. При построении надо помнить, что: 1) если в данной точке начинается кристаллизация, то выделяется тепло и охлаждение идет медленнее (более пологий участок); 2) если число степеней свободы равно нулю, то на кривой охлаждения будет горизонтальный участок. Решение приведено на рис. 23 справа:

(·)1. $C_1 = 2 - 2 + 1 = 2$, т.к. 2 компонента и 1 фаза.

от (·)1 до (·)2 остывает расплав.

(·)2. Начинается кристаллизация компонента B, охлаждение пойдет медленнее. $C_2 = 2 - 2 + 1 = 1$, т.к. 2 компонента и 2 фазы.

от (·)2 до (·)3 кристаллизуется компонент B.

(·)3. Линия эвтектики. Здесь одновременно кристаллизуются компонент B и химическое соединение A_nB_m , т.е. вторая эвтектика, поэтому в равновесии находятся 3 фазы – Ж и кристаллы B и A_nB_m .

$C_3 = 2 - 3 + 1 = 0$. На кривой охлаждения горизонтальный участок 3-3', т.е. температура не меняется, пока весь расплав не превратится во вторую эвтектику.

от (·)3 до (·)4 остывает механическая смесь фаз A_nB_m и B.

(·)4. $C_4 = 2 - 2 + 1 = 1$.

1.6. Найти число степеней свободы в точке. Дано 50%B, $T = 500^\circ \text{C}$.

На рисунке 40 это (·)z. По формуле Гиббса $C = K - \Phi + 1$. У нас 2 компонента, 2 фазы (A_nB_m и Ж), поэтому $C = 2 - 2 + 1 = 1$.

1.7.. Зарисовываем диаграмму железо-углерод – см. рисунок 41.

1.8. Описать линии, точки, фазы и структуры.

Задание 2.1 выполняется аналогично заданию 1.1.

1.9. Построить кривую охлаждения для сплава. Дано: 2%С.

Решение показано на рисунке 41, справа.

(·)1. $C_1 = 2 - 2 + 1 = 2$: 2 компонента (Fe и C), 1 фаза (Ж),

от (·)1 до (·)2 остывает железо-углеродный расплав.

(·)2. Появляются первые кристаллы аустенита, на кривой будет перегиб, т.к. идет процесс кристаллизации.

$C_2 = 2 - 2 + 1 = 1$: 2 компонента, 2 фазы (Ж и А).

от (·)2 до (·)3 идет кристаллизация аустенита.

(·)3. Линия солидус, последний момент кристаллизации аустенита. Т.к. кристаллизация закончилась, дальше охлаждение идет быстрее.

$C_3 = 2 - 2 + 1 = 1$: 2 компонента, 2 фазы (Ж и А).

От (·)3 до (·)4 остывает аустенит.

(·)4. Из аустенита начинает выделяться вторичный цементит и охлаждение опять пойдет медленнее.

$C_4 = 2 - 2 + 1 = 1$: 2 фазы (А и Ц).

От (·)4 до (·)5 по линии ES падает растворимость углерода в аустените, кристаллизуется вторичный цементит, охлаждение идет медленнее.

(·)5. Линия эвтектоидного превращения (перлитного) PSK. Аустенит распадается на феррито-цементитную смесь, т.е. в равновесии 3 фазы, на кривой охлаждения горизонтальный участок 5 5', до тех пор, пока не закончится превращение.

$C_5 = 2 - 3 + 1 = 0$: 3 фазы (А, Ф, Ц).

От (·)5 до (·)6 остывает механическая смесь феррита и цементита (структура цементит + перлит).

$C_6 = 2 - 2 + 1 = 1$: 2 фазы.

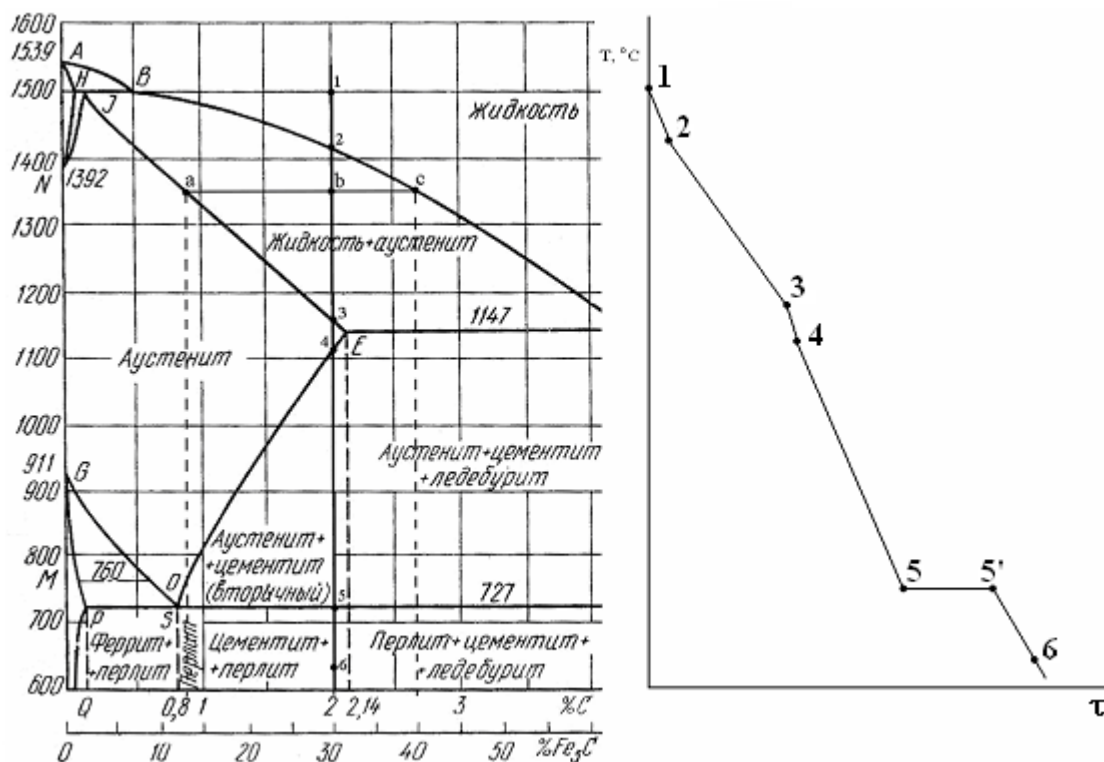


Рисунок 41 – Диаграмма Fe-C и кривая охлаждения для сплава с 2%С.

1.10. Для данного сплава найти весовое соотношение фаз, химический состав фаз. Дано: 2%С, $T = 1350^\circ\text{C}$.

Условиям задания соответствует точка **b** на диаграмме (см. рисунок 41). В этой точке имеются аустенит, химический состав которого описывается точкой **a** (0,87%С) и расплав, химический состав которого описывается точкой **c** (2,7%С) Составляем и решаем пропорцию:

$$\frac{Q_A}{Q_{\text{общ}}} = \frac{bc}{ac}, \quad \frac{Q_A}{100\%} = \frac{10}{27}; \quad Q_A = \frac{10}{27} \cdot 100\% = 37\%; \quad Q_{\text{ж}} = 63\%$$

Ответ: $Q_A = 37\%$; $Q_{\text{ж}} = 63\%$; $C_A = 0,87\%\text{C}$; $C_{\text{ж}} = 2,7\%\text{C}$.

Аналогично происходит решение при второй температуре, но при этом необходимо правильно определить какие две **фазы** имеются в данной точке и где на диаграмме слева и справа от данной точки расположены границы существования этих двух фаз.

2 КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

Коррозия – разрушение металлов в результате химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. Коррозия приносит огромный вред, заключающийся как в прямом ущербе, связанном с разрушением металлоконструкций, так и косвенном, обусловленном попаданием продуктов коррозии (ионов тяжелых металлов) в окружающую среду.

2.1 Виды коррозионных разрушений

1 По характеру разрушения поверхности коррозию подразделяют на сплошную равномерную, сплошную неравномерную и местную (точечная, язвы, пятнами, межкристаллитная и др.).

2 По типу коррозионной среды коррозию подразделяют на атмосферную, почвенную, морскую, кислотную, щелочную, микробиологическую и др.

3 По механизму протекания коррозионного процесса коррозию делят на **химическую** (газовая и коррозия в жидкостях неэлектролитах) и **электрохимическую** (коррозия в электролитах: атмосферная, подземная, морская, под действием блуждающих токов).

4 По характеру дополнительного воздействия коррозию подразделяют на коррозионное растрескивание, коррозионную усталость, коррозию при трении, кавитационную эрозию, струйную эрозию.

2.2 Показатели коррозионной стойкости

Коррозионная стойкость – способность металла сопротивляться коррозии. Показатели коррозионной стойкости позволяют сравнить различные металлы и сплавы по способности сопротивляться коррозии. **Весовой показатель K_v** характеризует потерю массы металла в результате коррозии с единицы поверхности в единицу времени:

$$K_v = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, [\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}] \quad (20)$$

где Δm – потеря массы металла, г; S – поверхность металла, подвергнутая коррозии, м²; τ – время коррозии, ч. **Глубинный показатель Π** характеризует глубину коррозионного разрушения металла в единицу времени:

$$\Pi = K_v \frac{8,76}{\rho}, [\text{мм/год}] \quad (21)$$

где ρ – плотность металла, г/см³. **Объемный показатель K_v** характеризует объем выделившегося в результате коррозии водорода (или поглощенного кислорода) с единицы поверхности в единицу времени:

$$K_v = \frac{\Delta V_{\text{H}_2}}{S \cdot \tau}, [\text{мл/см}^2 \cdot \text{ч}] \quad (22)$$

где ΔV_{H_2} (ΔV_{O_2}) объем выделившегося водорода (поглощенного кислорода) в миллилитрах, приведенный к нормальным условиям по формуле:

$$\Delta V_{\text{H}_2} = \frac{\Delta V_{\text{H}_2 \text{ изм}} \cdot p \cdot 273}{760 \cdot (273 + t)}, [\text{мл}] \quad (23)$$

где p – давление, мм.рт.ст.; t – температура, °С; $\Delta V_{\text{H}_2 \text{ изм}}$ ($\Delta V_{\text{O}_2 \text{ изм}}$) – объем выделившегося водорода (поглощенного кислорода), измеренный в опыте при данных p и t . Зная ΔV_{H_2} (ΔV_{O_2}), можно найти потерю массы:

$$\Delta m = \frac{M \cdot \Delta V_{\text{H}_2}}{n \cdot 11,2 \cdot 1000}, \text{ или } \Delta m = \frac{M \cdot \Delta V_{\text{O}_2}}{n \cdot 5,6 \cdot 1000}, [\text{г}] \quad (24)$$

M – молярная масса металла, г/моль; n – валентность. В случае электрохимической коррозии потерю массы можно также найти с помощью закона Фарадея по силе коррозионного тока:

$$\Delta m = \frac{M \cdot 60}{F \cdot n \cdot 1000} \cdot \int_0^{\tau} I(\tau) d\tau, [\text{г}] \quad (25)$$

где I – сила коррозионного тока, мА; $F = 96500$ Кл/моль – число Фарадея; τ – время, мин.

2.3 Внутренние факторы, влияющие на коррозию

Термодинамическая устойчивость металла. Коррозия возможна только в случае, когда при ее протекании изменение энергии Гиббса отрицательно ($\Delta G < 0$). Знак определяет только возможность коррозии, но не ее скорость. **Положение металла в таблице Менделеева.** Активность металлов увеличивается справа налево в рядах и сверху вниз в подгруппах. Наименее устойчивы к коррозии (наиболее активны) металлы первой главной подгруппы (Li, Na, K). Также мало устойчивы металлы второй главной подгруппы (Mg, Ca). Металлы второй побочной подгруппы (Zn, Cd) более устойчивы. Металлы первой побочной подгруппы (Cu, Ag, Au) относятся к устойчивым. **Химический состав.** Металлы высокой степени чистоты имеют повышенную коррозионную стойкость. Загрязнения неметаллами снижают коррозионную стойкость. Введение других металлов может как увеличивать, так и уменьшать коррозионную стойкость в зависимости от того, более или менее стойким является вводимый металл. **Структура сплава.** Коррозионная стойкость однофазных сплавов обычно значительно выше многофазных. **Шероховатость поверхности** снижает коррозионную стойкость, т.к. облегчается смачивание металла и при этом на его поверхности больше активных мест. **Внутренние напряжения** в изделиях, связанные с термообработкой или механической нагрузкой, приводят к снижению коррозионной стойкости.

2.4 Внешние факторы, влияющие на коррозию

рН среды. рН равно отрицательному логарифму концентрации ионов водорода: $\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$. При $\text{pH} = 7$ среда нейтральная, $\text{pH} < 7$ – кислая, $\text{pH} > 7$ – щелочная. Стойкость металла в среде с данным рН определяется растворимостью продуктов его коррозии, защищающих поверхность металла от дальнейшей коррозии. По зависимости скорости коррозии K от рН среды металлы делят на пять групп (рисунок 42). Диаграмма (а) характерна для благородных металлов (Au, Pt), для которых скорость коррозии мала и не зависит от рН. Диаграмма (б) характерна для Fe, Cu – малостойких в кислых средах и устойчивых в щелочных. Диаграмма (в) характерна для Al, Sn, Zn – устойчивых в нейтральных средах и сильно корродирующих в кислых и щелочных. Диаграмма (г) характерна для Ni, Cr – малостойких в кислых средах, умеренно стойких в нейтральных и стойких в щелочных. Диаграмма (д) характерна для W, Mo – малостойких в щелочных средах, умеренно стойких в нейтральных и стойких в кислых.

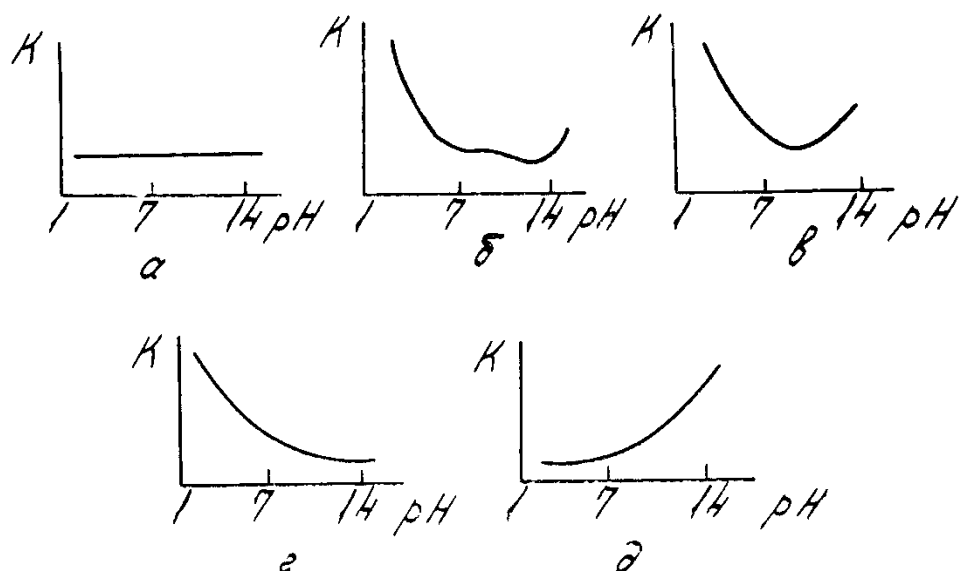


Рисунок 42 - Виды зависимостей скорости коррозии металлов от pH среды

Температура. С повышением температуры скорость коррозии, как правило, возрастает, т.к. возрастает скорость химических реакций, скорость диффузии и растворимость продуктов коррозии, защищающих поверхность. Однако, с повышением температуры падает растворимость кислорода в воде. Поэтому, если коррозия протекает в закрытой системе, то ее скорость растет с повышением температуры – рисунок 43 а, кривая 1. Если система открытая, то скорость коррозии начнет падать при примерно 70...80°C вследствие удаления O_2 из раствора – кривая 2. Кроме того, с повышением температуры могут создаваться условия для возникновения защитной оксидной пленки на поверхности и тогда скорость коррозии также уменьшится.

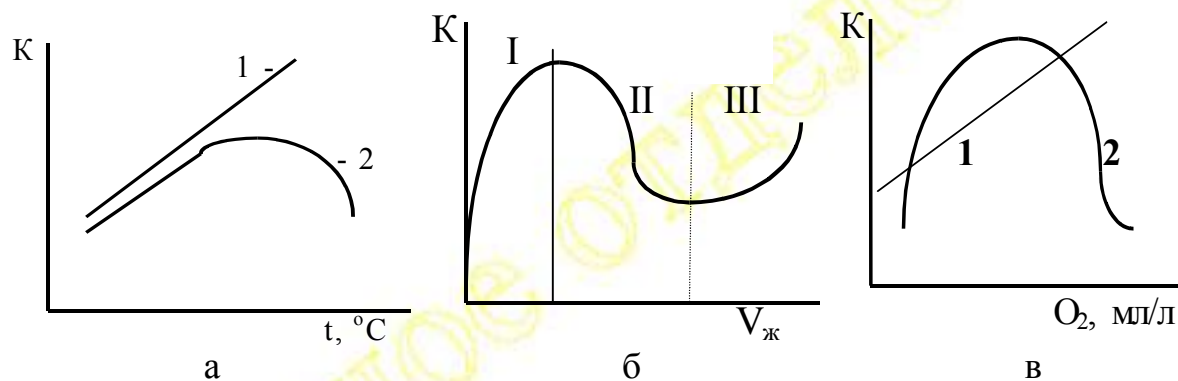


Рисунок 43 - Зависимость скорости коррозии железа в воде от температуры (а); от скорости движения жидкости (б); от концентрации растворенного кислорода (в)

Скорость движения электролита. Как видно из рисунка 43 б, вначале с повышением скорости движения электролита скорость коррозии увеличивается в следствие увеличения подвода кислорода к поверхности металла (I). Затем скорость коррозии уменьшается, т.к. на поверхности образуется защитная оксидная пленка (II). На участке (III) скорость коррозии возрастает из-за механического удаления этой пленки потоком жидкости и эрозии металла.

Концентрация кислорода. На рисунке 43 в представлена зависимость скорости коррозии от содержания O_2 в электролите. Если кислород играет роль деполяризатора, то скорость коррозии растет по линейной зависимости (1). Если кислород выступает в роли пассиватора, то при малых и средних концентрациях O_2 скорость коррозии возрастает вследствие потерь металла на образование окисла, а при больших – падает так как вся поверхность металла покрыта защитной оксидной пленкой.

Давление. С повышением давления скорость коррозии возрастает, что связано с увеличением растворимости газов в коррозионной среде и появлением внутренних механических напряжений в металле.

2.5 Химическая коррозия

Химическая коррозия – это разрушение металла в результате химического взаимодействия с окружающей средой. Окислительный и восстановительный процессы при химической коррозии протекают в одном акте. По условиям протекания химическую коррозию делят на газовую и коррозию в жидкостях-неэлектролитах.

Газовая коррозия

Газовая коррозия – химическая коррозия в газовой среде при повышенных температурах в отсутствие влаги. Газовой коррозии подвергается арматура печей, детали двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин. Термообработка и горячая механическая обработка металлов также вызывают газовую коррозию.

Кислородная коррозия. Это самый распространенный вид газовой коррозии, т.к. самой распространенной газовой средой является воздух. В процессе окисления на поверхности металла образуется оксидная пленка. Эта пленка будет обладать защитными свойствами при соблюдении следующих условий: пленка должна быть сплошной, беспористой, прочной, не разрушаться в агрессивной среде, иметь хорошую адгезию (сцепление) к поверхности металла, а также близкий к металлу коэффициент термического расширения, чтобы не отслаиваться при нагревании. Хорошими защитными свойствами обладают оксидные пленки Cr, Al, Si. При нагреве стали и чугуна на воздухе происходит не только окисление железа кислородом, но и процесс **обезуглероживания**:



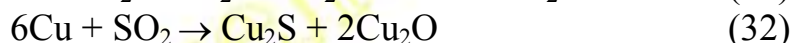
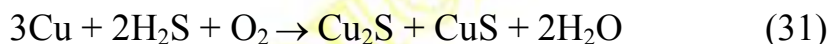
В результате происходит разрушение цементита, и снижение поверхностной прочности, твердости и износостойкости.

Водородная коррозия включает следующие процессы. 1. Проникновение водорода в сталь приводит к образованию хрупкого твердого раствора водорода в феррите. 2. Выделение по границам зерен молекулярного водорода из продифундировавшего атомарного, а также метана и паров воды по реакциям (29) и (30) разрушает связи



между зернами и приводит к образованию микротрещин. **3.** Процесс обезуглероживания (29) приводит к снижению поверхностной прочности, твердости и износостойкости стали. **4.** В местах трения продукты водородной коррозии ведут себя подобно песку – **водородный износ**.

Коррозия под действием сернистых соединений (H_2S , SO_2) характерна для химической и нефтехимической промышленности. Приводит к потускнению меди:



В промышленной атмосфере на меди образуется защитная пленка зеленого цвета состава $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$. Особенно чувствительны к сернистой коррозии Ni и его сплавы. Ni и сернистый никель Ni_3S_2 образуют по краям зерен легкоплавкую эвтектику, что приводит к разрушению металла (*межкристаллитная коррозия*).

Защита от газовой коррозии. Для защиты сталей от газовой коррозии их легируют Cr, Al, Si, образующими защитные пленки Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 (*жаростойкие стали*). Кроме того, на металлы наносят защитные металлические и неметаллические покрытия. Применяют также защитные атмосферы благородных и инертных газов – Ar, N_2 .

2.6 Электрохимическая коррозия

Электрохимическая коррозия – это разрушение металла в результате взаимодействия с раствором электролита, при котором окислительный и восстановительный процессы протекают не в одном акте и на разных участках металла – анодном и катодном. Электрохимическая коррозия сопровождается протеканием электрического тока. К этому виду коррозии относятся *атмосферная, подземная, морская* и др.

Электролиты – это химические соединения, которые в растворе полностью или частично диссоциируют на катионы и анионы ($\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$). Наличие положительно и отрицательно заряженных ионов придает растворам электролитов электропроводность. Диссоциация может происходить только в растворителях, молекулы которых полярны, например в воде. Молекулы воды являются диполями и электростатически взаимодействуют с ионами растворенного вещества, образуя гидратированные катионы и анионы.

При гидратации иона выделяется энергия гидратации. При погружении металла в раствор электролита его поверхность заряжается. Если энергия гидратации ионов металла больше энергии химической связи атомов в решетке металла, то ионы металла переходят в раствор, а на поверхности металла остается эквивалентное количество электронов. Поверхность металла заряжается отрицательно и к ней притягиваются положительно заряженные ионы из раствора (рисунок 44 а). Если энергии химической связи атомов в решетке металла больше энергии гидратации ионов, то катионы раствора могут забирать электроны с поверхности металла. Поверхность металла заряжается положительно и к ней притягиваются отрицательно заряженные ионы из раствора (ри-

сунок 44 б). В результате на границе раздела металл-электролит образуется двойной электрический слой (ДЭС), который характеризуется электродным потенциалом.

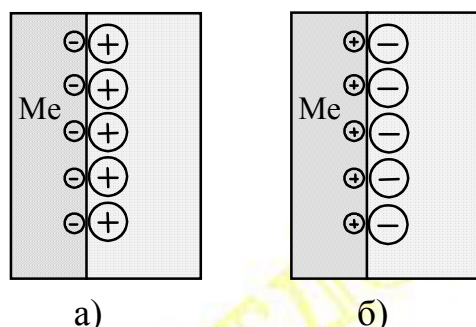


Рисунок 44 – Схема строения ДЭС

Электродный потенциал – разность потенциалов в ДЭС между металлом и раствором. С течением времени процессы перехода ионов металла в раствор и адсорбции ионов раствора на поверхности уравниваются и значение электродного потенциала металла становится постоянным. Абсолютное значение электродных потенциалов определить невозможно, поэтому их измеряют относительно электродов сравнения. Основным электродом сравнения, потенциал которого условно принят за ноль, является стандартный водородный электрод, потенциал которого характеризует процесс $\frac{1}{2}\text{H}_2 - \text{e}^- \rightarrow \text{H}^+$. Чем отрицательнее потенциал металла, тем выше его восстановительные свойства и склонность к коррозии – см. таблица 35. Металлы, имеющие потенциал меньше чем водород, будут окисляться водородом и кислородом. Металлы, у которых потенциал больше, чем у водорода, но меньше чем у кислорода, будут окисляться только кислородом. Те металлы, у которых потенциал больше, чем у кислорода, корродировать не будут (Au, Pt).

