

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФГАОУ ВО «Российский государственный  
профессионально-педагогический университет»

Б. Н. Гузанов, В. В. Бухаленков

# **Краткий курс по материаловедению и технологии конструкционных материалов**

Учебное пособие для профессионально-педагогических  
образовательных организаций

Екатеринбург  
РГППУ  
2017

УДК 669.018.29+621.7/.9](075.8)

ББК ЖЗя73-1+К5я73-1

Г93

Гузанов, Борис Николаевич.

Краткий курс по материаловедению и технологии конструкционных материалов: учебное пособие / Б. Н. Гузанов, В. В. Бухаленков. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2017. 2017. 208 с.

ISBN

В учебном пособии изложены основы материаловедения и технологии изготовления заготовок и деталей машин из металлических и неметаллических материалов, классификация и правила маркировки конструкционных и машиностроительных материалов.

Предназначено для высшего профессионально-педагогического образования для подготовки бакалавров по направлению 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), а также направлениям 15.03.01 Машиностроение и 22.03.02 Metallургия.

УДК 669.018.29+621.7/.9(075.8)

ББК ЖЗя73-1+К5я73-1

Рецензенты: доктор технических наук, профессор А. А. Попов (ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»), доктор технических наук, профессор О. С. Лехов (ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»).

ISBN

© ФГАОУ ВО «Российский  
государственный профессионально-  
педагогический университет», 2017

© В.В. Бухаленков, 2017

© Б.Н. Гузанов, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
---------------	---

### Раздел первый

#### Основы металлургического производства

1. Сущность и способы металлургического производства.....	7
2. Исходные материалы для металлургического производства.....	9
3. Технология выплавки чугуна.....	12
3.1. Подготовка руд к плавке.....	12
3.2. Устройство доменной печи и ее работа.....	13
3.3. Физико-химические процессы, происходящие в доменной печи.....	16
3.4. Продукты доменной плавки и технико-экономические показатели производства чугуна.....	19
4. Технология выплавки стали.....	20
4.1. Физико-химические процессы при выплавке стали.....	20
4.2. Способы выплавки стали.....	23
5. Способы разливки стали.....	31
6. Особенности производства цветных металлов и сплавов.....	33
6.1. Последовательность получения меди.....	35
6.2. Получение титана.....	37
6.3. Получение алюминия и магния.....	41

### Раздел второй

#### Основы получения металлических заготовок

7. Технология литейного производства.....	43
8. Технология обработки металлов давлением.....	56
9. Технологические основы сварочного производства.....	65
10. Основы размерной обработки заготовок деталей машин.....	72

## Раздел третий

### Основы технологии производства заготовок и деталей машин из неметаллических материалов

11. Особенности строения и классификация неметаллических материалов.....	80
12. Полимеры и их классификация.....	82
13. Технология производства изделий из пластмасс.....	85
14. Резины и детали из неё.....	88
15. Композиционные материалы и их применение.....	90

## Раздел четвертый

### Теоретическое материаловедение

16. Строение и свойства чистых металлов.....	94
17. Кристаллизация металлов и сплавов.....	104
18. Полиморфные и магнитные превращения в металлах.....	107
19. Пластическая деформация и разрушение металлов и сплавов. Механические свойства.....	110
20. Фазы в сплавах.....	124
21. Диаграммы состояния двойных систем.....	129
22. Железо и его сплавы. Диаграмма состояния Fe-C(Fe <sub>3</sub> C).....	138

## Раздел пятый

### Практическое материаловедение

23. Элементы теории термической обработки стали.....	149
24. Технология термической обработки.....	165
25. Технология химико-термической обработки.....	168
26. Классификация и правила маркировки сталей.....	181
27. Классификация и правила маркировки цветных металлов и их сплавов.....	192
Заключение.....	203
Список литературы.....	204

## **ВВЕДЕНИЕ**

Материаловедение и технология конструкционных материалов (ТКМ) относятся к числу основополагающих учебных дисциплин отраслевой (общетехнической) подготовки инженерных специальностей. Это обусловлено тем, что современный уровень производства во многом определяется применением новых экономических и технологических материалов, что в конечном итоге определяет научно-технический и экономический потенциал страны.

### **Цели изучения данной дисциплины:**

- познание природы машиностроительных и конструкционных материалов, изучение их свойств в зависимости от химического состава, структуры и последующей обработки;

- ознакомление с традиционными и новыми технологическими процессами получения металлических и неметаллических материалов, а также технологиями получения заготовок и готовых изделий, в том числе с последующим восстановлением и ремонтом.