Таблица 35 - Стандартные электродные потенциалы

Электрод	$E_0, \text{В}$	Электрод	$E_0, \text{В}$
Al/Al^{3+}	-1.66	$\frac{1}{2}\text{H}_2/\text{H}^+$	0.00
Zn/Zn^{2+}	-0.74	Cu/Cu^{2+}	+0.34
Fe/Fe^{2+}	-0.44	Au/Au^+	+1.69

Механизм электрохимической коррозии. Электрохимическая коррозия возникает в результате работы множества короткозамкнутых гальванических элементов, образующихся вследствие химической и энергетической неоднородности металла (сплава). На рисунке 45 представлена схема коррозии стали со структурой феррит-цементит в растворе кислоты. На **аноде** – участке поверхности с более отрицательным потенциалом (феррит) происходит окисление железа и переход ионов в раствор, где они гидратируются:



Анод при этом заряжается отрицательно. На **катоде** – участке поверхности с более положительным потенциалом (цементит) происходит восстановление ионов и молекул раствора, например:



Катод при этом заряжается положительно. Катодами могут быть не только зерна цементита, но и включения металлов с более положительным потенциалом или различных неметаллов. Наличие электронной проводимости у металла и ионной у раствора электролита позволяет анодным и катодным процессам протекать на различных участках поверхности металла. Между анодом и катодом протекает электрический ток – образуется замкнутый гальванический элемент.

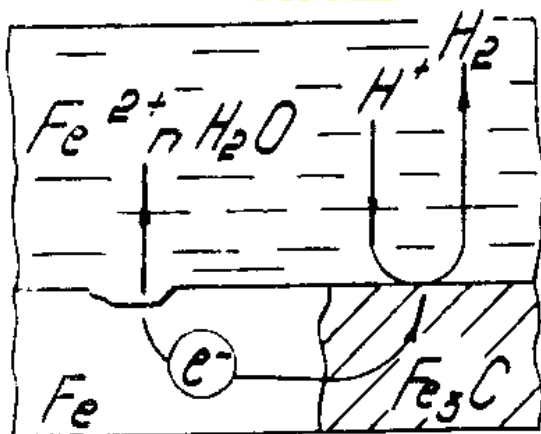


Рисунок 45 - Схема электрохимической коррозии стали в растворе кислоты

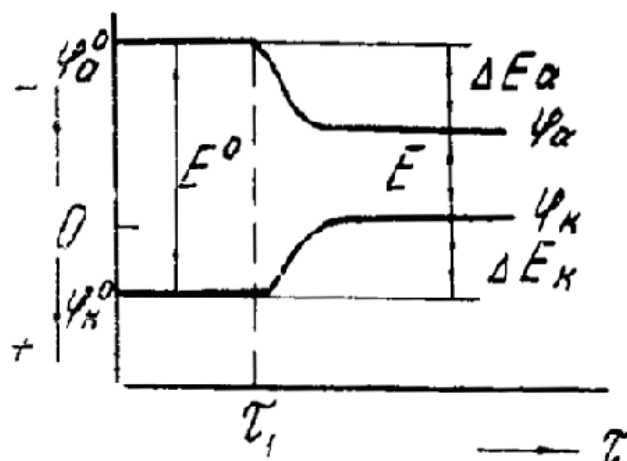


Рисунок 46 - Схема изменения потенциалов катода и анода после замыкания цепи

Поляризацией называется изменение потенциалов электродов при протекании электрического тока, а также процессы, приводящие к уменьшению скорости коррозии за счет изменения потенциалов, а, следовательно, и снижению коррозионного тока. Когда цепь между катодом и анодом разомкнута (до момента времени τ_1 , рисунок 46), катод и анод имеют значения потенциалов φ_k^0 и φ_a^0 соответственно – это равновесные или стационарные потенциалы. После замыкания цепи (после τ_1) между анодом и катодом начинает протекать электрический ток и потенциалы катода и анода изменяются до значений φ_k и φ_a . Разность потенциалов при этом изменяется от E^0 до E . Смещения потенциалов анода и катода составляют ΔE_a и ΔE_k – анодная и катодная поляризация. В результате поляризации скорость коррозии падает, потенциал анода становится менее отрицательным, а потенциал катода менее положительным, разность потенциалов падает и ток коррозии уменьшается.

Причиной поляризации является торможение (маленькая скорость) одной или нескольких составляющих процесса электрохимической коррозии. В результате скорость накопления отрицательных зарядов на аноде или положительных на катоде становится меньше скорости перехода электронов от анода к катоду и потенциалы анода и катода изменяются. Поскольку скорость всего процесса определяется скоростью самой медленной (лимитирующей) стадией, то в результате поляризации скорость коррозии в целом замедляется. **Анодная поляризация** (торможение анодного процесса) может быть вызвана медленным выходом ионов металла в раствор (лимитирует химическая реакция), образованием на поверхности металла защитной оксидной пленки или медленным отводом ионов металла от поверхности, что затрудняет выход следующих (лимитирует диффузия). **Катодная поляризация** (торможение катодного процесса) может быть вызвана маленькой скоростью окисления катионов или молекул раствора на поверхности металла (лимитирует химическая реакция) или медленным подводом катионов или молекул раствора к поверхности катода и отводом продуктов восстановления от катода в раствор (лимитирует диффузия).

Депольяризацией называются явления, способствующие увеличению скорости коррозионных процессов и соответственно уменьшению поляризации электродов. Вещества, уменьшающие поляризацию называются **деполяризаторами**. Наиболее распространенными катодными депольяризаторами являются водород и кислород – основные окислители в растворах. Коррозия с участием ионов водорода возможна в случае, когда равновесный потенциал металла отрицательнее равновесного потенциала водородного электрода в данных условиях. Депольяризующее действие будет оказывать увеличение содержания в растворе водорода. Коррозия с участием молекул кислорода – наиболее распространенный случай. Депольяризующее действие будет оказывать увеличение содержания в растворе кислорода. Депольяризующее действие будут также оказывать растворение защитной оксидной пленки и все факторы, облегчающие доступ окислителей к поверхности металла, например, перемешивание.

Атмосферная коррозия

Это самый распространенный вид коррозии. Одним из основных факторов, определяющих механизм и скорость атмосферной коррозии, является степень увлажнения поверхности. По степени увлажненности поверхности металла различают:

- **мокрую атмосферную коррозию**, протекающую при наличии фазовой пленки воды и непосредственном попадании влаги на металл (относительная влажность 100%.);
- **влажную атмосферную коррозию**, протекающую при наличии адсорбционной пленки воды (относительная влажность $70 < \Psi < 100\%$.);
- **сухую атмосферную коррозию**, протекающую при отсутствии пленки влаги на поверхности металла.

Это деление условно, т.к. при изменении влажности воздуха мокрая коррозия может перейти во влажную, а влажная в сухую и наоборот. Механизм сухой

атмосферной коррозии аналогичен химической *газовой* коррозии. Влажная и мокрая атмосферные коррозии по механизму являются *электрохимическими*.

Для атмосферной коррозии характерен легкий доступ кислорода к поверхности металла вследствие малой толщины пленки влаги. Поэтому, катодный процесс протекает в основном с *кислородной деполяризацией* (окислителем является кислород). При уменьшении толщины пленки влаги на поверхности металла облегчается доступ кислорода и катодный процесс ускоряется. В тоже время облегчается образование защитной оксидной пленки на аноде. Поэтому, зависимость скорости атмосферной коррозии от **толщины пленки влаги** на поверхности металла носит сложный характер – рисунок 47 а. При малых толщинах, в области А, наблюдается сухая атмосферная коррозия. С ростом толщины в области Б наступает влажная, а в области В – мокрая атмосферная коррозия. Область Г характеризует коррозию при погружении металла в раствор электролита.

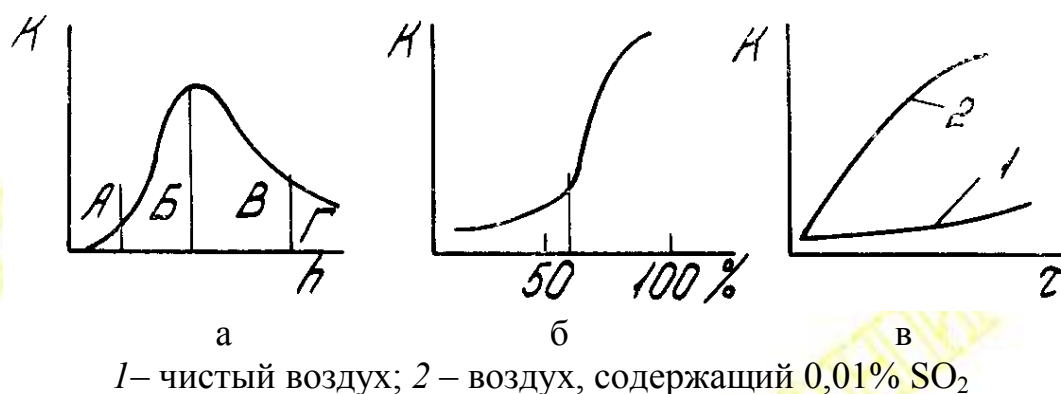


Рисунок 47 - Зависимость скорости атмосферной коррозии от толщины пленки (а), от влажности воздуха (б) и от времени и чистоты воздуха (в)

Толщина пленки влаги зависит от **относительной влажности**, поэтому с ее увеличением скорость атмосферной коррозии возрастает. Особенно резко скорость коррозии возрастет при некотором критическом значении влажности, при котором происходит переход от сухой к влажной коррозии (рисунок 47 б). Скорость атмосферной коррозии со **временем** увеличивается и значительно возрастает при загрязнении атмосферы **коррозионно-активными агентами** CO_2 , Cl_2 , HCl , NH_3 , H_2S , SO_2 и т.д., а также **частицами** пыли, угля и золы (рисунок 47 в). Повышение **температуры** приводит к уменьшению относительной влажности, конденсация влаги на поверхности металла затрудняется и скорость атмосферной коррозии падает.

Защита от атмосферной коррозии металлов и сплавов осуществляется с помощью металлических, полимерных и лакокрасочных покрытий, а также временных средств защиты – смазок, осушителей, инертных атмосфер, ингибиторов.

Подземная коррозия

В подавляющем большинстве случаев подземная коррозия протекает по *электрохимическому* механизму. Подземную коррозию принято подразделять на грунтовую и коррозию под действием блуждающих токов, имеющих в грунте в следствие утечки тока с рельсов электротранспорта, работающего на постоянном токе, а также заземления различных промышленных установок.

Почва – верхний слой земли, содержащий органические и минеральные вещества. **Грунт** – слой под почвой, не содержащий органических веществ. Почва и грунт состоят из твердых (гравий, песок, перегной), жидких и газовых компонентов.

Увеличение **влажности** грунта облегчает *анодный* процесс (затрудняет образование защитной пленки), но затрудняет *катодный* процесс (уменьшается скорость подвода кислорода к катоду). Поэтому, на зависимости скорости коррозии стали от влажности имеется максимум (рисунок 48). В песчаных почвах скорость коррозии выше, чем в глинистых, т.к. в они более воздухопроницаемы и кислороду воздуха легче достигнуть поверхности металла.



Рисунок 48 - Зависимость коррозии от влажности и типа почвы



Рисунок 49 – Схема скорости коррозии в неоднородном грунте

Неоднородность грунта по структуре, плотности, влажности и т.д. приводит к неравномерности аэрации (подвода воздуха) различных участков поверхности металлических сооружений под землей и к появлению макрокоррозионных пар значительного размера и увеличению скорости коррозии. При неравномерной аэрации участки трубы в грунте, слабо насыщенном кислородом (в глине), являются анодами по отношению к участкам, более насыщенным кислородом (в песке) и быстро разрушаются (рисунок 49).

Кислотность. Большинство почв обнаруживает реакцию близкую к нейтральной ($pH=5...8$). Повышенной агрессивностью отличаются почвы, имеющие кислую реакцию с $pH=3...4$ (вследствие присутствия угольной или органических кислот) или щелочную реакцию с $pH=10...12$ (вследствие присутствия известняка).

Электропроводность грунтов зависит от влажности, структуры и состава. Чем выше электропроводность грунта, тем выше его коррозионная активность. При удельном электросопротивлении грунта до $5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ его коррозионная ак-

тивность оценивается как особо высокая, а при удельном электросопротивлении более 100 Ом•м – как низкая.

Микроорганизмы. Продукты жизнедеятельности микроорганизмов значительно ускоряют коррозию. В особенности это касается анаэробных бактерий (живущих в бескислородной среде), вырабатывающих H_2S , углекислоту, углеводы $C_mH_{2n}O_n$ и т.д.

Защита от подземной коррозии осуществляется с помощью изолирующих полимерных покрытий, электрохимической защиты, создания искусственных атмосфер. Применяется также обработка грунта с целью его нейтрализации (кислый грунт нейтрализуют известью).

Точечная коррозия

Точечная коррозия - один из видов местной коррозии. Характерна для металлов и сплавов, на поверхности которых образуется защитная оксидная пленка (хром, алюминий, коррозионностойкие стали) и возникает в результате повреждения отдельных участков этой пленки. Состоит из двух стадий: образование язв в слабых местах защитной пленки; рост этих язв до образования сквозного отверстия или до момента прекращения процесса вследствие образования новой защитной пленки. Местом образования язвы могут быть интерметаллидные и неметаллические включения, несовершенства кристаллической решетки, микропоры в защитной пленке и т.д. После образования язвы поверхность внутри язвы становится анодом, на котором протекает реакция окисления металла рисунок 50. На пассивных участках поверхности протекает катодная реакция.

Особенность точечной коррозии заключается в том, что она протекает при больших площадях *катода* и малых площадях *анода*. Поэтому, плотность анодного тока велика и язва развивается вглубь, а не в ширину металла.

Для снижения скорости точечной коррозии необходимо увеличивать содержание в стали хрома, никеля и молибдена и снижать содержание углерода. Также понижает скорость точечной коррозии термообработка, повышающая однородность стали (отжиг). При повышении температуры возрастает скорость точечной коррозии и количество коррозионных язв на единицу поверхности металла.

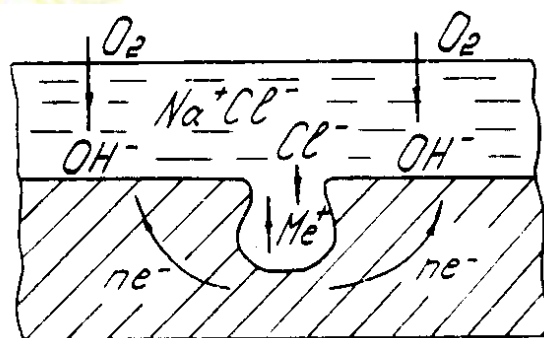


Рисунок 50 - Схема развития язвы (питтинга)

Межкристаллитная коррозия

Межкристаллитная коррозия – это разрушения границ зерен вследствие электрохимической коррозии металлов. Вызывает потерю прочности и пластичности металлов, приводит к преждевременному разрушению изделий. Является одним из наиболее опасных видов коррозии, т.к. в ряде случаев разрушение изделия происходит внезапно, без видимых изменений внешнего вида металла. Межкристаллитной коррозии подвержены хромистые и хромоникелевые *коррозионностойкие стали*, а также сплавы на основе никеля и *алюминия*.

Причиной межкристаллитной коррозии является пониженная коррозионная стойкость границ зерен вследствие их обеднения легирующими элементами и выделения по границам зерен примесей. В частности, в коррозионностойких сталях по границам зерен может образоваться карбид хрома Cr_{23}C_6 . При этом в приграничных областях зерен образуются участки с концентрацией хрома менее 12,5% и их коррозионная стойкость падает. **Предотвращение** межкристаллитной коррозии сталей достигается легированием хромом и молибденом, снижением содержания углерода, повышающим однородность стали отжигом, а также введением сильно карбидообразующих элементов, например титана.

2.7 Методы защиты металлов от коррозии

Методы защиты металлов от коррозии можно разделить на три группы.

1 Методы воздействия на коррозионную среду – удаление из среды агрессивных компонентов, введение ингибиторов (замедлителей) коррозии, герметизация изделия.

2 Методы воздействия на металл – легирование с целью создания защитного слоя на поверхности, электрохимическая защита (снижение катодной или анодной активности), предотвращение структурной коррозии, нанесение защитных покрытий.

3 Комбинированные методы, сочетающие способы защиты первых двух групп и учет конструктивных факторов, влияющих на коррозионную стойкость металлоконструкций.

Методы воздействия на коррозионную среду

Удаление агрессивных компонентов. Наиболее агрессивными компонентами коррозионной среды являются кислород и водород – главные *деполяризаторы*. Основным окислителем при коррозии большинства металлов в воде и водных растворах солей является кислород (кислородная деполяризация). Поэтому, в процесс подготовки воды для систем охлаждения, теплоснабжения, электростанций обязательно включается удаление кислорода. Кислород из воды можно удалить термически и химически. **Термический** способ удаления кислорода из воды (кипячение) основан на уменьшении его растворимости с повышением температуры. Если довести воду до кипения, то из нее выделится практически весь кислород. **Химическое** обескислороживание воды проводят после термического. Процесс основан на введении в воду веществ, необратимо связывающих O_2 , например, гидразина или сульфита натрия. Используется

также фильтрование через вещества, которые энергично окисляются, например, свежие стальные стружки или сульфит железа:

Введение ингибиторов коррозии – веществ, присутствие которых в малых количествах в агрессивной среде предотвращает или значительно снижает скорость коррозии. Ингибиторы вводятся в масла, смазки, топливо, тормозные жидкости и т.д. По условиям применения ингибиторы делят на предназначенные для растворов и на летучие вещества, тормозящие атмосферную коррозию. Ингибиторы делятся на катодные, анодные и смешанного действия. **Анодные ингибиторы** уменьшают скорость коррозии за счет образования защитных пленок (оксидных и более сложного состава) на анодных участках металла (нитраты (NaNO_3), хроматы (K_2CrO_4), фосфаты, силикат натрия). Их ингибирующее действие проявляется только в присутствии растворенного кислорода. **Катодные ингибиторы** уменьшают скорость коррозии за счет затруднения доступа деполяризатора (окислителя) к поверхности металла (бикарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, декстрины $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, уротропин $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$). **Ингибиторы смешанного действия** наиболее эффективны и уменьшают скорости как анодной так и катодной реакций ($n \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Me}_2\text{O}$ и полифосфаты $(\text{Me} \cdot \text{PO}_3)_n$, образующие на поверхности металла защитные пленки).

Защитные покрытия

Металлические защитные покрытия делятся на **катодные** (рисунок 51 а), потенциал которых в данной среде положительнее, чем потенциал защищаемого металла (для стали это никель, медь, олово и др.). Катодные покрытия защищают металл только механически, изолируя его от среды, и основное требование к ним – беспористость. **Анодные** – металлические покрытия, потенциал которых в данной среде отрицательнее, чем потенциал защищаемого металла, они защищают металл не только механически, но и электрохимически, становясь анодом и растворяясь в случае нарушения покрытия (рисунок 51 б). Защищаемый металл при этом становится катодом. Для стали анодными покрытиями являются цинк, алюминий и др. Наносят металлические покрытия гальванически, погружением в расплавленный металл, распылением расплавленного металла; плакированием – совместной горячей прокаткой листов защищающего и защищаемого металлов.

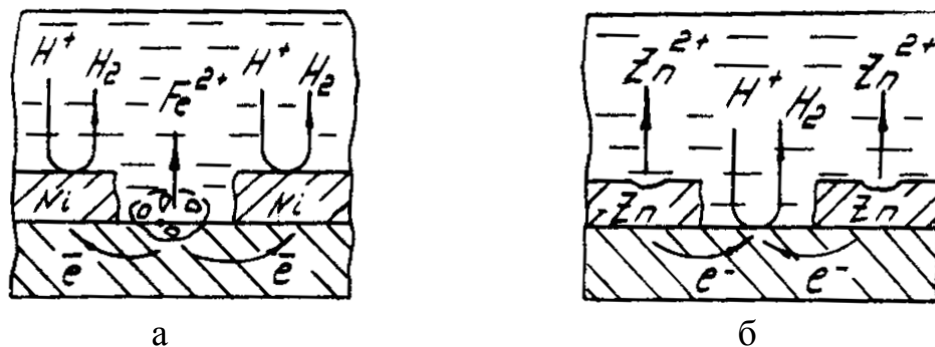


Рисунок 51 - Катодные (а) и анодные (б) покрытия

Защитные покрытия на органической основе. Лакокрасочные покрытия. Их основу составляют пленкообразователи – органические вещества, способные образовывать пленку. Лаки – покрытия, состоящие только из пленкообразователя. Краски – покрытия, содержащие кроме пленкообразователя наполнители и пигменты. Дополнительный эффект достигается, если наполнителем является металл с меньшим значением потенциала, чем у защищаемого металла. К достоинствам лакокрасочных покрытий относится простота технологии и возможность защищать изделия сложной формы; к недостаткам – пористость, недолговечность и низкая температуростойкость. Наносят лакокрасочные покрытия кистью, краскораспылителем, окунанием, поливом, электростатически. **Резиновые** (гуммировочные) покрытия. Применяют для защиты металлов, работающих в агрессивных жидкостях. Наносят либо, обкладывая изделие листами сырой резины и вулканизируя ее (сшивка полимерных молекул между собой); либо приклеивая вулканизированные резиновые листы. **Пластмассовые** покрытия – полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, фторопласты, эпоксидные и фенолформальдегидные смолы устойчивы к действию многих кислот и растворов солей. Наносятся плакированием, напылением, приклеиванием, в виде порошков с последующим сплавлением, в виде растворов.

Защитные покрытия на неорганической основе. Оксидные покрытия. Естественные оксидные пленки на поверхности металлов не всегда обладают защитным действием вследствие их рыхлости. Оксидированию подвергают углеродистые стали, сплавы алюминия и магния для защиты от атмосферной коррозии. **Фосфатные покрытия** получают обработкой стальных деталей в растворах фосфорной кислоты и ее солей. Сохраняют защитные свойства до 500°C. Фосфатную пленку обычно пропитывают маслами или покрывают лакокрасочными покрытиями. **Силикатные эмали** – стеклообразные легкоплавкие сплавы. Используют для аппаратуры, работающей при повышенных температурах, давлениях, в сильно агрессивных средах. Обладают износостойкостью и жаростойкостью, однако, хрупкие при ударах и растрескиваются при резком перепаде температур.

Электрохимическая защита

Основана на явлении поляризации – изменении электродного потенциала металла. Электрохимическую защиту подразделяют на протекторную, катодную и анодную. При **протекторной и катодной защите** происходит катодная поляризация. Протекторная основана на присоединении защищаемого изделия к металлу с более отрицательным электродным потенциалом (протектору), а катодная – на присоединении к отрицательному электроду внешнего источника постоянного тока. При этом защищаемый металл становится катодом и перестает корродировать, а разрушается в первом случае протектор (Mg, Zn), а во втором – металл, присоединенный к положительному электроду внешнего источника тока (анод). **Анодная защита** основана на анодной поляризации. При анодной защите отрицательный полюс источника питания присоединяют к дополнительному электроду – катоду, а положительный – к защищаемой конст-

рукции. При этом электродный потенциал защищаемого металла смещается в область потенциалов, в которой на его поверхности происходит образование защитной пленки. Этот вид защиты применяется только для металлов, которые способны пассивироваться в данной агрессивной среде.

Защита от коррозии на стадии проектирования

Выбор материалов должен учитывать свойства среды и основные параметры химико-технологического процесса – температуру, давление, механические нагрузки и др. Необходимо избегать **контакта металлов** с различной величиной электродного потенциала, т.к. при этом образуются пары анод-катод и скорость коррозии возрастает. Разнородные металлы нужно изолировать друг от друга. В аппаратах не должно быть **застойных зон**, в которых скапливаются коррозионно-активные жидкости. Поверхность металлов не должна иметь **острых углов**, т.к. в таких местах концентрируются внутренние механические напряжения, что увеличивает скорость коррозии. В трубопроводах желательно избегать **турбулентного** (вихревого) режима течения жидкостей. Необходимо также исключать **неравномерность нагрева** отдельных частей конструкции и местного перегрева.

Контрольная работа №2

1.1. Расшифровать марку и химический состав двух сталей (таблица 36, П.1.1)

1.2. Выбрать режим термообработки.

1.3. Описать структуру после термообработки, механические и технологические свойства, область применения.

2.1. Расшифровать марку алюминиевого сплава данного в таблице (таблица 36, П.2.1.). Привести химический состав, определить основной ЛЭ. Описать влияние легирующих элементов на свойства сплава.

2.2. Вычертить диаграмму Al – основной ЛЭ для этого сплава.

2.3. Выбрать режим термообработки.

2.4. Описать структуру после термообработки, механические и технологические свойства, область применения.

3.1. Расшифровать марку медного сплава данного в таблице (таблица 36, П.3.1.). Привести химический состав. Определить основной ЛЭ. Описать влияние легирующих элементов на свойства сплава.

3.2. Вычертить диаграмму Cu – основной ЛЭ для этого сплава.

3.3. Выбрать режим термообработки.

3.4. Описать структуру после термообработки, механические и технологические свойства, область применения.

4. Решить задачу на коррозионную стойкость. Вариант задачи в таблице 36.

Таблица 36 – Варианты заданий к контрольной работе № 2

Первая буква фамилии	Вариант	П.1.1. Стали	П.2.1. Алюминиевые сплавы	П.3.1. Медные сплавы
А	1	14ХГС 12Х13	АМц1 АЛ1	Л96 БрОЦС5-5-5
БВ	2	15Х25Т 15Х11МФ	АМг5 Д1	ЛС59-1 БрА7
ГД	3	18ХГТ 08Х18Н10Т	АК6 АЛ2	ЛАЖ60-1-1 БрКМц3-1
ЕЁ	4	12Х18Н12Т Н18К8М3Т	Д20 АЛ9	ЛМц58-2 БрБ2
ЖЗ	5	Х11Н10М2Т 15Х11МФ	АМг3 АЛ7	ЛО 62-1 БрС30
ИЛ	6	50С2 40Х13	АМц3 Д16	ЛК80-3 БрОФ6,5-0,4
К	7	60С2ВА 12ХМФ	АК8 АЛ4	ЛС60-1 БрАЖ9-4
МН	8	Н18К9М5Т 09Х14Н16Б	АЛ19 АМц2	ЛАН59-3-2 БрК3
ОП	9	12ХМФ 20ХФ	АЛ8 АЛ21	ЛМцА57-3-1 БрБ2,5
РТ	10	20Х13 20Х23Н18	АМц1 Д1	ЛО 70-1 БрС60Н2,5
С	11	18ХГТ 08Х18Н10Т	АК6 АЛ4	ЛКС80-3-3 БрОЦС4-3
УФХ	12	15Х12ВНМФ 12Х17	Д20 АМг5	ЛЖС58-1-1 БрА11Ж6Н6
ЦЧ	13	14ХГС 40Х9С2	АЛ1 АМц3	ЛА77-2 БрК1Н3
ШЩ	14	15Х25Т 09Х14Н19В2БР	АЛ9 Д18	ЛО60-1 БрБНТ1,7
ЭЮЯ	15	19Г 09Х14Н16Б	АК4-1 АМг6	Л80 БрА10Мц2

Вариант 1

Определить весовые потери и объемный показатель коррозии сплава, если процесс протекал с водородной деполяризацией и известны:

температура – 18⁰С;

валентность – 3;

давление – 757 мм рт ст;

молярная масса – 26,98 г/моль;

количество выделившегося водорода за 1,5 часа составило 69 см³

размеры изделия – диаметр 30мм, длина 65 мм

Вариант 2

Определить весовые потери сплава по силе коррозионного тока и глубинный показатель коррозии, если известны:

температура – 21⁰С;

валентность – 2;

плотность – 7,14 г/см³;

молярная масса – 65,4 г/моль;

время испытания – 2,3 часа;

размеры детали 35х30х5 мм;

сила тока в начальный момент времени – 150 мА; через 2 минуты – 100 мА; через 4 минуты – 98 мА; через 6 минут – 96 мА; через 8 минут – 94 мА; через 10 минут – 90 мА и далее она не менялась.

Вариант 3

Определить время контакта сплава с коррозионной средой, если известны:

плотность – $7,8 \text{ г/см}^3$;

температура – 25°C ;

давление – 754 мм рт ст;

валентность – 2;

молярная масса – 26,98 г/моль;

объем поглощенного кислорода – 8 см^3 ;

глубинный показатель коррозии – 0,56 мм/год;

размеры изделия – диаметр 56мм, длина 81 мм.

Вариант 4

Определить площадь изделия, подверженного коррозии, и глубинный показатель коррозии, если известны:

молярная масса – 26,98 г/моль;

плотность – $2,75 \text{ г/см}^3$;

валентность – 3;

температура – 21°C ;

давление – 758 мм рт ст;

объем выделившегося водорода – 158 см^3 ;

весовой показатель коррозии – $31,3 \text{ г/м}^2\cdot\text{ч}$;

время коррозии – 2,5 часа.

Вариант 5

Определить потери массы сплава, весовой и глубинный показатели коррозии, если известны:

температура – 22°C ;

давление – 754 мм рт ст;

валентность – 2;

плотность – $7,8 \text{ г/см}^3$;

молярная масса – 55,8 г/моль;

время контакта с коррозионной средой – 2,2 часа;

количество выделившегося водорода – 200 см^3 ;

размеры изделия 100x250x18мм.

Вариант 6

Определить время контакта сплава с коррозионной средой, если известны:

температура – 23°C ;

давление – 749 мм рт ст;

молярная масса – 26,98 г/моль;

валентность – 3;

плотность – $8,89 \text{ г/см}^3$;

глубинный показатель коррозии – 5,2 мм/год;

размеры изделия – диаметр 89мм, длина 185 мм;

количество выделившегося водорода 185 см^3 .

Вариант 7

Определить объемный показатель коррозии сплава и построить графическую зависимость K_v от времени, если известны:

температура – 21°C ;

давление – 765 мм рт ст;

размеры изделия – 541x382x75 мм;

замеры выделившегося водорода проводились каждые 10 минут и составили: 15 см^3 , 28 см^3 , 39 см^3 , 57 см^3 , 69 см^3 , 75 см^3 .

Вариант 8

Определить весовые потери сплава, весовой и глубинный показатели коррозии, если известны:

валентность -2;
плотность – $7,14 \text{ г/см}^3$;
молярная масса – $65,4 \text{ г/моль}$;
размеры изделия – $300 \times 450 \times 30 \text{ мм}$;
сила тока в начальный момент времени – 120 мА ; через 2 минуты – 98 мА ;
через 4 минуты – 94 мА ; через 6 минут – 86 мА ; через 8 минут – 84 мА ;
через 10 минут – 80 мА и далее она не менялась в течение 1,8 часов.

Вариант 9

Определить время контакта сплава с коррозионной средой, если известны:

температура – 18°C ;
давление – 758 мм рт ст ;
валентность – 2;
плотность – $8,6 \text{ г/см}^3$;
молярная масса – $63,54 \text{ г/моль}$;
объем поглощенного кислорода – 12 см^3 ;
глубинный показатель коррозии – $1,8 \text{ мм/год}$;
размеры изделия – диаметр 569 мм , длина 980 мм .

Вариант 10

Определить весовые потери сплава, объемный показатель коррозии и построить график K_v от времени, если известны:

температура – 20°C ;
давление 762 мм рт ст ;
валентность – 3;
молярная масса – $26,98 \text{ г/моль}$;
размеры изделия – $250 \times 250 \times 50$;
замеры поглощенного кислорода проводились каждые 10 минут и составили: $0,5 \text{ см}^3$, $1,8 \text{ см}^3$, $2,9 \text{ см}^3$, $5,7 \text{ см}^3$, $6,9 \text{ см}^3$, $7,5 \text{ см}^3$.

Вариант 11

Определить весовые потери сплава по силе коррозионного тока, если известны:

валентность – 2;
молярная масса – $55,84 \text{ г/моль}$;
время испытания – $1,8 \text{ часа}$;
сила тока в начальный момент времени – 150 мА ; через 2 минуты – 108 мА ;
через 4 минуты – 104 мА через 6 минут – 100 мА ; через 8 минут – 98 мА ;
через 10 минут – 96 мА и далее она не менялась.

Вариант 12

Определить время контакта сплава с коррозионной средой, если известны:

плотность – $7,8 \text{ г/см}^3$;
давление – 754 мм рт ст ;
температура – 19°C ;
валентность – 2;
молярная масса – $55,84 \text{ г/моль}$;
глубинный показатель коррозии – $18,7 \text{ мм/год}$;

размеры изделия – диаметр 105 мм, длина 780 мм;
объем выделившегося водорода – 138 см^3 .

Вариант 13

Определить площадь корродирующего сплава и глубинный показатель коррозии, если известны:

температура – 22°C ;
давление – 758 мм рт ст;
валентность – 3;
молярная масса – 26,98 г/моль;
плотность – $2,75 \text{ г/см}^3$;
весовой показатель коррозии – $45,8 \text{ г/м}^2\cdot\text{ч}$;
время испытания – 1,8 часа;
объем поглощенного кислорода – 25 см^3 .

Вариант 14

Определить время контакта сплава с коррозионной средой, если известны:

валентность – 3;
плотность – $2,7 \text{ г/см}^3$;
температура – 21°C ;
давление – 760 мм рт ст;
молярная масса – 63,55 г/моль;
глубинный показатель коррозии – 30 мм/год;
объем поглощенного кислорода – 540 см^3 ;
размеры изделия – 250х180х30мм.

Вариант 15

Определить весовые потери сплава по силе коррозионного тока и скорость коррозии K_B , если известны:

молярная масса – 65,38 г/моль;
валентность – 2;
плотность – $7,14 \text{ г/см}^3$;
размеры 600х350х120 мм;
время испытания – 1,5 часа;
сила тока в начальный момент времени – 170 мА; через 2 минуты – 128 мА;
через 4 минуты – 108 мА; через 6 минут – 100 мА; через 8 минут – 98 мА;
через 10 минут – 96 мА и далее она не менялась.

Пример выполнения контрольной работы №2

1.1. Расшифровать марку стали (таблица 36 п.1)

Дано: 60С2ХФА

Содержание углерода ~ 0,6%.

Легирующие элементы: кремний ~ 2%, хром < 1,5%, ванадий < 1,5%.

По содержанию углерода сталь - среднеуглеродистая;

по содержанию ЛЭ – среднелегированная;

по качеству – высокого качества;

по структуре после нормализации – перлитного класса.

по назначению – конструкционная (пружинная).

1.2. Выбрать режим термообработки.

Для повышения прочности сталь подвергают закалке, а затем для некоторого снижения твердости и улучшения упругих свойств - среднетемпературному отпуску. Т.к. сталь легированная, температуру отпуска необходимо повысить.

1.3. Описать структуру после термообработки, механические и технологические свойства, область применения.

После закалки образуется мартенситная структура по всему объему изделия. При отпуске мартенсит частично распадается на феррито-цементитную смесь – троостит. Сталь используют для изготовления пружин и рессор. Она обладает высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, высоким пределом выносливости при достаточной пластичности, ударной вязкости и сопротивлении хрупкому разрушению, хорошей закаливаемостью и прокаливаемостью, хорошими технологическими свойствами.

3.1. Расшифровать марку сплава данного в таблице: Дано: Л80.

Задания 2 и 3 выполняются однотипно.

Л – латунь; 80 – примерное содержание меди в %; остальное (20%) – цинк.

Простая латунь, деформируемая.

В сплавах, содержащих менее 30% цинка, увеличение его концентрации повышает и прочность, и пластичность. Цинк снижает стоимость латуни.

3.2. Вычертить диаграмму Cu-ЛЭ для этого сплава.

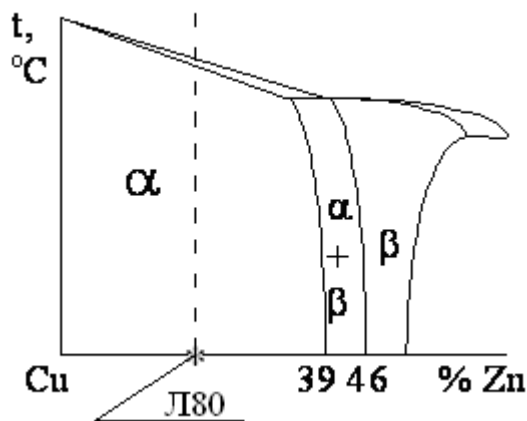


Рисунок 52 – Фрагмент диаграммы состояния Cu-Zn

3.3. Выбрать режим термообработки.

Упрочняющей термообработки не применяют. Прочность латуни может быть повышена холодной пластической деформацией. Для снятия напряжений или получения мелкого зерна применяют отжиг.

3.4. Описать структуру после термообработки, механические и технологические свойства, область применения.

По структуре Л80 – α -твердый раствор цинка в меди (α -латунь). Прочность в пределах 300-350 МПа, высокая пластичность, электро- и теплопроводность, не имеет склонности к коррозионному растрескиванию и достаточно устойчива в атмосфере воды и пара.

4. Определить весовые потери сплава по силе коррозионного тока, если известны:

валентность -2;

молярная масса – 55,84;

сила тока в момент погружения 98 мА; через 10 минут – 50 мА; через 20 минут – 45 мА и далее в течение часа она не менялась.

Весовые потери находим по формуле 25:

$$\Delta m = \frac{M \cdot 60}{F \cdot n \cdot 1000} \cdot \int_0^{\tau} I(\tau) d\tau.$$

В этой формуле величина $\int_0^{\tau} I(\tau) d\tau$ представляет собой интеграл зависимости коррозионного тока от времени. Для того чтобы найти этот интеграл построим графически зависимость тока от времени в соответствии с данными задачи – рисунок 53. Тогда значение интеграла равно площади под кривой (на рисунке 46 эта площадь затемнена), ее легко найти разбив площадь на 3 участка (2 трапеции и прямоугольник) и сложив их площади. Получаем, что площадь под кривой составляет 3915 мА·мин.

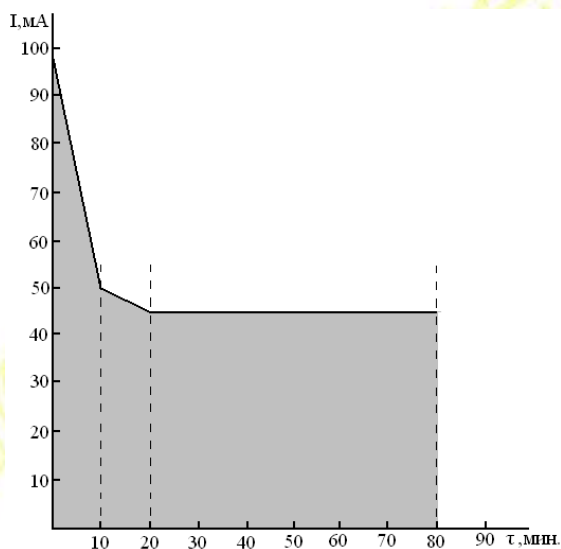


Рисунок 53 – Зависимость силы коррозионного тока от времени

$$\Delta m = \frac{M \cdot 60}{F \cdot n \cdot 1000} \cdot 3915 = \frac{55,84 \cdot 60}{96500 \cdot 2 \cdot 1000} 3915 = 0,07 \text{ , [г]}$$

Ответ: $\Delta m = 0,07$ г.

Заочное отделение

Заочное отделение

3 ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предметом изучения курса «Технология конструкционных материалов» являются современные технологические методы формообразования заготовок и деталей: литьем, обработкой давлением, сваркой, пайкой и обработкой резанием.

3.1 ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Литейное производство – это отрасль машиностроения, занимающаяся изготовлением фасонных деталей и заготовок путём заливки расплавленного металла в форму, полость которой имеет конфигурацию детали. После затвердевания металла получается отливка (деталь или заготовка), которую, при необходимости, подвергают последующей механической обработке. Отливка по форме и размерам должна быть максимально приближена к форме и размерам готового изделия.

В машинах и промышленном оборудовании около 50% деталей изготавливают литьём. Для этого используются литейные сплавы, которые должны обладать высокими литейными, механическими и другими (антикоррозионными, антифрикционными, декоративными и т.д.) свойствами. В качестве литейных сплавов в основном используются: серые чугуны (литейный, ковкий, высокопрочный), углеродистые и легированные стали, латуни, бронзы, алюминиевые и магниевые сплавы. В зависимости от условий, в которых отливается деталь, будет эксплуатироваться, выбирают тот или иной литейный сплав.

3.1.1 Классификация методов литья

В настоящее время существует довольно много различных методов литья, отличающихся как технологией, так и параметрами получаемых отливок. Каждый метод литья может быть охарактеризован следующими критериями:

1. По кратности использования литейной формы различают одноразовые формы – разрушаются при извлечении отливки; полупостоянные формы – используются для изготовления нескольких десятков отливок; многоразовые формы – используются для получения сотен, тысяч и десятков тысяч отливок.

2. Максимальная масса отливки.

3. Минимальная толщина стенки отливки.

4. Шероховатость поверхности отливки.

5. Характер производства, в котором используется данный метод литья – единичное, серийное, средне- и крупносерийное, массовое производство.

3.1.2 Литьё в одноразовые формы

К методам литья в одноразовые формы относятся следующие: литьё в песчаные формы, литьё в оболочковые формы, литьё по выплавляемым моделям.

Литьё в песчаные формы. Технология литья в песчаные формы.

С помощью литья в песчаные формы получают до 75 % всех отливок. Этим методом можно получить изделия массой более 100 тонн, с минимальной толщиной стенок 3 – 5 мм, с шероховатостью поверхности $Ra = 20-80$ мкм в единичном, серийном и среднесерийном производстве.

Отливки получают в **литейной форме**, полость которой соответствует конфигурации отливки. При литье в **песчаные формы** их изготавливают из **формовочной смеси**, состоящей из **формовочных материалов**. Формовочную смесь засыпают в **литейные опоки** и выполняют в них отпечаток **модели**. (**Литейная опока** – приспособление для удержания формовочной смеси при изготовлении литейной формы, её транспортировке и заливке жидким расплавом). **Модель** имеет конфигурацию **внешней поверхности** отливки, обычно её изготавливают из дерева, металла, пластмассы. **Внутренняя поверхность** отливки (отверстия, полости и т.п.) образуется при помощи литейного **стержня**, который устанавливают в форму. Литейные стержни изготавливают из **стержневой смеси** в **стержневых ящиках**. Стержневые ящики изготавливают из тех же материалов, что и модели. Между полостью формы и стержнем образуется пространство, заполняемое жидким металлом. После его затвердевания образуется отливка.

Чертёж отливки.

Разработка технологического процесса литья в песчаные формы начинается с **разработки чертежа отливки**. Исходным документом для разработки чертежа отливки является **чертёж детали**. Чертёж отливки будет отличаться от чертежа детали следующими параметрами:

1. Припуск на механическую обработку – это **дополнительный слой металла (на сторону)**, который будет удалён в процессе последующей механической обработки отливки, с целью обеспечения **необходимой точности и чистоты (шероховатости) поверхности**. Величина припуска на механическую обработку регламентируется ГОСТами и зависит от материала отливки, от её размеров и от расположения отливки в форме. Чем больше усадка и размеры изделия, тем больше припуск. Так как качество отливки в нижней части формы выше, чем в верхней, поскольку в верхней части скапливаются многие литейные дефекты (шлаковые включения, газовые пузыри и т. д.), поэтому припуск для верхней части отливки будет больше, чем для нижней и боковых частей.

2. Технологический припуск – **служит для упрощения и облегчения процесса изготовления отливки**. К технологическим припускам относятся:

а) **литейные уклоны** – все наружные вертикальные поверхности отливки изготавливаются с уклоном в несколько градусов (в зависимости от высоты модели и в соответствии с ГОСТами) для удобства извлечения модели из формы без её разрушения. Уклоны выполняются в направлении извлечения модели из формы.

б) **напуски** – служат для упрощения изготовления отливки. Небольшие отверстия в отливке можно не делать, так как их целесообразнее просверлить в

процессе механической обработки. Так же поступают с различными мелкими канавками, уступами, выточками и т.п.

в) **приливы** – предусматривают для удобства крепления отливки в приспособления при механической обработке, для захвата изделия при транспортировке. Их удаляют при механической обработке.

г) **галтели** – закругления внутреннего угла отливки для получения плавного перехода в сопрягаемых стенках. Галтели препятствуют осыпанию формовочной смеси в углах модели при её извлечении из формы и позволяют избежать концентрации напряжений в углах отливки при её затвердевании и охлаждении.

Модельный комплект

Модельный комплект – это комплект **формовочных приспособлений, необходимых для изготовления литейной формы.** Он включает, кроме литейной модели (см. выше), **стержневой ящик, модель литниковой системы, подмодельную плиту, формовочные, контрольные и сборочные шаблоны для конкретной отливки.**

Стержневой ящик – приспособление, имеющее рабочую полость для получения в ней стержня нужных размеров и очертаний из стержневой смеси. Он изготавливается из дерева или металла, он может быть разъемным и неразъемным, а также иметь отъемные части – вкладыши.

Литниковая система – система каналов и элементов литейной формы для подвода в её полость расплавленного металла. Она обеспечивает заполнение и питание отливки при затвердевании, а также служит для улавливания шлака, попадающего вместе с металлом в литниковую чашу. В зависимости от формы и толщины стенок и от заливаемого металла питатели могут подводиться к отливке сверху, снизу или сбоку.

Подмодельная плита – плита, на которой осуществляется изготовление песчаной литейной формы.

Формовочные и стержневые смеси

Из формовочных смесей изготавливают песчаные формы, а из стержневых – стержни. В состав формовочных и стержневых смесей входят: кварцевый песок, глина, вода, связующие материалы и специальные добавки (синтетические и естественные смолы). Эти смеси должны отвечать определенным требованиям:

- **огнеупорность** – способность формовочной смеси не оплавляться, не размягчаться или спекаться под действием высокой температуры металла, заливаемого в форму;

- **газопроницаемость** – способность формы и стержней пропускать газы благодаря своей пористости. Газы выделяются из формовочной и стержневой смеси при заливке расплава в форму. При низкой газопроницаемости возникает **брак по газовым раковинам.** Чем крупнее форма, тем больше должна быть газопроницаемость;

- **пластичность** – обеспечивает получение в форме хорошего отпечатка модели;

- **прочность** – способность смеси и формы выдерживать внешние нагрузки. Форма не должна деформироваться и разрушаться при изготовлении, транспортировке и заливке расплава;

- **противопригарность** – способность смеси и формы не спекаться и не сплавляться с расплавленным металлом.

Формовочные и стержневые смеси изготавливают по определённому рецепту. Как правило, смеси используются многократно – **оборотные смеси**, а к ним добавляют свежие порции.

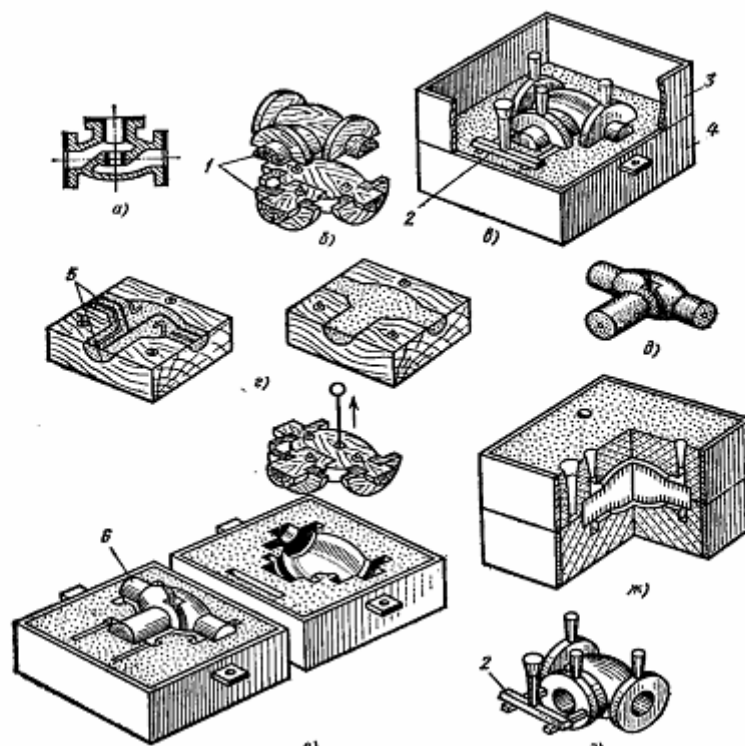
Различие между формовочной и стержневой смесью обусловлено тем, что стержень работает в более жёстких условиях, так как он со всех сторон окружён расплавленным металлом. В связи с этим, стержень должен обладать большей прочностью, газопроницаемостью и противопригарностью. Этому добиваются, вводя специальные добавки.

Изготовление литейной формы

Форму изготавливают в следующей последовательности (рисунок 54): на подмодельную плиту устанавливают полуопоку и нижнюю полумоделю (в случае разъёмной модели), затем засыпают формовочную смесь в опоку и уплотняют её. Полуопоку с утрамбованной формовочной смесью переворачивают на 180° и на нижнюю половину модели устанавливают верхнюю половину модели и модель литниковой системы. Затем поверхность разъёма нижней полуформы посыпают тонким слоем разделительного песка, для того, чтобы после утрамбовки можно было бы разделить полуформы без их разрушения. Затем устанавливают вторую полуопоку. После чего насыпают формовочную смесь и опять утрамбовывают. Далее, из уплотнённой формовочной смеси удаляют модель стояка с литниковой чашей и модель выпора. Потом полуопоки разъединяют, извлекают полумодели, исправляют дефекты, если они возникли, и устанавливают стержни. На нижнюю полуформу устанавливают верхнюю, их скрепляют между собой. Собранная форма подвергается сушке. Затем в неё заливают расплавленный металл.