### **Задачами изучения дисциплины являются:**

- ознакомление с современными конструкционными материалами машиностроения, их наиболее характерными свойствами и классификацией;

- изучение физико-химических основ и технологии процессов производства конструкционных материалов;

- ознакомление с основными способами получения заготовок и изделий из конструкционных материалов;

- формирование умения выбора вида заготовки или полуфабриката, рационального способа их получения, исходя из формы конечного изделия, его назначения и условий эксплуатации.

Технология конструкционных материалов включает четыре основных **вида**:

1 – металлургическое производство, предназначенное для получения металла заданного состава;

- 2 – технология получения металлических заготовок (литейное производство, обработка металлов давлением, сварочное производство);
- 3 – механическая обработка для получения из заготовок изделий заданных размеров и внешней формы;
- 4 – термическая обработка, предназначенная для получения заданных свойств металлов и сплавов (прочности, износостойкости и т.п.).

Многие конструкции и детали машиностроения выполняют из неметаллических и композиционных материалов. Прежде всего, это железобетонные плиты для строительства зданий, в которых бетон (неметаллический материал) армирован стальными прутками для придания конструкции максимальной прочности. Технология изготовления таких конструкций имеет свои особенности, которые рассматривает данная дисциплина.

## Раздел первый

### Основы металлургического производства

#### 1 Сущность и способы металлургического производства

**Металлургия** – это наука о промышленных способах получения металлов и их сплавов из природного сырья. Современное металлургическое производство представляет собой сложный комплекс различных предприятий, базирующийся на месторождении руд, коксующихся углей, энергетических мощностях. Оно включает в себя следующие предприятия:

- 1 – шахты, карьеры по добыче руд и каменных углей;
- 2 – горно-обогатительные комбинаты, где подготавливают руды к плавке (обогащают);
- 3 – коксохимические заводы или цехи, где готовят угли, коксуют их и извлекают полезные химические продукты;
- 4 – энергетические цехи для получения сжатого воздуха, кислорода, очистки газов металлургических производств;
- 5 – доменные цеха для выплавки чугуна и ферросплавов;
- 6 – заводы для производства ферросплавов;
- 7 – сталеплавильные цехи (конверторные, мартеновские, электросталеплавильные);
- 8 – прокатные цехи, где слитки перерабатывают в сортовой прокат (балки, рельсы, проволоку, лист и т.д.).

Основа современной черной металлургии – **двухступенчатая схема**, включающая доменную выплавку чугуна и передела его в сталь. При доменной плавке происходит избирательное восстановление железа из руды, а также восстановление фосфора, марганца и кремния, науглероживание железа и частичное насыщение его серой, т.е. образуется чугун – сплав железа с углеродом, кремнием, марганцем, серой и фосфором. Передел чугуна в сталь производят в конверторах,

мартеновских и электрических печах. При этом происходит избирательное окисление примесей чугуна, которые переходят в шлак и газы.

Основной продукцией металлургического производства являются следующие продукты:

1) **чугун переделный** для производства сталей, **чугун литейный** для производства отливок, железорудные **металлизированные окатыши** для выплавки стали, **ферросплавы** (сплавы железа с Mn, Si, V, Ti и др.), предназначенные для выплавки легированных сталей, **стальные слитки** для производства сортового проката и стальные слитки для крупных поковок в **черной металлургии**;

2) **слитки цветных металлов** для сортового проката, слитки для производства отливок, **лигатуры** – сплавы цветных металлов с легирующими элементами, необходимые для производства сложных легированных сплавов для отливок, слитки чистых и особо чистых цветных металлов для нужд электротехники и электроники в **цветной металлургии**.

В черной и цветной металлургии для получения металлических материалов в зависимости от вида используемой энергии выделяют следующие процессы:

1. **Пирометаллургический процесс** основан на том, что энергия или тепло, необходимое для выплавки, получают за счет сжигания жидкого, твердого или газообразного топлива.

2. **Электрометаллургический процесс** основан на том, что тепло для выплавки получают в дуговых, индукционных и других электропечах.

3. **Гидрометаллургический процесс** основан на получении металлов из руд путем выщелачивания и последующего выделения металлов из раствора без нагревания до высоких температур.