Жидкий металл поступает в песчаную форму по литниковой системе, которая обеспечивает его непрерывную подачу, питает отливку в момент её затвердевания и усадки и задерживает проникновение шлака в форму. При необходимости в форме для отвода газов предусматриваются дополнительные каналы – выпоры.

После затвердевания сплава и его охлаждения отливку из формы удаляют (выбивают), а форму разрушают. Затем выбивают стержни, обычно это делают на вибрационных установках или струёй воды под высоким давлением ($250 - 1000 \text{ кН/м}^2$).



а – чертёж отливки; б – деревянная модель; в – модель отливки, заформованная в нижнюю полуопку (установлена модель литниковой системы);
 г – разъёмный стержневой ящик; д – изготовленный стержень;
 е – две полуформы с извлечёнными полумоделями и установленным стержнем;
 ж – собранная форма; з – отливка

Рисунок 54 – Последовательность изготовления отливки.

Литниковую систему отбивают (чугун), отпиливают или удаляют газовой резкой (сталь, цветные сплавы). Затем идёт стадия **очистки отливок** от пригоревшей формовочной смеси и заусенцев.

Последней операцией перед выходным контролем является термообработка готовых изделий. Она обычно необходима, так как отливки часто имеют крупнозернистое строение, ликвационные зоны, неоднородное распределение легирующих элементов и неметаллических включений, что снижает механические свойства. (Виды термообработки рассматривались выше в разделе «Материаловедение»).

Литьё в оболочковых формах

Литьё в оболочковых формах – процесс получения отливок путём свободной заливки расплава в оболочковые формы из термореактивных смесей.

Оболочковая форма – одноразовая тонкостенная химически твердеющая литейная форма, которую изготавливают из смеси кварцевого песка и порошка фенолформальдегидной смолы (6 – 7%). Эта смола термореактивная – она размягчается при 70 °С, а выше 120 °С плавится. С этого момента начинается про-

цесс полимеризации, который идёт тем быстрее, чем выше температура. При этом смола необратимо твердеет, а при температуре более 450°C – начинает выгорать.

Изготовление оболочковой формы осуществляется следующим образом. Сначала формовочную смесь засыпают в бункер, который накрывают подогретой металлической модельной плитой. На ней закреплены металлические полумодели. Далее бункер переворачивают на 180°, формовочная смесь засыпает нагретую модельную плиту с полумоделями. Смола начинает плавиться и вместе с кварцевым песком обволакивает нагретые полумодели. За 30 секунд образуется оболочка толщиной 6 – 8 мм. Затем бункер возвращается в исходное положение, избыток смеси осыпается вниз. Модельную плиту с полуформами и оболочками снимают с бункера и помещают в печь для полимелизации смолы и полного затвердевания оболочки (4 – 5 мин), плиту вынимают из печи с помощью специальных приспособлений снимают оболочки. Затем две половины оболочки склеивают и соединяют скобами – получается готовая литейная форма; форму заливают расплавом и после его затвердевания разрушают, извлекая отливку.

К достоинствам метода относится высокая точность размеров и высокое качество поверхности отливки. К недостаткам – ограниченность массы отливки. Этим методом можно получить отливки массой не более 100 кг.

Литьё по выплавляемым моделям

Это один из старейших методов литья, с его помощью в древности изготавливали скульптуры, колокола и другие изделия сложной формы. В машиностроении он начал применяться с 40-х годов 20-го века.

Процесс изготовления формы для этого метода литья состоит в следующем:

- изготавливают металлическую или пластмассовую разъёмную пресс-форму, с помощью пресс-формы из предварительно расплавленного легкоплавкого материала (обычно смеси 50% стеарина и 50% парафина) отливают несколько моделей;

- легкоплавкие модели собирают в блоки с общей литниковой системой; затем их погружают в огнеупорную суспензию, состоящую из 30% жидкого связующего и 70% кварцевой муки. Вынув блок из суспензии, его посыпают сухим кварцевым песком и сушат на воздухе. Эту операцию повторяют несколько раз, пока не получат форму со стенкой толщиной 6 – 8 мм, далее модель выплавляют из формы горячим воздухом, паром или горячей водой (100 – 150°C);

- готовую форму прокаливают при температуре 850 – 900°C. При этом выгорают остатки легкоплавкого состава и она приобретает прочность. В готовую форму заливают расплав, после затвердевания которого её разбивают и извлекают отливку. Отливка может иметь очень сложную форму с большим количеством мелких деталей, канавок, отверстий и т.д., в которых могут остаться элементы огнеупорной корки. Их удаляют выщелачиванием при 120°C с последующей промывкой в горячей воде.

Этот метод литья очень трудоёмок и дорог, но с его помощью можно получать отливки очень сложной формы, с высокой точностью и низкой шероховатостью поверхности, что исключает последующую механическую обработку. В настоящее время начинают внедряться новые методы литья, такие как литьё по выжигаемым моделям, литьё по растворяемым моделям, литьё по размораживаемым моделям, литьё по газифицируемым моделям. Наиболее перспективен последний метод. Модель изготавливается из пенопласта (пенополистирола), который легко обрабатывается вручную и на станках. (В крупносерийном производстве модели можно получать методом вспенивания в металлических и пластмассовых формах). Обычно форма делается неразъёмной, модель из неё не извлекается, а газифицируется за счёт тепла расплавленного металла (пенополистирол разлагается при 300 – 350°С). Этот метод используется для получения отливок из различных сплавов массой от 0,2 кг до нескольких тонн.

Полупостоянные формы изготавливаются из шамота, металлокерамики, графита. Их можно использовать для получения нескольких десятков или сотен отливок. Этот метод занимает промежуточное положение между литьём в одноразовые и многоразовые (металлические) формы и подробно рассматриваться не будет.

3.1.3 Литьё в металлические формы

Литьё в металлические формы включает в себя следующие методы:

- 1 Литьё в кокиль.
- 2 Литьё под давлением.
- 3 Центробежное литьё.

Различные методы литья в металлические (многоразовые) формы имеют свои специфические особенности, однако тот факт, что во всех случаях форма изготавливается из металла, придаёт этим методам некоторые общие черты:

- 1 Формы газонепроницаемы;
- 2 Формы не податливы (не меняют своих размеров под давлением затвердевающего металла);

3 Высокая теплопроводность формы приводит к высокой скорости охлаждения и затвердевания металла, что имеет свои положительные и отрицательные стороны:

а) При быстром охлаждении возникает большое количество центров кристаллизации и отливка приобретает мелкозернистую структуру с повышенной плотностью и прочностью.

б) Поверхность отливки, охлаждаясь с большой скоростью, подвергается закалке (у чугуновых отливок появляется поверхностный слой белого чугуна – отбельная корка). Это явление может быть использовано, когда изделие или его часть должно обладать твёрдой, износостойкой поверхностью. Если в этом нет необходимости или требуется последующая механическая обработка, то ей должна предшествовать термообработка (отпуск, отжиг, нормализация).

в) Высокая скорость охлаждения приводит к возникновению больших внутренних напряжений, поэтому в отливке не должно быть острых углов, рез-

ких переходов от толстых стенок к тонким, радиусы галтелей увеличиваются в 1,5 раза по сравнению с литьём в песчаные формы.

г) При интенсивном охлаждении расплав быстро теряет жидкотекучесть, в связи с этим увеличивается минимальная толщина стенок отливки.

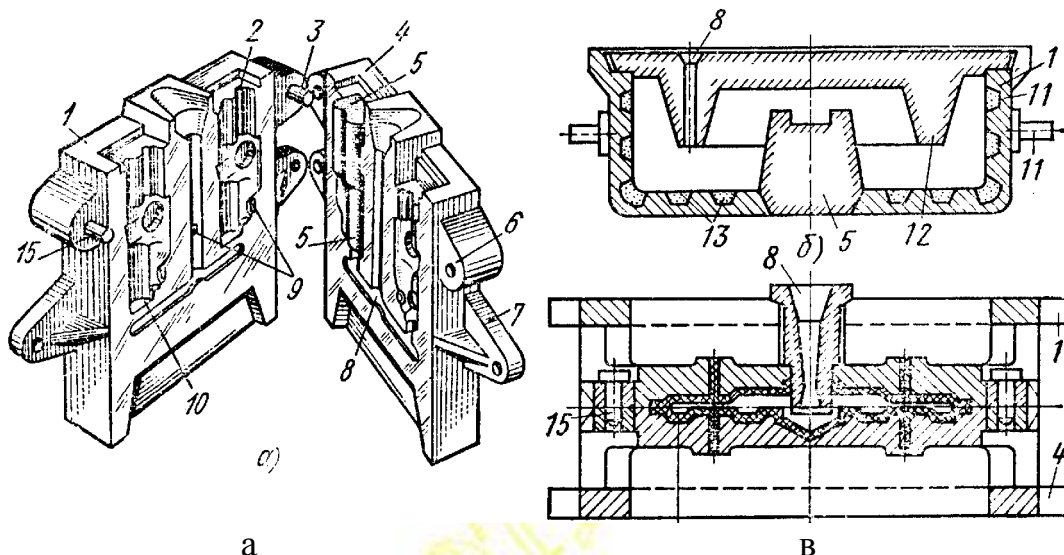
4 Металлические формы позволяют получать отливки с высокой точностью и высокой чистотой поверхности в серийном, крупносерийном и массовом производстве. Исключается применение формовочной смеси, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда.

5 Металлические формы отличаются высокой стоимостью.

6 Процесс литья легко механизуется и автоматизируется.

Литьё в кокиль

Литьё в кокиль – процесс получения отливок путём свободной заливки расплавленного металла в металлические **формы – кокили**, (рисунок 55). **Кокиль** – металлическая форма, которая заполняется жидким расплавом под действием сил тяжести. В кокилях получают 45% отливок из алюминиевых и магниевых сплавов, 5% стальных и 10% чугуновых отливок.



а – кокиль с вертикальной линией разъёма; б – неразъёмный кокиль; в – кокиль с горизонтальной линией разъёма

1,4 – две половины кокиля; 2 – выпор; 3, 6, 15 – центрирующие штыри и втулки; 5 – стержень; 7 – приливы для крепления кокиля к станку; 8 – литник; 9 – отверстия для толкателей, выталкивающих отливку из кокиля; 10 – рабочая полость кокиля; 11 – цапфы для переворота кокиля; 12 – песчаные стержни; 13 – формовочная смесь (футерованный кокиль); 14 – стержневая смесь – облицованный кокиль

Рисунок 55 - Конструкции кокилей

Кокили могут быть неразъёмными (вытряхными) (рисунок 55, б). Внутренняя часть отливки образуется песчаным стержнем, стержнем же перекрывается и верхняя часть. Металл заливается через литниковую систему и после затвердевания, с помощью цапф, кокиль переворачивается и отливка выталкивается.

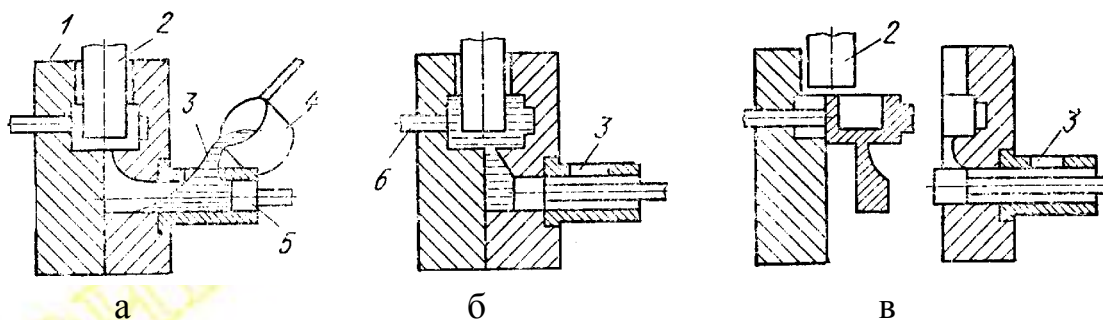
Чаще кокили изготавливаются из двух половин, его рабочая полость соответствует внешней конфигурации отливки. Внутренние полости образуются с помощью песчаных или металлических (цельных или разъёмных) стержней. Конструкция разъёмного кокиля также предусматривает наличие литниковой системы. После затвердевания сплава кокиль раскрывается и из него выталкивается готовая отливка. В зависимости от конфигурации отливки, кокиль может иметь одну или несколько плоскостей разъёма. Они могут быть вертикальными (рисунок 55, а), горизонтальными (рисунок 55, в) или комбинированными. Для удаления газов из газонепроницаемой формы – кокиля предусмотрен выпор, а также газовые каналы ($d = 0,2 - 0,5$ мм) по линии его разъёма.

Литьё под давлением

Литьё под давлением – это процесс получения отливок в металлических формах, при которых их заполнение сплавом и формирование отливок осуществляется под давлением. При литье под давлением пресс-форма выполняется из стали. Это сложное приспособление, состоящее из 30 – 100 деталей. Её рабочая часть выполняется из вкладышей. Для формирования внутренних полостей отливки применяются неразъёмные металлические стержни. На рисунке 56 приведён пример получения отливок на машине с горизонтальной камерой сжатия.

Процесс литья осуществляется следующим образом:

1. Металл заливается в заливочное окно камеры сжатия.
2. Под давлением поршня сплав заполняет пресс-форму и затвердевает.
3. Извлекается металлический стержень и открывается пресс-форма.
4. Отливка удаляется выталкивателем, затем процесс повторяется.



а – заливка металла в заливочное окно; б – заполнение пресс-формы под давлением; в – удаление отливки.

1 – пресс-форма; 2 – металлический стержень; 3 – заливочное окно;
4 – расплав; 5 – поршень; 6 – выталкиватель

Рисунок 56 - Процесс литья под давлением

Производительность достигает 200 – 400 циклов в час. При литье под давление струя жидкого металла с большой скоростью заполняет рабочую полость

и газы, находившиеся в ней, не успевают удалиться. Это приводит к образованию в толстостенных отливках газовой пористости. Метод литья под давлением обеспечивает высокую точность и чистоту поверхности, что освобождает от последующей механической обработки. Он высокопроизводителен и легко автоматизируется. Стальные пресс-формы обладают высокой стойкостью. К недостаткам метода можно отнести чрезвычайно высокую стоимость пресс-форм, поэтому метод экономичен только в крупносерийном и массовом производстве. Для отливок характерна газовая пористость.

Центробежное литьё

Центробежное литьё – способ, при котором отливки получают свободной заливкой во вращающиеся формы. Отливка формируется под действием центробежных сил, которые отбрасывают заливаемый металл к стенкам формы, где он затвердевает, образуя пустотелое изделие. Формы приводят во вращение центробежные машины. Они могут иметь горизонтальную и вертикальную ось вращения. На машинах с горизонтальной осью вращения получают отливки со стенками равномерной толщины по длине и в поперечном сечении. При вертикальной оси вращения формы отливки имеют параболическую внутреннюю поверхность, и толщина верхней части отливки меньше, чем нижней.

Короткие трубы получают следующим образом (рисунок 57): жидкий металл ковшом через жёлоб заливают во вращающуюся форму. Центробежными силами он отбрасывается к её стенкам и затвердевает, после чего цилиндрическую отливку извлекают из формы.

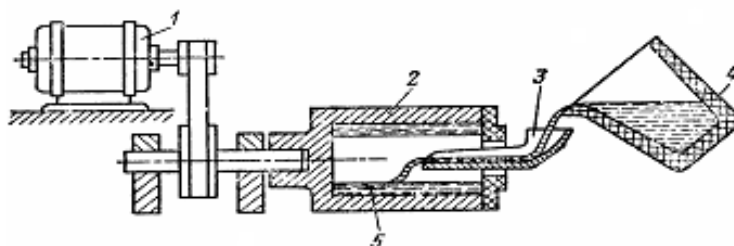
При производстве длинных труб на труболитейных машинах используется подвижный жёлоб, который в процессе литья перемещается вдоль оси формы, которая имеет уклон в 5° . При этом металл навивается на её внутреннюю поверхность. Для образования раструба трубы используется песчаный стержень. Машины с горизонтальной осью вращения используются также для получения фасонных отливок. Машины с вертикальной осью вращения используются для получения коротких трубных заготовок и фасонных изделий.

Центробежное литьё имеет свои особенности, достоинства и недостатки:

- 1 Исключается применение стержней для изготовления полости в отливке.
- 2 Отливки отличаются большой плотностью и высокими механическими свойствами.
- 3 Обеспечивается высокая точность **наружных** размеров и высокая чистота поверхности.
- 4 Этим методом можно получать тонкостенные изделия из сплавов с низкой жидкотекучестью.
- 5 Процесс автоматизируется.

К недостаткам метода можно отнести следующее:

- 1 Этим методом можно получать в основном только тела вращения.
- 2 Низкое качество отливок из сплавов, склонных к ликвации.
- 3 Внутренние размеры отливки зависят от количества залитого металла, в связи с этим трудно обеспечить их точность.



1 – электродвигатель; 2 – форма; 3 – заливочный желоб; 4 – ковш; 5 – отливка

Рисунок 57 – Центробежная машина с горизонтальной осью вращения для литья коротких труб

3.3 СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Сварка – технологический процесс получения неразъёмных соединений различных материалов (однородных и разнородных металлов и сплавов, металлов и неметаллов, пластмасс) за счет образования прочных связей между атомами или молекулами на поверхности соединяемых заготовок. Для получения сварного соединения необходимо **сблизить** соединяемые поверхности на расстояние, на котором начинают действовать силы межатомного сцепления, и **создать условия**, необходимые для возникновения межатомных и межмолекулярных связей – **температуру, время контакта, качество поверхности**. Для этого требуется введение энергии для активации поверхностных атомных слоёв. Энергия сообщается в виде **теплоты, упругопластической деформации, электронного, ионного, лазерного и других видов облучения**.

3.2.1 Классификация методов сварки

Для сближения поверхностей соединяемых заготовок и создания условий для образования соединения существующие способы сварки предусматривают **тепловое, механическое или их совместное воздействие** в зоне соединения.

Способы сварки классифицируются или по **методу объединения поверхностей** соединяемых заготовок (сварка плавлением, сварка давлением), или по **виду применяемой энергии** (электрическая, химическая, механическая).

3.2.2 Сварка плавлением

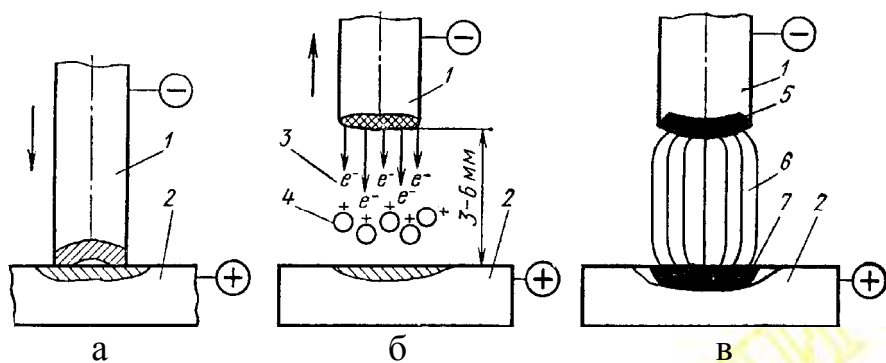
При **сварке плавлением** происходит расплавление кромок свариваемых материала, а в случае необходимости и присадочного материала для дополнительного заполнения зазора между ними. Энергии достаточно для самопроизвольного объединения расплавленных частей заготовок. Образуется общая **сварочная ванна**, а после её затвердевания – соединение – **сварочный шов**.

Электродуговая сварка

При электродуговой сварке источником энергии является электрическая дуга, обычно один из электродов – свариваемые металлы.

Электрическая дуга – мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается в процессе её горения.

Зажигание дуги начинается с короткого замыкания электрода на заготовку, при этом происходит разогрев торца электрода. Затем электрод отводят на 3-6 мм. Под действием электрического поля с катода начинается эмиссия электронов, возникает устойчивый дуговой разряд (столкновение быстролетающих от катода к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации, дуговой промежуток становится электропроводящим) – рисунок 58. При сварке неплавящимся электродом дуга зажигается с помощью высокочастотного электрического разряда.



а) короткое замыкание электродов; б) эмиссия электронов с поверхности катода; в) устойчивое горение дуги

1 – электрод; 2 – свариваемый металл; 3 – электроны; 4 – ионы газа и металла; 5 – катодное пятно; 6 – столб дуги; 7 – анодное пятно

Рисунок 58 – Схема процесса зажигания дуги

Дуга – концентрированный источник тепла, столб дуги имеет температуру 6000-7000°С, катодное пятно имеет температуру 2400°С, анодное пятно – 2600°С. Источником питания при сварке на переменном токе являются **сварочные** (понижающие) **трансформаторы** с напряжением холостого хода $U = 60-80\text{В}$. Они применяются чаще, так как проще в эксплуатации, долговечнее, имеют более высокий КПД. При сварке на постоянном токе используют **сварочные генераторы постоянного тока и выпрямители**.

Ручная электродуговая сварка

Ручная электродуговая сварка осуществляется **сварочными электродами**, которые подаются в дугу и перемещаются вдоль заготовки вручную сварщиком. Для удержания электрода и подвода к нему тока сварщик использует **электродержатель**. Для защиты от светового и ультрафиолетового излу-

чения используется **защитный щиток** или **маска** с тёмным стеклом, а тело и руки защищены брезентовой спецодеждой. Рабочее место сварщика специальная сварочная кабина.

Рассмотрим схему процесса сварки **металлическим покрытым электродом**. Дуга горит между **стержнем электрода** и **основным металлом**. Стержень электрода плавится, и жидкий металл по каплям стекает в **металлическую ванну**. Одновременно плавится и покрытие электрода, образуя **газовую защитную атмосферу** вокруг дуги и **жидкую шлаковую ванну** на поверхности жидкого металла. Металлическая и шлаковая ванны вместе образуют **сварочную ванну**. Жидкий шлак, остыв, образует на поверхности шва **защитную шлаковую корку**.

В сварочной ванне протекает ряд процессов: испарение и окисление (выгорание) ряда легирующих элементов (углерода, кремния, марганца, хрома), сварной шов насыщается кислородом, водородом, азотом, что снижает его механические свойства. Для предотвращения этих процессов применяют обмазку электродов.

Обмазка выполняет следующие функции:

- 1 Создание защитной атмосферы вокруг зоны сварки.
- 2 Образование ионов, стабилизирующих процесс горения дуги.
- 3 Раскисление (восстановление образовавшихся оксидов) материала шва.
- 4 Легирование сварочного шва.
- 5 Защита жидкой металлической ванны расплавленными шлаками от окисления.

Сварочный электрод – проволочный стержень из сварочной проволоки с покрытием (обмазкой). Диаметр проволоки 0,3 - 12 мм. Все марки сварочной проволоки в зависимости от состава делятся на: **углеродистую, легированную и высоколегированную**. Маркировка та же, что и у сталей с добавлением букв «Св–».

Ручной электродуговой сваркой сваривают заготовки толщиной 2 - 30 мм. Она удобна для выполнения коротких и криволинейных швов в любых пространственных положениях (нижнем, вертикальном, горизонтальном, потолочном), для наложения швов в труднодоступных местах, при монтажных работах, при сборке сложных конструкций. Этот вид сварки даёт хорошее качество сварного шва (при условии высокой квалификации сварщика), но он менее производителен по сравнению с автоматической сваркой под слоем флюса. Сварочный ток нельзя поднимать выше некоторого предела из-за разогрева электрода и отслаивания покрытия, разбрызгивания металла и его большого угара.

Автоматическая дуговая сварка под слоем флюса

При этом способе (рисунок 59а) сварку осуществляют **непокрытой электродной проволокой**, а дугу и **сварочную ванну защищают флюсом**. Подача флюса, подача и перемещение электродной проволоки, зажигание дуги, и заварка кратера в конце шва осуществляется автоматически. Дуга горит между электродной проволокой и основным металлом. Столб дуги и металлическая

ванна закрыты слоем флюса толщиной 30-50 мм. Часть флюса расплавляется, образуя на поверхности расплавленного металла ванну жидкого шлака. Сварочные токи велики, до 2000 А), что обеспечивает увеличение глубины проплавления – можно сваривать толщины до 20 мм за один проход без разделки кромок. При сварке металла толщиной более 20 мм кромки разделяют под углом в 30°. Этот метод сварки в 15-20 раз производительнее ручной дуговой сварки. Качество шва выше благодаря автоматизированности и непрерывности процесса, плотная флюсовая защита ванны предотвращает разбрызгивание и угар металла, интенсивное раскисление и легирование осуществляется за счёт увеличения объёма жидкого шлака и более медленного остывания шва под флюсом и твёрдой шлаковой коркой.

Данный метод применяют в серийном и массовом производстве для выполнения длинных прямолинейных или кольцевых швов в нижнем положении на металле толщиной 2-100 мм. К недостаткам метода можно отнести возможность получать только горизонтальные швы (с небольшими отклонениями) и сложность оборудования.

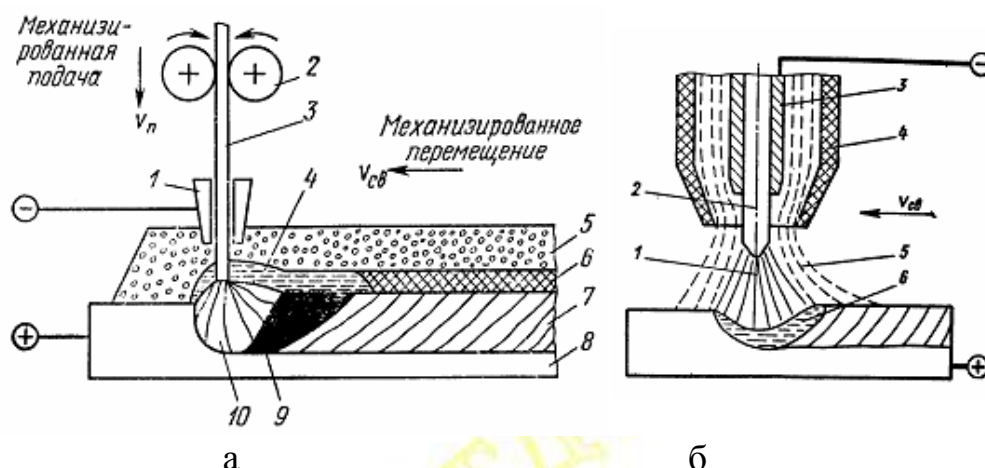
Сварка в атмосфере защитных газов

Сварка в атмосфере защитных газов или **газоэлектрическая сварка**, это сварка, при которой электрод, зона дуги и сварочная ванна защищены струёй **защитного газа**. Газ подают с помощью сварочной горелки через сопло из керамики или меди, в центре которого помещён электрод. Медное сопло охлаждается водой и оно изолировано от других частей горелки и токоподвода (рисунок 59 б). Защитные газы, как правило, легко ионизируются, поэтому дуга горит стабильно, в том числе и на малых токах. В качестве защитных газов у нас в стране применяют аргон и углекислый газ.

Преимущества сварки в атмосфере защитных газов:

- 1 Высокая степень защиты расплавленного металла от воздействия воздуха.
- 2 Для аргоновой сварки – отсутствие на поверхности шва оксидов и шлаковых включений.
- 3 Сварка осуществляется во всех пространственных положениях.
- 4 Визуальное наблюдение и регулирование.
- 5 Более высокая производительность, чем при ручной дуговой сварке.
- 6 Низкая стоимость при сварке в углекислом газе.

Аргоновая сварка обычно применяется для лёгких и тугоплавких металлов и сплавов, а также для конструкционных легированных и высоколегированных сталей. В углекислом газе варят углеродистую и низколегированную сталь.



а) автоматическая дуговая под слоем флюса:

1 – токоподводы; 2 – механизм подачи электродной проволоки; 3 – электродная проволока; 4 – ванна жидкого шлака; 5 – флюс; 6 – шлаковая корка; 7 – сварной шов; 8 – основной металл; 9 – жидкий металл; 10 – дуга.

б) в атмосфере защитных газов: 1 – дуга; 2 – электрод; 3 – токоподвод; 4 – сопло; 5 – защитный газ; 6 – сварочная ванна

Рисунок 59 – Виды сварки

Плазменная сварка

Плазменная струя это поток ионизированных частиц газа, имеющих температуру 10 000-20 000°K. **Плазму получают, пропуская поток газа через столб электрической дуги**, горящей между электродом и водоохлаждаемым соплом. Продуваемый газ почти полностью ионизируется, проходя через столб дуги. Плазменную струю, как высокотемпературный и концентрированный источник тепла, используют для сварки, наплавки, резки и различных видов тепловой обработки поверхности материалов.

Дуговые плазменные горелки – **плазмотроны** - бывают двух видов:

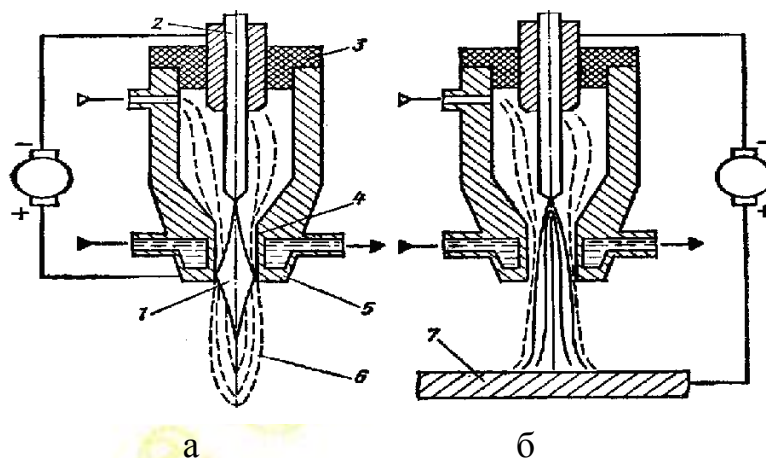
1 Плазмотроны с выделенной плазменной струей. В них дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и соплом, к которому подключён положительный полюс источника тока. Плазмообразующий газ пропускается по каналу через столб дуги. Из сопла выходит плазменная струя, контуры которой зависят от формы сопла, размеров канала и величины тока.

Горелки питаются постоянным током прямой полярности. Выделенная струя является независимым источником тепла, который можно использовать для обработки электропроводящих и неэлектропроводящих материалов (рисунок 60 а).

2 Плазмотроны с совмещённой со столбом дуги струей. В них дуга горит между электродом и заготовкой. Между электродом и соплом постоянно горит вспомогательная маломощная дуга. В этом случае эффективная мощность плазменной струи возрастает (рисунок 60 б).

В качестве **плазмообразующего газа** обычно используется **аргон**, который обеспечивает устойчивый процесс образования плазмы, предохраняет

электрод, канал и сопло от быстрого износа, служит защитной средой для обрабатываемого материала.



- а – с плазменной струёй, выделенной из дуги;
 б – с плазменной струёй, совмещённой с дугой.
 1 – столб дуги; 2 – электрод; 3 – керамическая прокладка; 4 – водоохлаждаемый канал сопла; 5 – сопло; 6 – струя плазмы; 7 – заготовка

Рисунок 60 – Плазмотроны

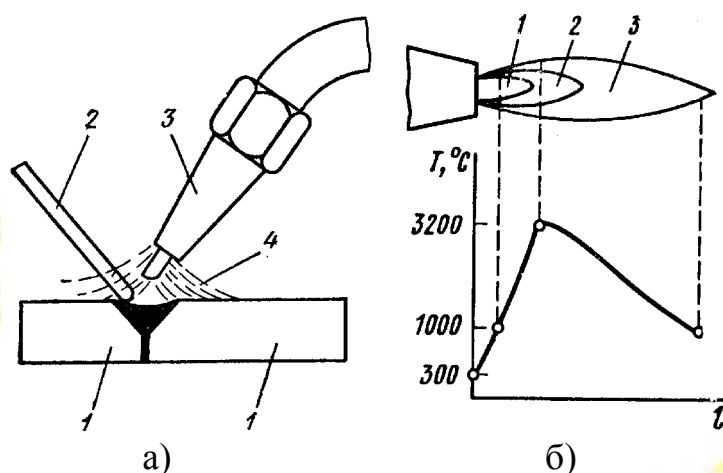
У плазменной струи большие технологические возможности: высокая температура, большая мощность и высокая производительность (можно сваривать материалы толщиной до 15 мм без разделки кромок), возможность регулировать мощность струи в широких пределах (при токе 0,5 А можно сваривать металл толщиной в несколько десятков микрон), при повышенном токе и расходе плазмообразующего газа можно проплавлять металл насквозь и выдвигать его из зоны нагрева, осуществляя, таким образом, его резку, при использовании выделенной дуги можно обрабатывать неэлектропроводящие материалы. Поэтому плазменная струя используется для сварки, в том числе и неметаллов (стекла, керамики, металлокерамики), металлов с неметаллами, резки всех материалов (тугоплавких, с высокой теплопроводностью), наплавки, напыления, пайки и термической обработки.

Газовая сварка

Газосварка – это процесс сварки плавлением, при котором место соединения нагревают до расплавления высокотемпературным газовым пламенем. При нагревании газосварочным пламенем кромки свариваемых заготовок расплавляются, а зазор между ними заполняется присадочным материалом, который вводится в пламя газовой горелки извне (рисунок 61 а). Газовое пламя получают при сгорании горючего газа в техническом кислороде. В качестве горючих газов применяют природный газ, водород, пары бензина или керосина, нефтяные газы, ацетилен и др. Основная масса газов применяется для резки ме-

таллов, а для сварки применяют ацетилен, так как он даёт температуру пламени 3200°C.

Газосварочная горелка используется для образования газосварочного пламени. Более широко распространены инжекционные горелки, так как они более безопасны и работают на низких средних давлениях. Кислород под давлением 0,1 - 0,4 МПа поступает в горелку и через регулировочный вентиль и трубку подаётся к инжектору. Выходя с большой скоростью из инжекционного конуса, кислород создаёт значительное разрежение в камере и засасывает горючий газ в камеру смешения, где образуется горючая смесь. Горючая смесь поступает по наконечнику к мундштуку, на выходе которого при горении образуется сварочное пламя.



а – процесс газовой сварки

1 – заготовки; 2 – присадочный материал; 3 – газовая горелка;
4 – газовое пламя

б – строение газосварочного пламени

1 – ядро пламени; 2 – средняя (сварочная) зона; 3 – факел пламени

Рисунок 61 – Газосварка

Преимущества газовой сварки заключается в более плавном нагреве, возможности сваривать тонкие заготовки ($\delta = 0,2 - 3$) мм и легкоплавкие цветные сплавы, производить пайку, осуществлять наплавку покрытий, подваривать дефекты в отливках. Газосварку удобно использовать в полевых условиях.

Недостатком способа является – резкое падение производительности при увеличении толщины свариваемого металла, а медленный нагрев заготовки приводит к деформации (короблению) изделий.

3.2.3 Сварка давлением

При **сварке давлением** заготовки соединяются путём **совместной пластической деформации** соединяемых поверхностей. Пластическая деформация осуществляется за счёт внешних усилий, а материал в зоне соединения, как правило, нагревают для снижения сопротивления деформации. При деформации происходит смятие поверхностей, течение металла, разрушение и удаление оксидных плёнок, в результате чего обеспечивается плотный контакт и условия для возникновения межатомных связей.

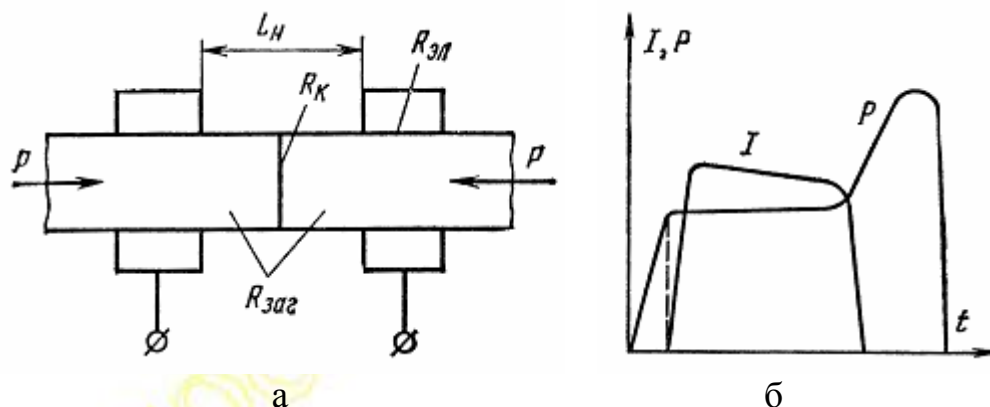
Электрическая контактная сварка

Электроконтактная сварка относится к способам сварки давлением с нагревом места соединения без оплавления или с оплавлением. Разогрев осуществляется проходящим по металлу электрическим током, причём максимальное количество тепловой энергии выделяется в месте контакта. После приложения давления в месте контакта имеет место пластическая деформация и образуется сварное соединение. По типу этого соединения различают виды контактной сварки:

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1 Стыковая сварка | 2 Точечная сварка |
| 3 Шовная (роликовая) сварка | 4 Газопрессовая сварка |

Стыковая сварка

При **контактной стыковой сварке методом сопротивления** (рисунок 62 а) заготовки свариваются по всей поверхности контакта. Для формирования прочного соединения процесс должен протекать в определённой последовательности. Цикл стыковой сварки (последовательность изменения тока и давления) представлен на рисунок 62 б). Заготовка закрепляется в зажимах, сдавливается небольшим усилием, затем включается ток, металл разогревается до пластического состояния или оплавления, и прикладывается основное усилие. Параметрами режима сварки являются: плотность тока, давление – усилие сжатия и время прохождения тока. Таким способом сваривают заготовки одинаковой простой формы небольшого сечения – до 100 мм^2 из низкоуглеродистых, низколегированных конструкционных сталей, алюминиевых и медных сплавов.



а - схема контактной сварки; б – цикл контактной стыковой сварки сопротивлением

Рисунок 62 - Контактная сварка

Точечная сварка – разновидность контактной сварки, при которой заготовки соединяются в отдельной точке или в нескольких точках. При этом заготовки собираются в нахлёстку и зажимаются с усилием между медными электродами, подводящими ток. Основное тепло выделяется в месте контакта заготовок, так как там максимальное электрическое сопротивление, а медные контакты нагреваются менее интенсивно за счёт своей высокой теплопроводности.

В месте разогрева металл становится пластичным, внутренние слои оплавляются, и образуется сварная точка. После этого выключают ток и снимают давление.

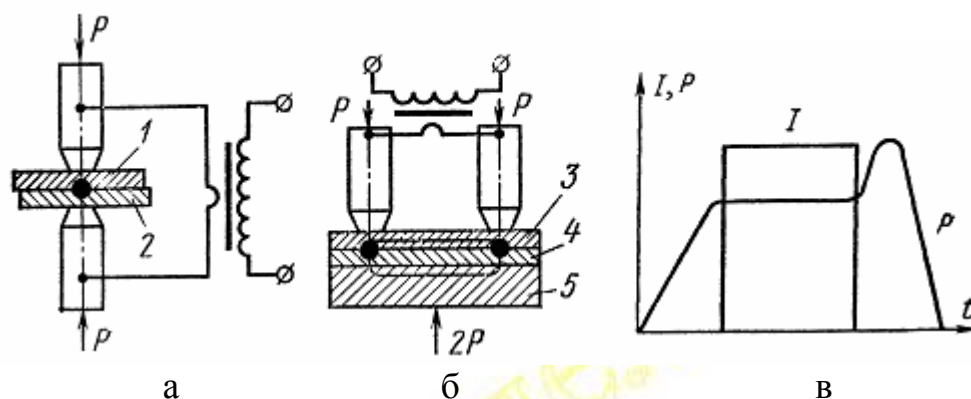
Точечная сварка в зависимости от взаимного расположения электродов может быть двусторонней (рисунок 63 а) и односторонней (рисунок 63 б). Регулируемыми параметрами процесса являются: усилие сжатия (до 150 МН/м^2), плотность тока (до 360 А/мм^2) и время протекания тока ($0,001\text{--}0,5 \text{ с}$). Толщина свариваемого металла составляет $0,5\text{--}5 \text{ мм}$.

Точечная сварка

Циклограмма точечной сварки (рисунок 63 в) состоит из четырёх участков – стадий:

- 1 Сжатие электродами свариваемых заготовок.
- 2 Включение тока и разогрев места контакта до температуры плавления.
- 3 Выключение тока и увеличение усилия сжатия.
- 4 Снятие усилия с электродов.

В массовом производстве используется **многоточечная сварка**, когда за один цикл создаётся до 100 пар (до 200) точек.

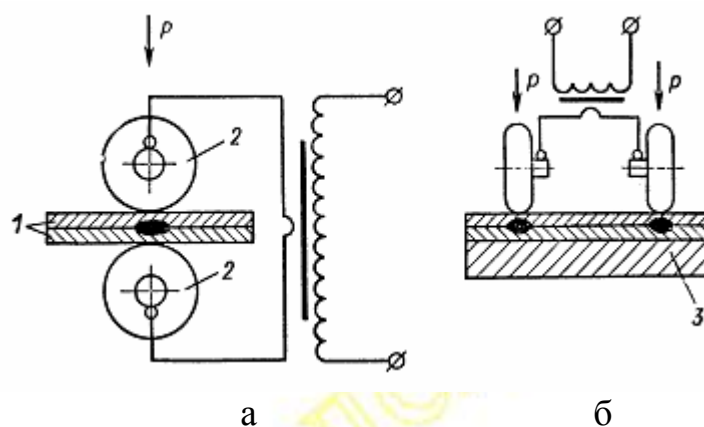


а – двусторонняя; б – односторонняя; в - цикл контактной точечной сварки
1, 2 – заготовки; 3, 4 – нижний и верхний листы; 5 – медная подкладка

Рисунок 63 - Контактная точечная сварка

Шовная (роликовая) сварка

При шовной сварке один или оба электрода выполняются в виде роликов. Ролики вращаются и между ними пропускаются свариваемые заготовки, которые соединены внахлестку. При пропускании тока образуется вытянутая сварная точка по форме ролика. Так как ролики вращаются, то точки перекрывают друг друга, и образуется сплошной **герметичный шов**. Шовную сварку можно выполнять при двустороннем (рисунок 64 а) и одностороннем положении электродов (рисунок 64 б). Циклограмма шовной сварки состоит из тех же стадий, что и у точечной сварки. Шовную сварку применяют при изготовлении сосудов в массовом производстве. Толщина свариваемых заготовок $0,3\text{--}3 \text{ мм}$.



а – двусторонняя; б – односторонняя
1 – заготовка; 2 – электроды; 3 – медная подкладка

Рисунок 64 - Шовная сварка

3.2.4 Пайка

Пайка – процесс соединения заготовок без их расплавления путем введения в зазор между ними легкоплавкого сплава – припоя, который в расплавленном состоянии хорошо смачивает поверхности деталей и при застывании соединяет их за счет взаимного растворения и диффузии припоя и основного материала. Припой имеет температуру плавления меньше температуры плавления основных металлов. Качество паяного шва зависит от прочности связки припоя с основными металлами. Эта связь образуется либо путем растворения металлов в жидком припое, либо за счет диффузии элементов припоя (см. Раздел «Электротехнические материалы») в металл и образования твердого раствора, либо образования интерметаллических соединений, либо в результате межатомных взаимодействий. Паять можно углеродистую и легированную сталь, чугуны, цветные металлы и сплавы.

При пайке используют флюсы для очистки поверхностей, снижения поверхностного натяжения, улучшения растекания и смачивания. **Флюсы** – канифоль, стеарин, бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), борная кислота (H_3BO_3) и другие.

Преимущества пайки в том, что основной металл не расплавляется и т.о. сохраняет свои структуру и мех свойства.

3.3 ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением основана на их способности пластически деформироваться в результате воздействия на заготовку внешних сил. При этом значительно снижается количество отходов по сравнению с обработкой резанием. Для данного метода обработки характерна высокая производительность, так как при однократном приложении усилия можно значительно изменить форму и размеры изделия. Кроме того, при пластической деформации металла меняются его физико-механические свойства: увеличивается прочность, износостойкость, упругость и т.д. Всё это приводит к тому, что удельный вес этого метода в металлообработке постоянно повышается.

Все процессы обработки металлов давлением делятся по назначению на два вида:

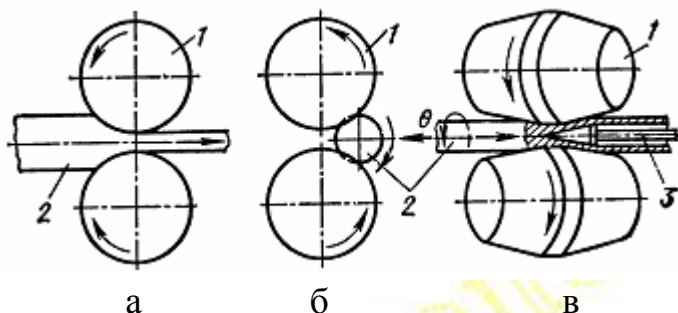
1 Получение заготовок постоянного поперечного сечения по длине – пруток, проволока, лента, лист, из которых затем изделия изготавливаются обработкой резанием. К ним относятся **прокатка, прессование и волочение**.

2 Получение деталей или заготовок – полуфабрикатов по форме и размерам, приближенным к готовым изделиям. При этом последующая обработка резанием применяется для придания им окончательных размеров и необходимой чистоты поверхности. К ним относятся **ковка и штамповка**.

3.3.1 Прокатное производство

Прокатка – один из видов обработки металлов давлением, при котором металл пластически деформируется вращающимися валками. Взаимное расположение валков и заготовки, форма и число валков может быть разными. Существует три основных вида прокатки – **продольная, поперечная, поперечно-винтовая** (рисунок - 65).

Продольная прокатка (рисунок - 65 а) – заготовка деформируется между двумя валками, вращающимися в разные стороны, и перемещается перпендикулярно осям валков.



а – продольная прокатка; б – поперечная прокатка; в – поперечно-винтовая прокатка. 1 – валки; 2 – заготовка; 3 – оправка

Рисунок 65 - Основные виды прокатки

Поперечная прокатка (рисунок - 65 б) – валки вращаются в одном направлении, придают вращение заготовке, которая, перемещаясь вдоль оси валков, деформируется.

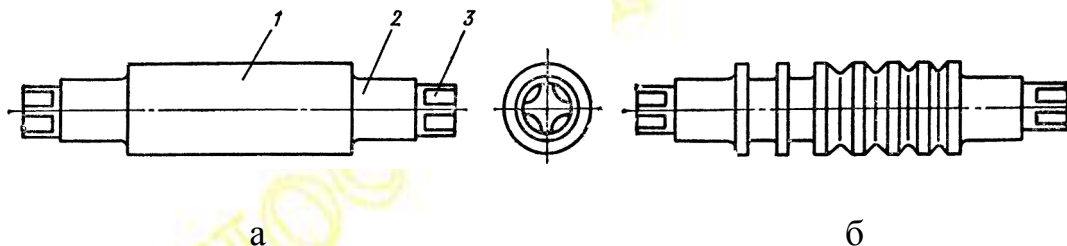
Поперечно – винтовая прокатка (рисунок - 65 в) – валки расположены под углом и придают заготовке при деформировании вращательное и поступательное движение.

Прокатке подвергается до 90% выплавляемой стали. Наиболее распространена продольная прокатка. При любом виде прокатки деформации подвергается небольшой участок заготовки, который постепенно перемещается по всему металлу. При этом уменьшается толщина заготовки и увеличивается её длина и ширина. Площадь поперечного сечения заготовки при прокатке всегда уменьшается. Величина $\mu = I / I_0 = F_0 / F$, где I , F и I_0 , F_0 – длина и сечение заго-

товки после прокатки и до прокатки соответственно, называется **вытяжкой** – это основная количественная характеристика различных видов обработки пластической деформацией. При прокатке $\mu = 1,1 - 1,6$.

Инструмент и оборудование для прокатки

Инструментом при прокатке является **валок**, который может быть: **гладким** (рисунок 66 а) – для прокатки листов, лент; **ступенчатым** – для прокатки полос; **ручьевым** (рисунок 66 б) – для прокатки фасонного профиля. **Ручьём** называется вырез на боковой поверхности вала. Совокупность двух ручьёв пары валков образуют **калибр**.



а) гладкий валок: 1 – бочка; 2 – шейка (цапфа); 3 – трёфа; б) ручьевого валок

Рисунок 66 – Валки

Валки устанавливаются в подшипниках на **станине**, на которой есть механизмы регулировки их положения. Комплект валков со станиной образуют **рабочую клеть**. Привод, шестерённая клеть и рабочие клетки образуют **прокатный стан**.

Продукция прокатного производства

Исходной заготовкой при прокатке являются слитки металла – стальные до 60 т, из цветных металлов – до 10 т. Форма поперечного сечения прокатанного изделия называется **профилем**. Совокупность различных профилей различных размеров называется **сортаментом**. Сортамент изготавливаемых профилей делится на четыре группы: сортовой прокат, листовой прокат, трубы, специальный прокат.

1. Сортовой прокат. Прокатка осуществляется в горячем состоянии стальных слитков до 12 т. Профили сортового проката делят на две группы: **простой формы** – круг, квадрат, шестигранник, прямоугольник; и **сложной формы** (фасонный) – швеллер, рельс, тавр, двутавр, уголок и т.д.

2. Листовой прокат. Листовой прокат делят: **по области применения** – электротехнический, судостроительный, котельный, автолист, консервная жёсть и т.д.; **по толщине** – бронеовые плиты (до 550 мм), толстый лист (4 – 160 мм), тонкий лист (4 – 0,2 мм), фольга (менее 0,2 мм).

Толстый лист прокатывают из стальных слитков до 45 т в горячем состоянии. Тонкий лист прокатывают в горячем и холодном (тоньше 2 мм) состоянии. Всё чаще используется **бесслитковая прокатка**, при которой жидкий

металл через щель в распределительной коробке подаётся на валки-кристаллизаторы.

3. Трубы. Стальные трубы делят на **бесшовные** ($D = 30 - 650$ мм) и **сварные** ($D = 10 - 1420$ мм).

При прокатке **бесшовных труб** сначала осуществляется изготовление отверстия в заготовке – **прошивка гильзы**. Эта операция осуществляется на **прошивных станах**. Затем на **раскатных станах** гильзу раскатывают в трубу требуемых диаметров.

Сварные трубы получают из **стальной ленты – штрипсы**, которую сворачивают по спирали или **из листов**, ширина которых соответствует длине окружности труб. В обоих случаях сначала осуществляется формовка заготовки в трубу, сварка, отделка и правка.

4. Специальный прокат – кольца, зубчатые колёса, периодические профили и т.д.

3.3.2 Ковка

Ковка – вид горячей обработки металлов давлением, при котором деформация осуществляется с помощью **универсальных инструментов – бойков**. Заготовку помещают на **нижний боёк** и **верхним бойком** последовательно деформируют на отдельных участках. Металл течёт в те стороны, которые не ограничены рабочими поверхностями инструмента. Бойки могут быть **плоскими** или **фигурными** (вырезными), также может применяться **различный подкладной инструмент**. Ковкой, как правило, получают заготовки – **поковки**, для последующей механической обработки.

Исходной заготовкой для ковки является металлический слиток массой до 320 т, а поковка может достигать веса более 250 т, таким образом, ковка – единственный метод изготовления заготовок такой массы. Для поволоков небольшой массы используется сортовой прокат. В процессе ковки слитков происходит уничтожение их литой дендритной структуры и улучшение механических свойств изделия.

Основные операции ковки

Для получения поковки в процессе ковки происходит чередование в определённой последовательности основных и вспомогательных операций.

Осадка – операция уменьшения высоты заготовки за счёт увеличения площади её поперечного сечения (рисунок 67). Степень деформации при осадке – **уковка** – определяется отношением площадей поперечного сечения до осадки (F_0) и после осадки (F_1): $y = F_1/F_0$. При осадке отношение высоты заготовки к её диаметру не должно превышать 2,5. Разновидностью осадки является **высадка** – осаживание металла на **части** заготовки.

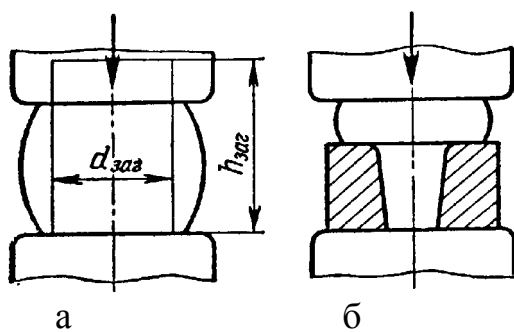


Рисунок 67 - осадка (а); высадка (б)

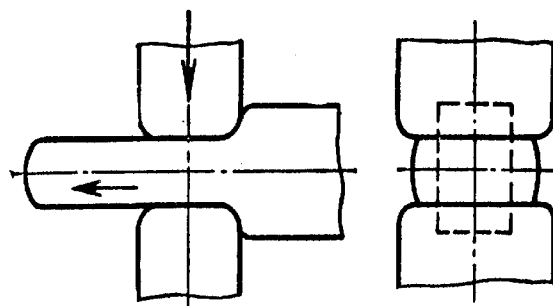
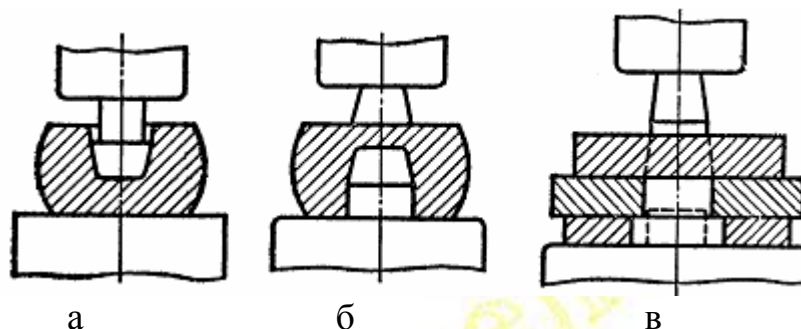


Рисунок 68 - Протяжка

Протяжка – операция удлинения заготовки или её части за счёт уменьшения площади поперечного сечения (рисунок 68). При протяжке заготовку подвергают последовательным ударам с подачей вдоль оси протяжки и поворотами вокруг своей оси. Степень деформации при протяжке также оценивается **уковкой**.

Прошивка – операция получения полости (глухая прошивка) (рисунок 69 а,б) или отверстия (рисунок 69 в) в заготовке за счёт вытеснения металла. Инструментом являются **прошивки**.



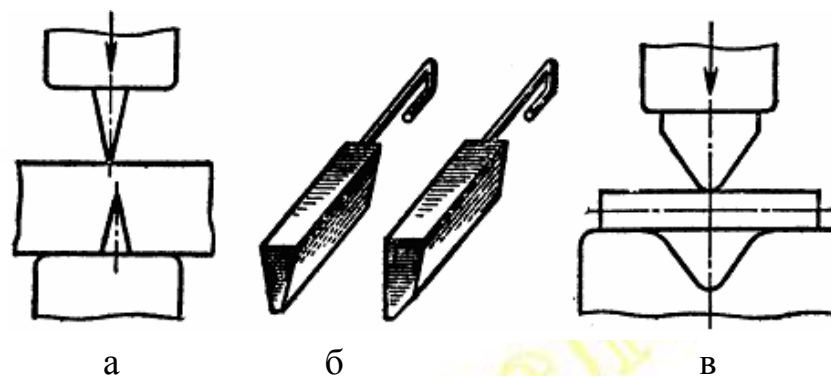
а, б – двухсторонняя прошивка; в – односторонняя прошивка с подкладным кольцом

Рисунок 69 – Прошивка

Отрубка – операция отделения заготовки по незамкнутому контуру (рисунок 70, а). Отрубка осуществляется инструментом – **топором** (рисунок 63 б).

Гибка – операция придания заготовке изогнутой формы по заданному контуру (рисунок 70 в). При гибке в зоне изгиба уменьшается площадь поперечного сечения – это называется **утяжкой**.

Скручивание – операция, при которой часть заготовки поворачивается вокруг своей продольной оси.



а – отрубка; б – топоры для отрубки; в – гибка

Рисунок 70 – Отрубка и гибка

Штамповка в подкладных штампах – операция получения поковки сложной конфигурации при заполнении металлом полости инструмента – подкладного штампа (рисунок 71).

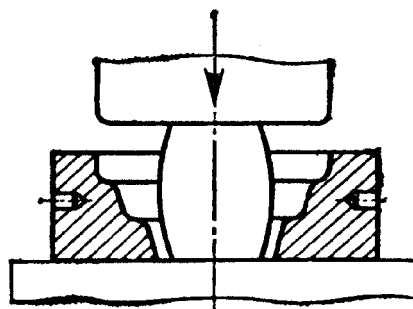


Рисунок 71 – Штамповка в подкладном штампе

Операцииковки осуществляют на ковочных **молотах** и **ковочных прес-сах**. **Молоты** – механизмы **ударного действия**. Время деформации на них – тысячные доли секунды. Они бывают **пневматическими** и **паровоздушными**.

Гидравлические прессы – машины **статического действия**, время деформации у них может составлять до десятков секунд.

Чертёж поковки разрабатывается на основе чертежа будущей детали. Как и в случае разработки чертежа отливки, в чертеже поковки присутствуют **припуски** и **напуски**.

Так как при ковке используется универсальный инструмент, то, не смотря на её невысокую производительность (по сравнению со штамповкой), она широко применяется в единичном и мелкосерийном производстве, где применение штамповки не экономично из-за высокой стоимости инструмента.

3.3.3 Штамповка

Штамповка – это вид обработки металлов давлением, при котором формообразование поковки осуществляется с помощью **специального инструмен-**

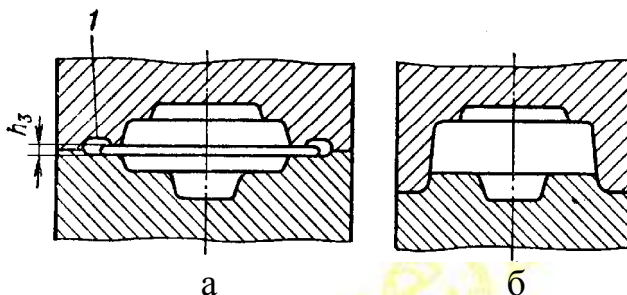
та – штампа. Течение металла ограничивается поверхностями полостей и выступов штампа. Его единая замкнутая полость называется **ручьём**, а само изделие – **поковкой**.

Заготовками для штамповки является прокат, разрезанный на мерные куски. В основном штампуют поковки массой 20 – 30 кг, так как для этого метода требуются очень большие усилия деформации (гораздо большие, чем при ковке). В отдельных случаях штампуют поковки до 3 т.

Горячая объёмная штамповка

При горячей объёмной штамповке заготовку предварительно нагревают для увеличения её пластичности и снижения прикладываемого давления. Характер течения металла в процессе штамповки определяется типом штампа, поэтому её подразделяют на штамповку в открытых и в закрытых штампах.

Штамповка в открытых штампах (рисунок 72 а). При этом виде штамповки зазор между подвижной и неподвижной частями штампа меняется в процессе изготовления поковки. В зазор вытекает **заусенец – облой**, который закрывает выход из полости штампа, и металл заполняет её полностью. В конце процесса в заусенец выдавливаются излишки металла, поэтому требования к точности заготовки по массе не высоки. В последствии заусенец удаляется в специальных штампах.



а – открытый штамп; б – закрытый штамп; 1 – заусенечная канавка

Рисунок 72 – Схема штамповки

Штамповка в закрытых штампах (рисунок 72 б). При этом виде штамповки полость штампа остаётся закрытой, а зазор между подвижной и неподвижной частями постоянный и небольшой. При этом заусенец не образуется, что требует высокой точности заготовки по массе, но зато снижает расход металла. Получаемые поковки имеют более рациональную микроструктуру, так как волокна металла обтекают контур поковки, а не перерезаются. Деформация заготовки происходит в условиях всестороннего неравномерного сжатия, что позволяет штамповать малопластичные материалы.

Поковки простой конфигурации штампуются в штампах с одной полостью – **одноручьевые штампы**. Поковки сложной формы штампуют в **много-ручьевых штампах**, постепенно приближая форму заготовки к форме конечного изделия.

При проектировании поковки её чертёж разрабатывают по чертежу детали. При штамповке в открытом штампе сначала выбирают плоскость разъёма, затем определяют припуски на механическую обработку, штамповочные уклоны, радиусы закругления в местах пересечения поверхностей. На отдельных участках поковки могут быть сделаны напуски (диаметры отверстий менее 30 мм не делаются). Все размеры спроектированной поковки увеличивают на величину усадки. Теперь по этому чертежу изготавливают полость штампа. При штамповке в открытых штампах вдоль внешнего контура полости выполняют заусенечную канавку.

Для горячей объёмной штамповки применяются молоты, ковочные машины и прессы различных конструкций.

Холодная штамповка

Холодная штамповка осуществляется при комнатной температуре, без предварительного нагрева и подразделяется на объёмную и листовую. При холодной обработке давлением получаемые изделия более точны по размерам и имеют меньшую шероховатость поверхности, что позволяет свести к минимуму или даже исключить последующую обработку резанием.

Холодная объёмная штамповка

Холодное выдавливание. В этом методе заготовка помещается в полость, из которой металл выдавливается в отверстие в рабочем инструменте. В качестве заготовки используется мерно нарезанный прутки. Выдавливание может быть **прямым**, когда направление течения металла совпадает с направлением движения пуансона, **обратным**, когда направление течения металла противоположно направлению пуансона, **боковым** и **комбинированным** (смотри прессование).

Холодное выдавливание позволяет получать заготовки при больших степенях деформации, которая характеризуется величиной $k = F_0/F_1$, где F_0 – площадь поперечного сечения исходной заготовки; F_1 – площадь поперечного сечения выдавленной части. Например, для алюминия $k > 100$. Так получают трубы с толщиной стенки 0,1 – 0,2 мм и диаметром 20 – 40 мм.

Допустимая степень деформации ограничена высокими удельными усилиями выдавливания, которые могут превысить прочность инструмента.

Холодная высадка. Эту операцию осуществляют на холодновысадочных автоматах из прутка или проволоки. Таким образом получают заготовки и детали диаметром 0,5 – 40 мм: заклёпки, болты, винты, гвозди, шарики, ролики, гайки и т.д. На рисунке 73 приведён пример последовательности изготовления винта.

Холодная высадка отличается **высокой производительностью**: 20 – 400 деталей в минуту и чем меньше деталь, тем производительность выше. Для этого метода характерен высокий коэффициент использования металла – до 95%.

Холодная формовка – это холодная штамповка в открытых штампах. Этот метод аналогичен горячей объёмной штамповке, но в отличие от неё, здесь требуются гораздо большие удельные усилия, так как в холодном состоя-

нии металлы менее пластичны и упрочняются в процессе деформации вследствие **наклёпа**. Для снятия наклёпа приходится проводить рекристаллизационные отжиги.

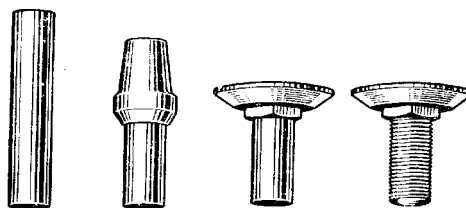


Рисунок 73 – Последовательность изготовления винта на холодновысадочных автоматах

Холодная листовая штамповка

При холодной листовой штамповке в качестве заготовки используется листовой прокат: лист, полосы, ленты. Их толщина обычно не превышает 10 мм. Перечень изделий, получаемых этим методом, чрезвычайно велик – от долей граммов (и долей миллиметра) – секундные стрелки ручных часов; до изделий массой в десятки килограммов (и размерами в несколько метров) – корпуса автомобилей, самолётов, ракет.

Для получения деталей различной формы требуется последовательно деформировать различные части заготовки. Весь процесс листовой штамповки состоит из набора **операций – процессов пластической деформации, обеспечивающих характерное изменение формы определённого участка заготовки**. Различают формообразующие операции, в которых деталь не разрушается в процессе деформации, и разделительные операции, в которых пластическая деформация завершается разрушением детали.

Разделительные операции листовой штамповки

Отрезка – отделение части заготовки по незамкнутому контуру. Эта операция выполняется в **ножницах** и **штампах**. Как правило, она является заготовительной операцией – разделение листа на мерные заготовки. Чаще эта операция осуществляется с помощью ножниц двух типов: **гильотинные** – с поступательным движением ножа, и **дисковые** – с вращательным движением ножей.

Вырубка и пробивка. **Вырубка** – операция оформления **наружного контура** детали. **Пробивка** – операция оформления **внутреннего контура** детали – изготовление **отверстий**. Эти операции осуществляются с помощью **пуансона** и **матрицы** – пуансон выдавливает часть заготовки в отверстие матрицы. Качество поверхности реза определяется выбором зазора между ними – $z = (0,05 \div 0,1)s$.

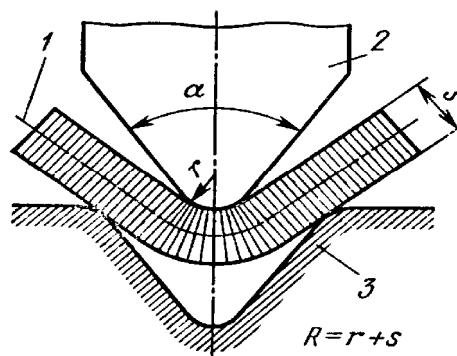
Кроме рассмотренных выше разделительных операций в листовой штамповке применяются такие операции, как **надрезка** – частичное отделение части

заготовки по незамкнутому контуру; **обрезка** – отделение краевой части заготовки.

Формообразующие операции листовой штамповки

Гибка – операция по изменению кривизны заготовки без изменения её линейных размеров (рисунок 74). В процессе гибки пластическая деформация происходит на узком участке под пуансоном. Минимальный радиус, при котором заготовка не разрушается $r_{\min} = (0,1 \div 2)s$.

Операция гибки может осуществляться в штампах, при этом можно изменять кривизну сразу на нескольких участках заготовки. Детали, изогнутые в нескольких плоскостях, получают последовательным деформированием в нескольких штампах.



1 – нейтральный слой; 2 – пуансон; 3 – матрица

Рисунок 74 – Схема гибки

Вытяжка без утонения стенок – операция преобразования плоской заготовки в полое пространственное изделие за счёт уменьшения периметра вытягиваемой заготовки. На рисунке 3 приведена схема первого перехода вытяжки.

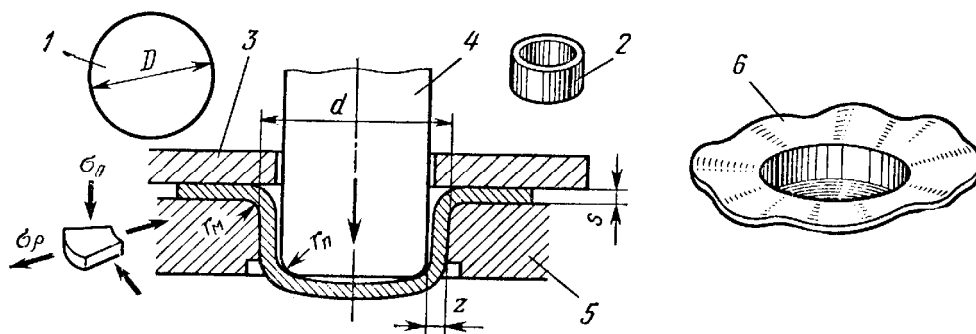
Для проведения операции вытяжки предварительно вырубает круглую заготовку, которую укладывают на плоскость матрицы. Пуансон давит на центральную часть заготовки и перемещает её в отверстие матрицы, при этом центральная часть тянет за собой **фланец** – периферийную часть. Фланец, смещаясь в матрицу, образует стенки изделия.

При неправильном выборе диаметра заготовки ($D - d > (18 \div 20)s$) возможно образование **складок**. Для предотвращения появления складок применяется **прижим**, который прижимает фланец заготовки к матрице.

Если растягивающие напряжения σ_p , действующие на входе в матрицу, сравниваются с пределом прочности заготовки, то заготовка у доньшка может разрушиться. Таким образом, можно вытягивать заготовку только с ограниченной шириной фланца. Степень деформации оценивается коэффициентом вытяжки $K_v = D/d$. В зависимости от металла и условий вытяжки $K_v = 1,8 \div 2,1$. Если за один переход при допустимом коэффициенте вытяжки невозможно получить готовую деталь, то вытяжку осуществляют за **несколько переходов** (рисунок 76а). В последующих переходах заготовкой является полый полуфабрикат, полученный на предыдущем переходе вытяжки.

При холодной деформации металл упрочняется из-за наклёпа, поэтому допустимый коэффициент вытяжки на последующих переходах снижается до $K_b = 1,2 \div 1,4$. Если заготовку подвергнуть рекристаллизационному отжигу, то допустимый коэффициент вытяжки можно повысить до $K_b = 1,4 \div 1,6$.

Усилие вытяжки $P = \pi n \sigma_b (D-d)b$, где $b = 1,1 \div 1,2$ – для первого перехода вытяжки; $b = 1,6 \div 1,9$ – для последующих переходов вытяжки отожжённой заготовки; $b = 2,3 \div 2,7$ – для последующих переходов без межоперационного отжига.



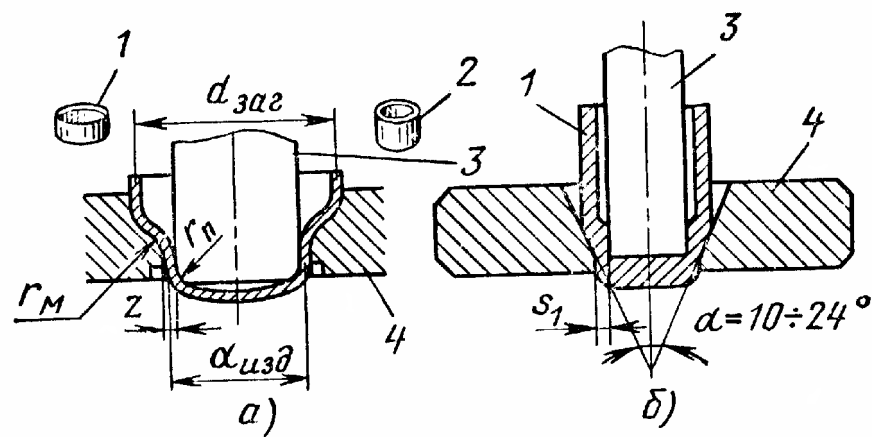
1 – заготовка; 2 – изделие; 3 – прижим; 4 – пуансон; 5 – матрица;
6 – изделие со складками (без прижима)

Рисунок 75 – Вытяжка без утонения стенок

Для уменьшения концентрации напряжений и предотвращения разрушения заготовки кромки пуансона и матрицы скругляются $r_m, r_n = (5 \div 10)s$, для этого же применяют смазку.

При вытяжке без утонения стенок площадь поверхности заготовки изменяется незначительно, поэтому размер заготовки можно определить из **условий равенства и площади поверхности детали по средней линии и площади плоской заготовки**. Для осесимметричных деталей заготовка обычно имеет форму круга. Для повышения стойкости инструмента между пуансоном и матрицей делают зазор $z = (1,1 \div 1,3)s$.

Вытяжка с утонением стенок – операция по увеличению длины полой заготовки в основном за счёт уменьшения толщины её стенок (рисунок 76 б). При этой операции зазор между пуансоном и матрицей должен быть меньше толщины стенки, которая в процессе вытяжки утоняется и удлиняется. Этим методом получают детали, у которых толщина доньшка больше толщины стенок (гильзы для патронов и снарядов). Удельные усилия при такой вытяжке значительно больше, допустимая степень деформации возрастает, толщина заготовки за один проход может быть снижена в 1,5 – 2 раза. Размеры заготовки для получения изделий вытяжкой с утонением стенки определяют из условия равенства объёмов заготовки и детали.

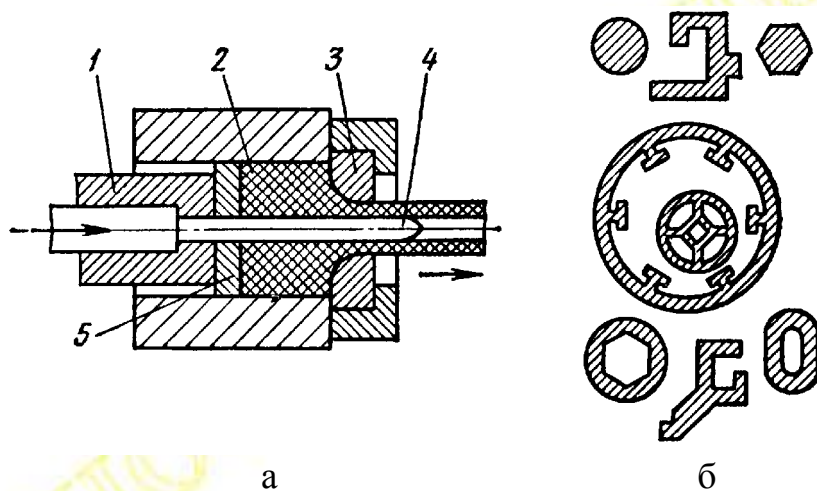


1 – заготовка; 2 – изделие; 3 – пуансон; 4 – матрица

Рисунок 76 – Схема последующей вытяжки (а);
вытяжка с утонением стенок (б)

3.3.4 Прессование

Прессование – процесс обработки металлов давлением, при котором металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие, соответствующее сечению прессуемого профиля. Таким методом получают как сплошные, так и полые профили. На рисунке 77 приведён вариант прямого прессования – направление движения пуансона совпадает с направлением движения готового профиля.



1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – игла; 5 – пресс-шайба

Рисунок 77 – Прессование полого профиля (а); прессованные профили (б)

Прессование, как и выдавливание, может осуществляться и по обратной схеме, когда пуансон и прессуемый профиль перемещаются в противоположных направлениях. Исходной заготовкой для прессования является **слиток** или **прокат**. Для снижения необходимых для деформации нагрузок и повышения стойкости инструмента заготовку обычно нагревают, а также предварительно обтачивают на станке. С этой же целью используют различные смазки.

Ассортимент получаемых профилей очень велик: прутки диаметром 3 – 250 мм, трубы диаметром 20 – 400 мм со стенкой толщиной 1,5 – 12 мм и т.д. Коэффициент, определяемый как отношение площади сечения заготовки к площади сечения прессуемого профиля, и определяющий степень деформации, достигает при прессовании 10 – 50. Этим методом получают профили сложной формы, которые другими способами получить нельзя. Точность изготовления прессованных изделий выше, чем прокатанных.

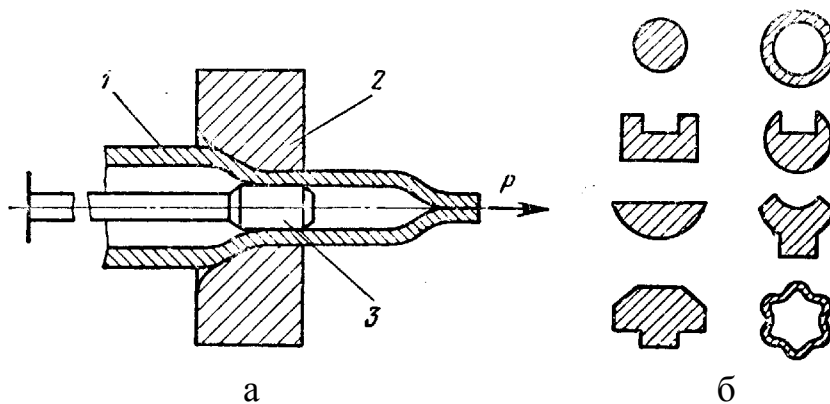
К недостаткам прессования можно отнести большие отходы металла – пресс-остаток может достигать 40% от массы исходной заготовки. Инструмент для прессования испытывает большие нагрузки в сочетании с высокими температурами, поэтому его изготавливают из высококачественных инструментальных сталей, и он очень дорог.

3.3.5 Волочение

Волочение – процесс, при котором заготовку протягивают через постепенно сужающееся отверстие в инструменте. Инструмент называют **волокой** (рисунок 78). Исходными заготовками служат прокатанные или прессованные прутки и трубы. Волочение, в большинстве случаев, осуществляется в холодном состоянии.

При волочении площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а длина увеличивается, поэтому количественно деформацию можно охарактеризовать вытяжкой μ – отношением полученной длины к исходной. За один проход $\mu = 1,25 \div 1,45$. Заготовку протягивают через инструмент, а усилие, приложенное к заготовке, необходимо как для её пластической деформации, так и для преодоления трения. В связи с этим, для уменьшения сил трения, используют смазки, а внутреннюю поверхность волоки (фильеры) полируют.

Как правило, для получения необходимого профиля требуется деформация, превышающая величину допустимую за один проход. В связи с этим волочение осуществляют через ряд волок с постепенно уменьшающимися отверстиями. При волочении металл испытывает значительный наклёп, который снимается промежуточными рекристаллизационными отжигами.



1 – заготовка (труба); 2 – волока; 3 – оправка

Рисунок 78 – Волочение трубы (а) и профили, полученные волочением (б)

Сортамент изделий, полученных волочением, весьма разнообразен: это и проволока диаметром 0,002 – 10 мм, и фасонные профили; волочением калибруют трубы диаметром от долей миллиметра (капилляры) до 500 мм и прутки диаметром 3 – 150 мм. Метод обеспечивает высокую точность размеров, низкую шероховатость поверхности, а также позволяет получать очень тонкие профили.

3.4 ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Обработка металлов резанием – это процесс срезания с поверхности заготовки слоя металла режущим инструментом для получения требуемой формы, точности размеров и шероховатости поверхности детали (рисунок 79). Для осуществления процесса резания необходимо **относительное движение заготовки и режущего инструмента**, для чего используются станки, оснащённые рабочими органами.

Параметрами процесса резания являются: **скорость резания, подача и глубина резания. Совокупность этих величин называется – режим резания.**

Скорость резания v – это путь точки режущей кромки (режущего лезвия) инструмента относительно заготовки в направлении главного движения в единицу времени. Обычно скорость резания измеряется в м/мин, но при шлифовании и полировании – в м/с.

При **вращательном** главном движении

$$v = \pi D_{\text{заг}} n / 1000 \text{ м/мин.} \quad (37)$$

$D_{\text{заг}}$ – наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм.

n – частота вращения заготовки, об/мин.



Рисунок 79 – Схема обработки металлов резанием

Подача s – это путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в направлении движения подачи за один оборот или за один двойной ход заготовки или инструмента. В зависимости от метода обработки подача может быть продольной – $s_{\text{пр}}$; поперечной – $s_{\text{п}}$; вертикальной – $s_{\text{в}}$; наклонной – $s_{\text{н}}$; круговая – $s_{\text{кр}}$ и т.д. и измеряться в мм/об (точение, сверление), мм/дв. ход (строгание, долбление), мм/мин (фрезерование).

Глубина резания t мм – это расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней,

за один рабочий ход инструмента относительно обрабатываемой поверхности. Глубина резания всегда перпендикулярна направлению подачи.

При точении цилиндрической поверхности $t = (D_{\text{заг}} - d)/2$, где $D_{\text{заг}}$ – диаметр заготовки, мм; d – диаметр обработанной поверхности, мм.

3.4.1 Токарные работы

Токарные работы – предусматривают изготовление деталей при вращательном движении заготовки (главное движение) и поступательном движении инструмента (движение подачи).

На токарных станках обрабатываются наружные и внутренние поверхности с формой тел вращения, плоские – наружные и внутренние торцевые поверхности и нарезают резьбы.

Резцы классифицируются:

1. По **материалу режущей части** – на углеродистые, быстрорежущие, твердосплавные, минералокерамические, алмазные.

2. По **расположению главной режущей кромки** (главного лезвия) – на правые и левые. Правый резец в процессе резания перемещается продольно справа налево; левый – слева направо.

Многообразие обрабатываемых поверхностей привело к созданию разнообразных токарных резцов:

- **проходных** – для обтачивания наружных цилиндрических поверхностей;
- **подрезных** – для обработки плоских торцевых поверхностей;
- **расточных** – для растачивания сквозных и глухих отверстий, и обработки внутренних цилиндрических и плоских торцевых поверхностей;
- **отрезных** – для разрезания заготовок и отделения готовой детали;
- **резьбовых** – для нарезания наружной и внутренней резьбы;
- **фасонных** – для обработки фасонных поверхностей и канавок.

В настоящем пособии будут рассмотрены только основные типы токарных резцов, наиболее широко применяющихся при токарной обработке.

а) Проходные резцы

- **прямой проходной резец** (рисунок 80 а) – для обработки наружной цилиндрической поверхности;

- **проходной резец с отогнутой головкой** (рисунок 80 б) – для обработки наружной цилиндрической поверхности;

- **проходной упорный резец** – для обработки наружной цилиндрической поверхности. Упорные резцы применяются в тех случаях, когда необходимо, чтобы между обработанной цилиндрической и торцевой поверхностью получился угол 90° (рисунок 81 а).

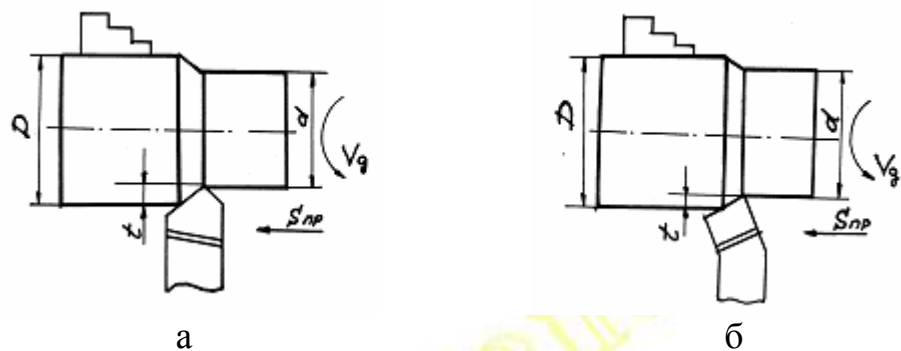


Рисунок 80 – Прямой проходной резец (а) и проходной резец с отогнутой головкой (б)

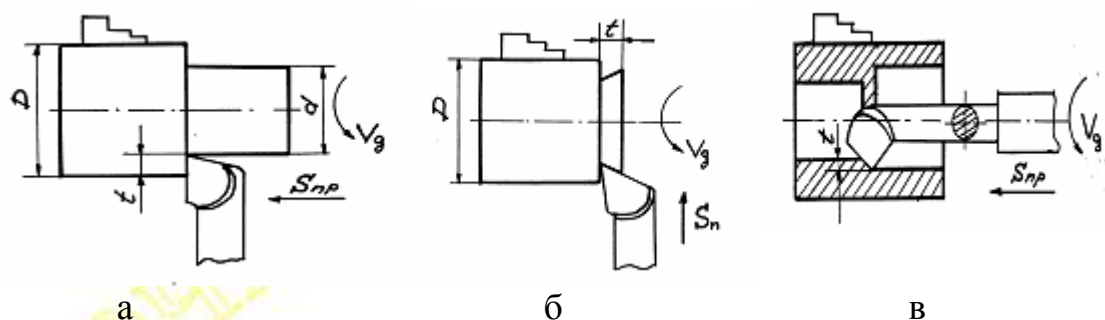


Рисунок 81 – Проходной упорный резец (а), подрезной резец (б), проходной расточной резец (в)

При точении наружной цилиндрической поверхности используются:

б) Резцы для обработки торцевых поверхностей:

- подрезной резец (рисунок 81 б);
- проходной резец с отогнутой головкой (рисунок 80 б). Благодаря своей конструкции этот резец может быть использован как для обработки наружной цилиндрической поверхности, так и для подрезки торцов.

в) Резцы для обработки внутренней цилиндрической поверхности (расточные резцы):

- расточной проходной резец (рисунок 81 в);
- расточной упорный резец (рисунок 82 а).

Расточной упорный резец растачивает отверстие до нужного диаметра за несколько рабочих ходов при продольной подаче. На торце при этом образуется ступенчатая поверхность. Затем при использовании поперечной подачи осуществляется обработка торца и образуется угол 90^0 между цилиндрической и торцевой поверхностью.

г) Отрезной резец (рисунок 82 б)

Перечисленные резцы являются основными, наряду с которыми используются резбовые, канавочные и различные фасонные резцы.

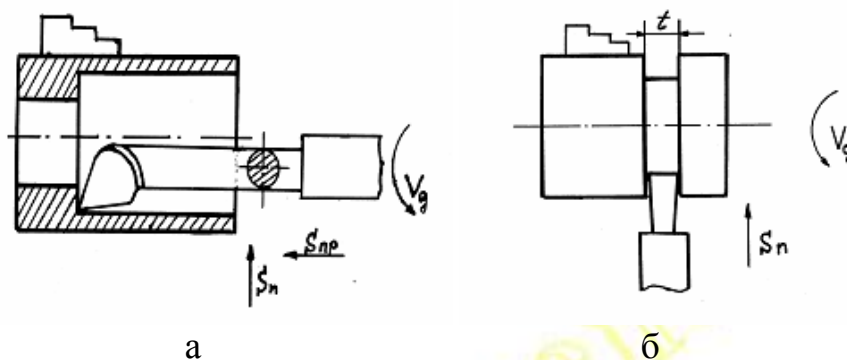


Рисунок 82 – Расточной упорный резец (а) и отрезной резец (б)

3.4.2 Сверлильные работы

Сверление – способ обработки отверстий, при котором инструмент совершает главное движение (вращение) и движение подачи (непрерывное перемещение вдоль оси инструмента). Режимы резания при сверлении – те же, что при токарной обработке.

В соответствии с классификацией маркировка сверлильного станка расшифровывается следующим образом:

- первая цифра (2) указывает на принадлежность станка к **сверлильной группе**;
- буква после цифры, при её наличии, указывает на **модернизацию** станка;
- следующая цифра определяет **тип** станка;
- следующая цифра определяет **характерный размер** станка – **наибольший диаметр сверления** отверстий.

Например, 2A150 – вертикально-сверлильный станок, модернизированный, наибольший диаметр обрабатываемого отверстия – 50мм; 2B56 - радиально-сверлильный станок, модернизированный, максимальный диаметр обрабатываемого отверстия – 60мм

При работе на сверлильных станках главное движение (вращательное) и движение подачи (поступательное) совершает инструмент.

На сверлильных станках обрабатывают отверстия с помощью специального инструмента (рисунок 83): а,б – спиральными свёрлами сверлят и рассверливают отверстия; в, ж, з – с помощью зенкеров зенкуют (для увеличения их точности изготовления и уменьшения шероховатости поверхности) цилиндрические (в) отверстия и углубления (ж), а также конические отверстия и углубления (з); г, д – с помощью развёрток развёртывают цилиндрические (г) и конические (д) отверстия, чтобы изготовить отверстие с ещё большей точностью и меньшей шероховатостью; е – с помощью цековок обрабатывают торцевую поверхность отверстия; и – с помощью метчиков нарезают внутренние резьбы; к – обрабатывают сложные отверстия с помощью комбинированного инструмента.

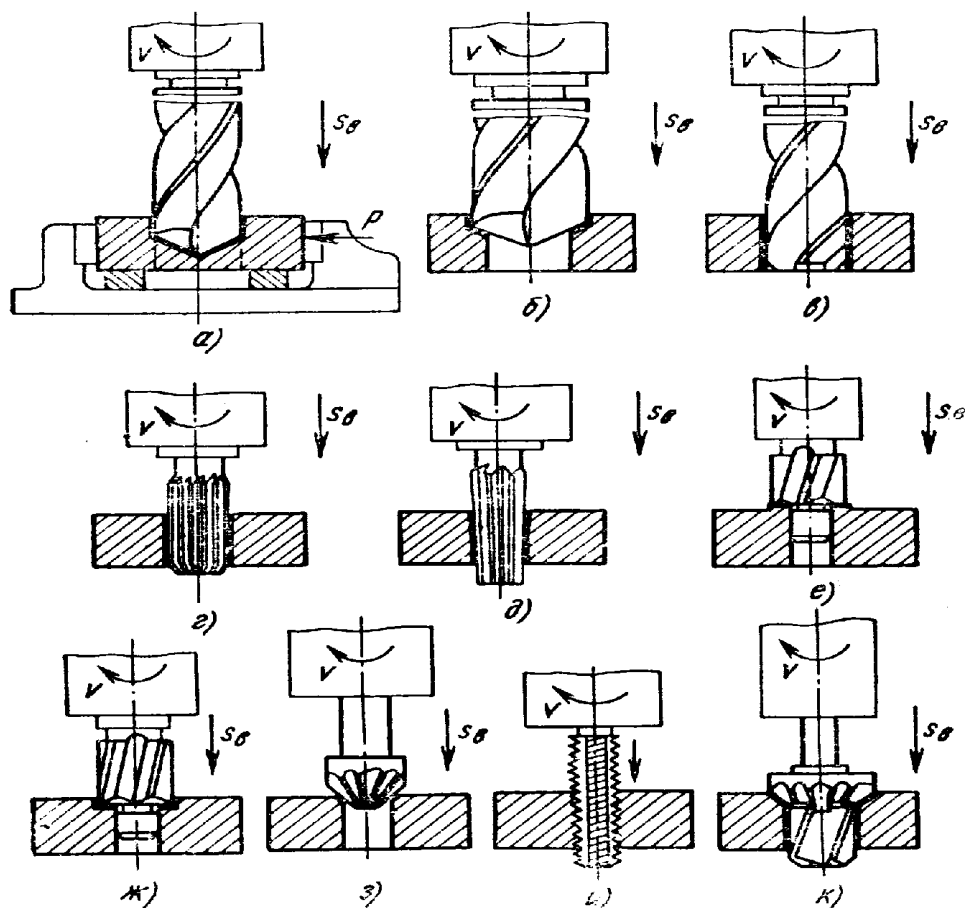


Рисунок 83 - Виды обработки заготовок на вертикально-сверлильных станках

3.4.3 Фрезерные работы

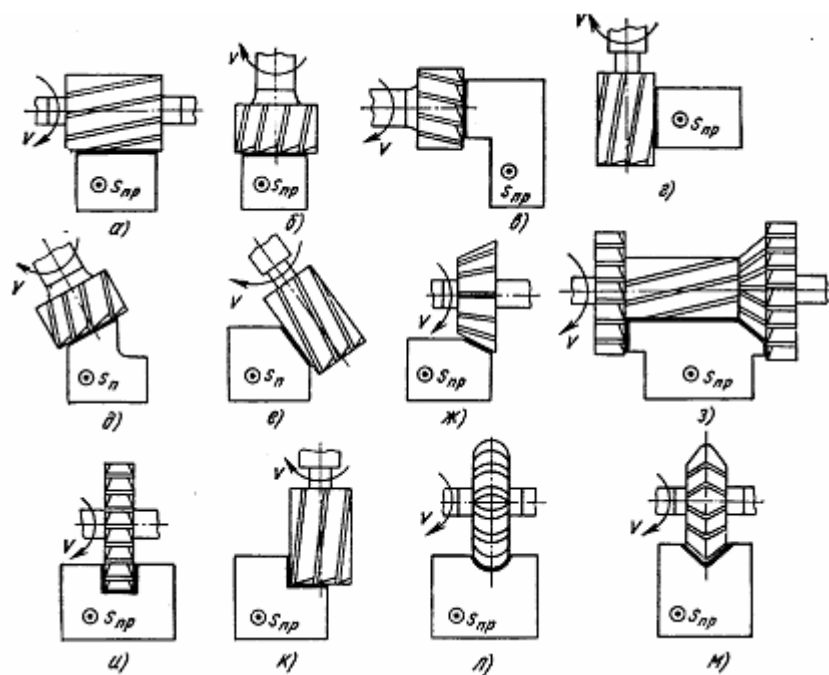
Фрезерование – процесс обработки заготовок с помощью многолезвийного инструмента – фрезы. Главное движение (вращение) совершает фреза, движение подачи (поступательное) – заготовка. Процесс высокопроизводителен, так как работает как бы множество резцов.

Режимы резания при фрезеровании определяются следующими параметрами:

- скорость резания $v = \pi D_{\text{фр}} n_{\text{фр}} / 1000$, м/мин. ($D_{\text{фр}}$ – диаметр фрезы, мм; $n_{\text{фр}}$ – частота вращения фрезы, об/мин.)
- $S_{\text{мин}}$ – минутная подача, мм/мин,
- глубина резания t , мм.
- ширина фрезерования B (ширина фрезы), мм.

При обозначении модели фрезерного станка первая цифра указывает номер группы – 6 (фрезерная), буква обозначает модернизацию станка, следующая цифра – тип станка, последняя цифра – номер стола (размер стола увеличивается при увеличении номера от 0 до 5), буква, которая может стоять после номера стола обозначает модификацию станка (6Н81Г; 6Р82; 6Н11; 6Н13). Например, 6Н82Г – горизонтально-фрезерный станок консольного типа, модернизированный, номер стола – 2, модифицированный; 6Н12 – вертикально-фрезерный станок консольного типа, модифицированный, номер стола – 2.

На рисунке 84 приведены виды операций, которые выполняются на горизонтально- и вертикально-фрезерных станках: а – фрезерование горизонтальной плоскости на горизонтально-фрезерном станке цилиндрической фрезой; б – фрезерование горизонтальной плоскости на вертикально-фрезерном станке торцевой фрезой; в – фрезерование вертикальной плоскости на горизонтально-фрезерном станке торцевой фрезой; г – фрезерование вертикальной плоскости на вертикально-фрезерном станке концевой фрезой; д – фрезерование наклонной плоскости торцевой фрезой на вертикально-фрезерном станке; е – фрезерование наклонной плоскости концевой фрезой; ж – фрезерование скоса на горизонтально-фрезерном станке одноугловой фрезой; з – фрезерование комбинированной поверхности набором фрез на горизонтально-фрезерном станке; и – фрезерование прямоугольных пазов и уступов дисковой фрезой на горизонтально-фрезерном станке; к – фрезерование уступов и прямоугольных пазов концевой фрезой на вертикально-фрезерном станке; л – фрезерование фасонного паза фасонной дисковой фрезой на горизонтально-фрезерном станке; м – фрезерование углового паза одноугловой и двухугловой фрезами на горизонтально-фрезерном станке; н – фрезерование паза типа «ласточкин хвост» концевой одноугловой фрезой на вертикально-фрезерном станке; о – фрезерование Т-образного паза на вертикально-фрезерном станке; п – фрезерование закрытых шпоночных пазов концевой шпоночной фрезой на вертикально-фрезерном станке; р – фрезерование открытого шпоночного паза концевой или шпоночной фрезой на вертикально-фрезерном станке; с – фрезерование шпоночного паза под сегментную шпонку дисковой фрезой на горизонтально-фрезерном станке; т – фрезерование фасонных поверхностей незамкнутого контура с криволинейной образующей на горизонтально- и вертикально-фрезерных станках.



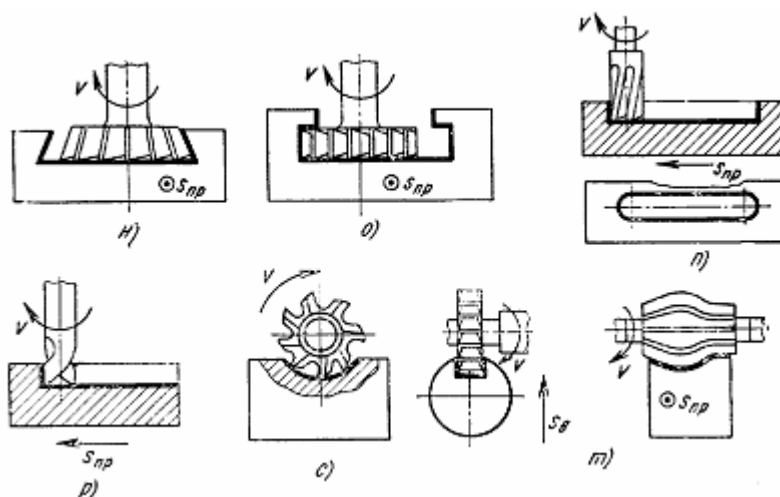


Рисунок 84 – Обработка заготовок на горизонтально- и вертикально-фрезерных станках

Контрольная работа №3.

В данной работе необходимо провести расчеты для получения изделия типа «колпачок» из плоской заготовки методом вытяжки без утонения стенок (см. раздел «Штамповка» и рисунок 75), необходимые формулы и пояснения даны далее по тексту.

- 3.1. Расшифровывать марку сплава (таблица 37).
- 3.2. Рассчитать диаметр заготовки D .
- 3.3. Рассчитать необходимое количество циклов вытяжки (переходов) для получения конечного изделия.
- 3.4. Определить усилие вытяжки P_n для каждого из переходов процесса.
- 3.5. Определить необходимость использования прижима для каждого из переходов процесса.
- 3.6. Результаты работы оформить в виде отчёта, в котором привести все формулы и расчеты, эскиз изделия типа «колпачок» со всеми размерами и эскиз его заготовки.
- 3.7. Ответить на теоретические вопросы согласно вариантам в таблице 38.

**Таблица 37 – Индивидуальные задания для выполнения
контрольной работы № 3**

1-я буква фамилии	№ варианта	Марка сплава	$\sigma_{в}$, МПа	$K_{в1}$, первая вытяжка	$K_{вп}$, последующие вытяжки	d , мм	H , мм	n , мм	r , мм	Отжиг
А	1	ЛС63-3	350	1,8	1,25	70	90	6	10	-
БВ	2	БрБ2	450	1,6	1,2	90	110	7	20	-
ГД	3	12Х14Н14В2М	570	1,8	1,4	70	90	1	15	+
ЕЁ	4	Сталь 15К	380	1,6	1,18	20	40	1	5	+
ЖЗ	5	АМг2	200	1,8	1,34	100	40	1	30	-
ИЛ	6	ЛС63-3	350	1,8	1,25	50	70	4	10	+
К	7	БрБ2	450	1,6	1,2	100	40	8	30	+
МН	8	12Х18Н12Т	560	1,7	1,3	40	60	6	5	+
ОП	9	Сталь 10Г2С1	520	1,6	1,18	40	60	3	5	-
РТ	10	АМг2	200	1,8	1,34	40	60	3	10	+
С	11	ЛС63-3	350	1,8	1,25	80	100	7	15	-
УФХ	12	БрБ2	450	1,6	1,2	110	90	9	30	-
ЦЧ	13	12Х14Н14В2М	570	1,8	1,4	60	80	2	5	+
ШЩ	14	Сталь 20	480	1,5	1,2	50	70	4	5	-
ЭЮЯ	15	ЛАЖ 60-1-1	420	1,7	1,5	40	40	5	5	+

Таблица 38 – Варианты вопросов к контрольной работе № 3

1-я буква фамилии	В-т	Теоретические вопросы:
А	1	1. Какие литейные сплавы Вы знаете? 2. Для какой обработки предназначен прямой проходной резец? 3. Расшифруйте марку сплава Т15К6. 4. Как называется инструмент для прокатки, для волочения? 5. Почему при ручной дуговой сварке для увеличения толщины свариваемых заготовок нельзя произвольно увеличивать сварочный ток?
БВ	2	1. Какими свойствами должны обладать литейные сплавы? 2. Для какой обработки предназначен проходной упорный резец? 3. Расшифруйте марку сплава Т30К4. 4. Какие преимущества имеет холодная обработка давлением? 5. Что относится к недостаткам автоматической сварки под слоем флюса?
ГД	3	1. Что такое опока и для чего она предназначена? 2. Для обработки каких поверхностей предназначен проходной резец с отогнутой головкой? 3. Расшифруйте марку сплава Т14К8. 4. Как называется вырез на боковой поверхности вала, для чего он нужен? 5. Почему при точечной сварке сварочная точка образуется в месте контакта двух заготовок?
ЕЁ	4	1. Для чего предназначены литейные стержни?

		<p>2. В каких случаях используют для обработки подрезной резец?</p> <p>3. Расшифруйте марку сплава ВК20.</p> <p>4. Что такое калибр?</p> <p>5. Почему при роликовой (шовной) сварке сварной шов образуется в месте контакта двух заготовок?</p>
ЖЗ	5	<p>1. При разработке чертежа модели для литья в песчаные формы предусматривают литейные уклоны. Зачем? Как определить их величину для данного изделия?</p> <p>2. В каких случаях используют для обработки подрезной резец?</p> <p>3. Расшифруйте марку сплава Т5К10.</p> <p>4. На чем прошивают заготовку для прокатки бесшовных труб (гильзу)?</p> <p>5. Какие методы относятся к сварке давлением? Сравните их.</p>
ИЛ	6	<p>1. Для чего служат галтели?</p> <p>2. Какие поверхности обрабатывают расточным проходным резцом?</p> <p>3. Расшифруйте марку сплава ВК10.</p> <p>4. Что такое протяжка?</p> <p>5. Какие методы относятся к сварке плавлением?</p>
К	7	<p>1. Что такое напуски и для чего они предназначены?</p> <p>2. Для какой обработки предназначен расточной упорный резец?</p> <p>3. Расшифруйте марку сплава ВК8.</p> <p>4. Как называется операция уменьшения высоты заготовки за счёт увеличения площади её сечения?</p> <p>5. Чему равна температура электрической дуги при электродуговой сварке?</p>
МН	8	<p>1. Для чего служат приливы?</p> <p>2. Что такое режим резания?</p> <p>3. Расшифруйте марку сплава ВК6.</p> <p>4. Как называется единая замкнутая полость открытого штампа?</p> <p>5. Как получают плазменную струю в плазмотроне, какова ее температура?</p>
ОП	9	<p>1. Что такое выпор и для чего он служит?</p> <p>2. Как совершаются вращательное и поступательное движения в сверлильных станках?</p> <p>3. Расшифруйте марку сплава Р9К5.</p> <p>4. При помощи какого инструмента осуществляется холодная листовая штамповка?</p> <p>5. Какую сварку необходимо применить для изготовления герметичных емкостей (морозильных камер) из тонколистового алюминия ($d = 1,5$ мм) и почему?</p>
РТ	10	<p>1. После формирования оболочковой формы, ее нагревают в печи. Зачем?</p> <p>2. Как совершаются вращательное и поступательное движения в сверлильных станках?</p> <p>3. Расшифруйте марку сплава Р10К5Ф3.</p> <p>4. Что такое вырубка и пробивка?</p> <p>5. Что относится к преимуществам газовой сварки?</p>
С	11	<p>1. Для чего прокаливают форму при литье по выплавляемым моделям?</p> <p>2. Какую обработку осуществляют на сверлильном станке, в чем она заключается?</p> <p>3. Расшифруйте марку сплава Р9М4К8.</p> <p>4. Что является заготовкой при изготовлении сортового проката.</p> <p>5. Какие функции выполняет обмазка электрода?</p>
УФ Х	12	<p>1. Какой операции подвергают отливку для удаления остатков формовочной смеси с поверхности при литье по выплавляемым моделям?</p> <p>2. Какую обработку осуществляют на токарных станках, в чем она заклю-</p>

		чается? 3. Расшифруйте марку сплава Р6М5К5. 4. Как называется процесс горячей обработки металлов давлением, при котором металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие, соответствующее сечению получаемого профиля? 5. Как получают плазму при плазменной сварке?
ЦЧ	13	1. Что является недостатком литья под высоким давлением? 2. В чем заключается обработка резанием? 3. Расшифруйте марку сплава Р6М5. 4. Что относится к недостаткам прессования? 5. Какие защитные газы используются при газозащитной сварке?
Ш Щ	14	1. Как удаляются газы из полости кокиля и из полости формы при литье под высоким давлением? 2. Что является характерным размером сверлильного станка? 3. Расшифруйте марку сплава Р12. 4. Что является инструментом для обработки металлов ковкой? 5. Какие методы сварки используются в серийном и массовом производстве?
ЭЮ Я	15	1. Какие методы относятся к литью в металлические формы? 2. В чем заключается фрезерование, какие поверхности можно обрабатывать фрезой? Приведите несколько примеров. 3. Расшифруйте марку сплава Р9. 4. С каким нежелательным эффектом приходится бороться при обработке металлов волочением? 5. Какие виды электрической контактной сварки Вы знаете? Сравните их.

Пояснение к решению задания к.р. №3

Определение размера заготовки при вытяжке

Теоретически правильным условием для определения диаметра заготовки является равенство объемов детали и заготовки. При вытяжке без утонения стенок толщина заготовки практически не изменяется, поэтому диаметр заготовки может быть определен из условия равенства площадей поверхности заготовки и изделия.

Площадь поверхности детали типа тела вращения любой формы определяется уравнением: $F = 2\pi r l$, где r – расстояние центра тяжести тела до оси вращения; l – длина образующей этого тела. Деталь, которую необходимо получить методом вытяжки без утонения стенок из круглой заготовки (рисунок 85), делим на три части.

1. Первая часть (пустотелый цилиндр) образуется при вращении вокруг оси симметрии участка с длиной образующей $l_1 = H - (r + n)$; радиус вращения (расстояние от оси симметрии до образующей) $r_1 = d/2 + n/2$, где n – толщина стенки изделия.

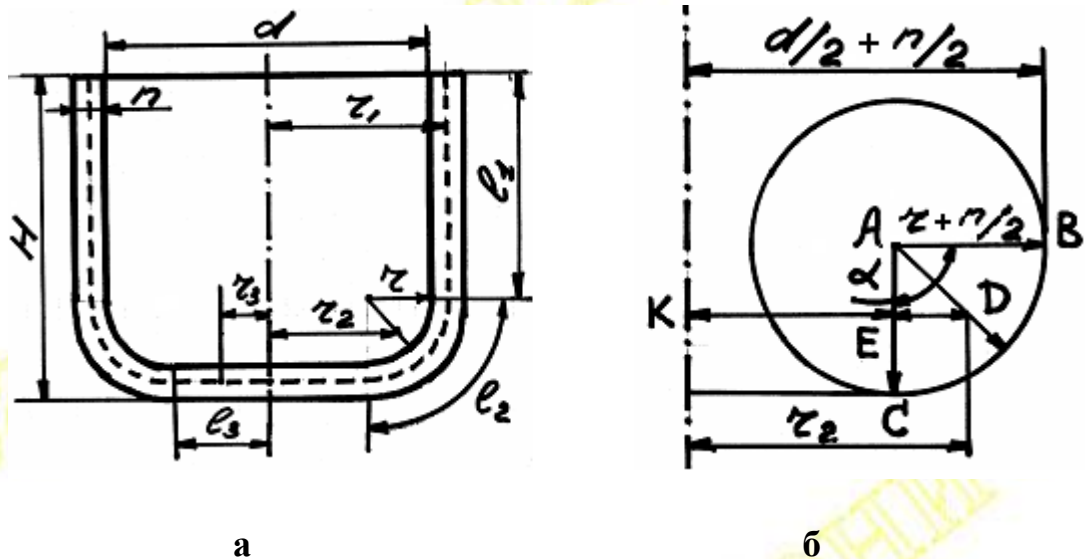
2. Вторая часть образуется при вращении вокруг оси участка с длиной образующей $l_2 = 2\pi(r + n/2)/4$ (четверть длины окружности радиуса $r + n/2$).

Для нахождения радиуса вращения r_2 необходимо определить положение центра тяжести дуги, соответствующей углу α окружности радиуса $r + n/2$ (рисунок 85б). Расстояние $AD = (r + n/2) \sin \alpha / \alpha$, где угол α приведён в радианах. В нашем случае $\alpha = 90^\circ = \pi/2$. Длина отрезка $ED = \sin 45^\circ \times (r + n/2) \sin \alpha / \alpha$. $KE = d/2 - r$.

Таким образом $r_2 = KE + ED = (d/2 - r) + \sin 45^\circ \times (r + n/2) \sin \alpha / \alpha$.

3. Третья часть (донышко) образуется при вращении вокруг оси участка с длиной образующей $l_3 = d/2 - r$. Радиус вращения $r_3 = (d/2 - r)/2$.

Общая площадь поверхности изделия $F = 2\pi (r_1 l_1 + r_2 l_2 + r_3 l_3)$, а диаметр заготовки $D = \sqrt{4F/\pi}$.



а - размеры детали; б - определение радиуса вращения r_2

Рисунок 85 – Вид и параметры изготавливаемой детали

Определение усилия вытяжки

На первом этапе расчётов необходимо определить можно ли данное изделие получить с помощью одной вытяжки или необходимо применять глубокую вытяжку, т.е. проводить несколько последовательных циклов вытяжки. Для этого определяют безразмерный коэффициент вытяжки $K_v = D/d$, где D – диаметр заготовки, d – диаметр изделия. Коэффициент вытяжки – это мера величины деформации, чем больше K_v , тем сильнее изменяется форма заготовки, тем большие напряжения в ней возникают. Глубокую вытяжку (т.е. несколько последовательных циклов вытяжки) применяют, когда K_v больше рекомендуемого значения величины K_{v1} (коэффициента вытяжки для первого перехода вытяжки) для данного материала (таблица 37), поскольку в противном случае заготовка разрушится в процессе вытяжки.

Если установлено, что для получения конечного изделия требуется проводить несколько циклов вытяжки, необходимо определить количество этих циклов. Для этого сначала определяют диаметр полуфабриката, который будет получен после первой вытяжки: $D_1 = D / K_{v1}$. Эта операция повторяется до тех пор, пока диаметр изделия не станет равным или меньше требуемого:

$$D_2 = D_1 / K_{вп} \dots\dots D_n = D_{n-1} / K_{вп}.$$

$K_{вп}$ – коэффициент вытяжки для последующих вытяжек, он значительно меньше $K_{в1}$, т.к. после первой вытяжки материал теряет пластичность и соответственно способность к деформации (см. наклеп). Таким образом, определяется необходимое количество циклов вытяжки.

Далее определяют необходимость прижима (рисунок 75) для каждого из циклов вытяжки. Прижим применяют для предотвращения образования складок в процессе деформации. Складки могут образовываться на любой стадии вытяжки, если $(D_{n-1} - D_n) > (18 \div 20) n$.

Затем для каждого из циклов вытяжки определяют необходимое усилие вытяжки $P_n = \pi \times \sigma_v \times n \times (D_{n-1} - D_n) \times b$, (Н); где σ_v – предел прочности, Па; n – толщина заготовки, м; b – коэффициент, который для первого перехода вытяжки равен 1,2. При холодной деформации металл упрочняется из-за наклепа, поэтому если рекристаллизационный отжиг не используется, то на последующих переходах b повышается до 2,5 (требуется большее усилие при штамповке). Если заготовку подвергнуть рекристаллизационному отжигу, то на последующих переходах $b = 1,5$.

Следует отметить, что для последнего цикла вытяжки, в результате которого необходимо получить конечное изделие, $D_n = d$.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Дано:

Вариант	Марка сплава	σ_v , МПа	$K_{в1}$, первая вытяжка	$K_{вп}$, последующие вытяжки	d , мм	H , мм	n , мм	r , мм	Отжиг при глубокой вытяжке
17	ЛАН59-3-2	500	1,8	1,3	100	40	1	30	+
18	БрАЖ9-4	600	2,0	1,5	40	100	4	5	-

Вариант №17

1. Сплав – специальная латунь, содержащая $\approx 59\%$ меди, $\approx 3\%$ алюминия, $\approx 2\%$ никеля, остальное – цинк.

2. $l_1 = 40 - (30 + 1) = 9$ (мм) $r_1 = 100/2 + 1/2 = 50,5$ (мм)

$$l_2 = \frac{2\pi(30 + 1/2)}{4} = 47,9 \text{ (мм)}$$

$$r_2 = KE + ED = (100/2 - 30) + \frac{0,71(30 + 1/2) \times 1}{\pi/2} = 33,8 \text{ (мм)}$$

$$l_3 = 100/2 - 30 = 20 \text{ (мм)} \quad r_3 = \frac{100/2 - 30}{2} = 10 \text{ (мм)}$$

$$F = 2\pi(9 \times 50,5 + 47,9 \times 33,8 + 20 \times 10) = 14\,277,7 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 14277,7}{\pi}} = 134,9 \text{ (мм)}$$

3. $K_B = 134,9/100 = 1,35$. Так как $K_B < K_{B1}$ ($1,35 < 1,8$), то требуется только одна вытяжка.

4. Необходимое усилие вытяжки:

$$P = \pi \times 500 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-3} (134,9 - 100) \times 10^{-3} \times 1,2 = 65751,6 \text{ Н} \approx 65,8 \text{ кН}$$

5. $D - d = 134,9 - 100 = 34,9 \text{ мм}$; $20n = 20 \text{ мм}$. Т.к. $D - d > 20n$, то необходим прижим.

Вариант № 18

1. Сплав – бронза, содержащая алюминия $\approx 9\%$, железа $\approx 4\%$, остальное – медь.

2. $l_1 = 100 - (5 + 4) = 91 \text{ (мм)}$ $r_1 = 40/2 + 4/2 = 22 \text{ (мм)}$

$$l_2 = \frac{2\pi(5 + 4/2)}{4} = 11 \text{ (мм)}$$

$$r_2 = KE + ED = (40/2 - 5) + \frac{0,71(5 + 4/2) \times 1}{\pi/2} = 18,2 \text{ (мм)}$$

$$l_3 = 40/2 - 5 = 15 \text{ (мм)} \quad r_3 = \frac{40/2 - 5}{2} = 7,5 \text{ (мм)}$$

$$F = 2\pi(22 \times 91 + 18,2 \times 11 + 7,5 \times 15) = 13971,1 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 13971,1}{\pi}} = 133,4 \text{ (мм)}$$

3. $K_B = 133,4/40 = 3,34 > K_{B1}$: за один цикл вытяжки готовое изделие получить нельзя, следовательно надо применять глубокую вытяжку.

$$D_1 = D/K_{B1} = 133,4/2 = 66,7 \text{ (мм)}; D_2 = D_1/K_{Bn} = 66,7/1,5 = 44,5 \text{ (мм)}.$$

$D_3 = D_2/K_{Bn} = 44,5/1,5 = 29,7 \text{ (мм)}$ - для получения готового изделия требуется три вытяжки.

4 и 5. $P_1 = \pi \times 600 \times 10^6 \times 4 \times 10^{-3} \times (133,4 - 66,7) \times 10^{-3} \times 1,2 = 603181 \text{ Н} \approx 603,2 \text{ кН}$.

$$D - D_1 = 133,4 - 66,7 = 66,7 \text{ мм}; \quad 20n = 80 \text{ мм} \quad 66,7 < 80, \text{ прижим не нужен.}$$

$$P_2 = \pi \times 600 \times 10^6 \times 4 \times 10^{-3} \times (66,7 - 44,5) \times 10^{-3} \times 2,5 = 418248 \text{ Н} \approx 418,2 \text{ кН}.$$

$$D_1 - D_2 = 66,7 - 44,5 = 22,2 \text{ мм}; \quad 22,2 < 80, \text{ следовательно, прижим не нужен.}$$

$$P_3 = \pi \times 600 \times 10^6 \times 4 \times 10^{-3} \times (44,5 - 40) \times 10^{-3} \times 2,5 = 84780 \text{ Н} \approx 84,8 \text{ кН}.$$

$$D_2 - d = 44,5 - 40 = 4,5 \text{ мм}. \quad 5,3 < 80, \text{ следовательно, прижим не нужен.}$$

Вопросы для подготовки к экзамену

1. Материаловедение – определение и объект изучения науки. Классификация материалов.
2. Природа химической связи и свойства кристаллов.
3. Типы кристаллических решеток, координационные числа, связь с плотностью и другими свойствами кристаллов.
4. Типы дефектов в кристаллах. Влияние дефектов на прочность.
5. Кристаллизация металлов и сплавов.
6. Упругая и пластическая деформация. Наклеп.
7. Влияние нагрева на структуру и свойства металла.
8. Механические свойства материалов и способы их измерения.
9. Правило фаз Гиббса. Правило отрезков. Пример применения.
10. Начертить двухкомпонентную диаграмму состояния для сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии. Описать точки, линии, фазы и области на диаграмме.
11. Начертить двухкомпонентную диаграмму состояния для сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Описать точки, линии, фазы и области на диаграмме.
12. Начертить двухкомпонентную диаграмму состояния для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Описать точки, линии, фазы и области на диаграмме.
13. Начертить двухкомпонентную диаграмму состояния для сплавов с образованием компонентами в твердом состоянии химического соединения. Описать точки, линии, фазы и области на диаграмме.
14. Дать определения и описать свойства феррита, аустенита, цементита. Как на их свойства влияет легирование.
15. Термические обработки: закалка и отпуск. Определение, зачем применяются. Как и почему при этом изменяются свойства.
16. Термическая обработка: отжиг. Определение, виды, зачем применяется. Как и почему при этом изменяются свойства.
17. Химико-термическая обработка. Цементация. Азотирование.
18. Углеродистые стали. Влияние углерода и примесей на свойства сталей.
19. Конструкционные легированные стали. Маркировка, влияние легирующих элементов на свойства.
20. Нержавеющие, жаростойкие, жаропрочные стали.
21. Инструментальные материалы. Углеродистые и легированные инструментальные стали.
22. Инструментальные материалы. Твердые сплавы. Абразивный материал.
23. Закалка и старение алюминиевых сплавов. Определение, зачем применяются. Как и почему при этом изменяются свойства.
24. Деформируемые алюминиевые сплавы неупрочняемые и упрочняемые термообработкой. Маркировка, состав, структура, свойства, применение.
25. Спеченные алюминиевые порошки. Маркировка, структура, состав, свойства, применение.

- 26.Литейные алюминиевые сплавы. Марки, структура, состав, свойства, применение.
- 27.Латуни. Маркировка, состав, свойства, применение.
- 28.Бронзы. Маркировка, состав, свойства, применение.
- 29.Титановые сплавы. Маркировка, состав, структура, свойства, применение.
- 30.Электротехнические материалы.
- 31.Композиционные материалы.
- 32.Пластические массы. Резины.
- 33.Клеи. Лакокрасочные материалы.
- 34.Показатели коррозионной стойкости.
- 35.Внутренние факторы, влияющие на коррозию.
- 36.Внешние факторы, влияющие на коррозию.
- 37.Водородная коррозия, коррозия под действием сернистых соединений. Методы защиты.
- 38.Газовая коррозия стали и чугуна под действием кислорода. Методы защиты.
- 39.Механизм электрохимической коррозии. Факторы ускоряющие и замедляющие электрохимическую коррозию.
- 40.Атмосферная коррозия. Методы защиты.
- 41.Подземная коррозия. Методы защиты.
- 42.Методы защиты от коррозии.
- 43.Точечная и межкристаллитная коррозия. Методы защиты.
- 44.Основные литейные сплавы и требования к ним.
- 45.Получение изделий литьем. Литье в песчаные формы.
- 46.Виды и особенности литья в металлические формы.
- 47.Операции по изготовлению отливки.
- 48.Получение изделий литьем. Литье в оболочковые формы.
- 49.Получение изделий литьем. Литье по выплавляемым моделям.
- 50.Основы обработки металлов давлением. Прокатка, сортамент проката.
- 51.Обработка металлов давлением: прессование, волочение.
- 52.Обработка металлов давлением: ковка, штамповка.
- 53.Виды и особенности сварки плавлением.
- 54.Виды и особенности сварки давлением.
- 55.Пайка – определение, достоинства и недостатки, виды припоев, флюсы.
- 56.Принципы обработки металлов резанием. Основные движения. Инструментальные материалы и требования к ним.
- 57.Токарные работы, сверление, фрезерование – для чего применяются, режимы резания, инструменты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко Г.Г., Кабанова Т.А., Рыбалко В.В. Материаловедение. – М.: Высшая школа, 2007, – 448с.
2. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высшая школа, 2006, – 862с.
3. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов. Справочник. Под редакцией Буранчикова В.И. – М.: Машиностроение, 1990г., – 400с.
4. Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в коррозионных средах химических производств. – Л.: ЛТИ им.Ленсовета, 1985, – 76 с.
5. Мозберг Р.К. Материаловедение. – М.: ВШ, 1991, – 448 с.
6. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение. – СПб.: Химиздат, 2004, – 735с.
7. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов. – М.: Высшая школа, 2007, – 544с.
8. Зоткин В.Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении. – М.: Высшая школа, 2004, – 264с.
9. Шишкин А.В., Чередниченко В.С., Черепанов А.Н., Марусин В.В. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учебное пособие. – М.: Омега –Л, 2008, - 752 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	3
1.1 Классификация материалов.....	3
1.2 Природа химической связи и строение твердых веществ	4
1.3 Кристаллизация металлов.....	4
1.4 Диффузионные процессы в металле.....	6
1.5 Дефекты кристаллической решетки.....	11
1.6 Механические свойства металлов.....	15
1.7 Наклеп.....	18
1.8 Двухкомпонентные диаграммы состояния (диаграммы состояния для двойных сплавов).....	22
1.9 Диаграмма равновесного состояния железо-углерод.....	29
1.10 Виды термической обработки.....	32
1.11 Конструкционные стали.....	40
1.12 Инструментальные материалы.....	51
1.13 Алюминий и сплавы на его основе.....	56
1.14 Медь и сплавы на ее основе.....	69
1.15 Сплавы на основе титана.....	81
1.16 Электротехнические материалы.....	87
1.17 Композиционные материалы.....	91
1.18 Неметаллические материалы.....	96
Контрольная работа № 1	101
2 КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ	110
2.1 Виды коррозионных разрушений.....	110
2.2 Показатели коррозионной стойкости.....	110
2.3 Внутренние факторы, влияющие на коррозию.....	111
2.4 Внешние факторы, влияющие на коррозию.....	111
2.5 Химическая коррозия.....	113
2.6 Электрохимическая коррозия.....	114
2.7 Методы защиты металлов от коррозии.....	121
Контрольная работа №2.....	124
3 ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	132
3.1 Литейное производство.....	132
3.1.1 Классификация методов литья.....	132
3.1.2 Литье в одноразовые формы.....	132
3.1.3 Литье в металлические формы.....	138
3.2 Сварочное производство.....	142
3.2.1 Классификация методов сварки.....	142
3.2.2 Сварка плавлением.....	142
3.2.3 Сварка давлением.....	148
3.2.4 Пайка.....	151
3.3 Обработка металлов давлением.....	151
3.3.1 Прокатное производство.....	152
3.3.2 Ковка.....	154
3.3.3 Штамповка.....	156
3.3.4 Прессование.....	162
3.3.5 Волочение.....	163
3.4 Обработка металлов резанием.....	164
3.4.1 Токарные работы.....	165

3.4.2 Сверильные работы.....	167
3.4.3 Фрезерные работы.....	168
Контрольная работа № 3.....	170
Вопросы для подготовки к экзамену.....	177
ЛИТЕРАТУРА	179

Кафедра теоретических основ материаловедения

Учебное пособие

Материаловедение. Технология конструкционных материалов

Максим Максимович Сычев
Виктор Николаевич Коробко
Светлана Ивановна Гринева
Татьяна Владимировна Лукашова
Сергей Владимирович Мякин
Вадим Владимирович Бахметьев

Отпечатано с оригинал-макета. Формат 60×90 1/16

Печ. л. п.л. Тираж 100 экз. Заказ №

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
ИК “Синтез”

190013 СПб., Московский пр., 26.