4. **Химикометаллургический процесс** основан на получении металлов в результате последовательно протекающих химических реакций и металлургических взаимодействий.

## 2 Исходные материалы для металлургического производства

Для производства чугуна, стали и цветных металлов используют руду, флюсы, топливо и огнеупорные материалы. В природе большинство металлов находятся в связанном виде, в виде химических соединений, которые входят в состав минералов, образующих руды или горные породы.

**Промышленной рудой** называют горную породу, из которой при данном уровне техники экономически выгодно и целесообразно извлекать металлы или их соединения.

Руда состоит из минералов, содержащих металл (окислов и гидроокисей), силикатов, карбонатов, сернистых соединений), и пустой породы (окислов кремния, алюминия, кальция и магния). Руды называют по одному или нескольким металлам, которые входят в их состав. Например, железные, медные, медно-никелевые и т. д. Целесообразность извлечения металлов из руды определяется их содержанием в руде. Например, для железных руд – не менее 30-50 % Fe, для медных – не менее 3-5 % Cu, для молибденовых – не менее 0,005 – 0,02 % Mo.

В зависимости от концентрации добываемого металла, руды бывают богатыми, которые сразу используют в металлургическом производстве, и бедные, которые поступают в металлургическое производство после обогащения или удаления пустой породы. После обогащения получают концентрат или продукт с повышенным содержанием металла по сравнению с исходной рудой.

Железные руды содержат железо в различных соединениях: в виде оксидов  $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$ ; гидроксидов  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ , карбонатов  $FeCO_3$  и др., а также пустую породу, состоящую в основном из оксидов  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  и др. К железным рудам относятся магнитный железняк  $Fe_3O_4$  (55 – 60 % Fe), красный железняк  $Fe_2O_3$  (55 – 60 % Fe), бурый железняк, содержащий гидраты оксидов железа  $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$  и  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$  (37 – 55 % Fe); шпатовые железняки, содержащие  $FeCO_3$  (30–40 % Fe).

Кроме железной руды используют марганцевые руды для выплавки ферромарганца (10 – 82 % Mn), а также передельных чугунов, содержащих до 1 % Mn.

Марганец в рудах содержится в виде оксидов и карбонатов. Хромовые руды используют для выплавки феррохрома, металлического хрома и огнеупорных материалов – хромомagneзитов. Комплексные руды, содержащие никель, ванадий, кобальт используют для выплавки легированного чугуна.

**Топливо** – это органические соединения, которые выделяют при сжигании тепло, необходимое для поддержания металлургического процесса. В металлургических печах топливом являются кокс, природный газ, мазут, доменный (колошниковый) газ. **Кокс** получают в коксовых печах сухой перегонкой каменного угля коксующихся сортов при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  (без доступа воздуха). Угольная масса при коксовании размягчается и из нее начинают выделяться газообразные продукты, затем она спекается в пористую массу. При выделении газов масса растрескивается и распадается на куски. Длительность коксования 14-16 часов. Затем кокс выталкивают из печи и сушат водой.

Важным показателем качества кокса является зольность и содержание серы, которые должны быть минимальны. Оптимальный размер кусков кокса – 25-60 мм. Кокс должен быть достаточно прочным, чтобы не разрушаться под действием массы шихтовых материалов в доменной печи.

При доменной плавке часть кокса заменяют природным газом, который содержит 90 – 98 % углеводородов ( $\text{CH}_4$  – метан,  $\text{C}_2\text{H}_6$  - пропан), мазутом (тяжелый остаток крекинга нефти, содержит до 85 % углерода и водород с малым количеством серы и фосфора), доменным газом (побочный продукт доменного производства) или пылевидным топливом. Эти виды топлива создают восстановительную атмосферу в печи, что приводит к экономии кокса.

**Флюс** – это материал, загружаемый в плавильную печь для образования легкоплавких соединений с пустой породой руды, концентрата, золой топлива. Эти соединения называют **шлаком**. Назначение флюса: 1 – удаление окислов пустой породы; 2 – удаление золы топлива; 3 – удаление вредных примесей (серы, фосфора).

Шлак имеет меньшую плотность, чем металл, поэтому в печи располагается над металлом и не перемешивается с ним. Назначение шлака – защита металла от печных газов воздуха. Шлак называют кислым, если в его составе кислые окислы ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), и основным – если основные ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ). При высоких температурах рабочего пространства печи шлаки могут взаимодействовать с футеровкой печи: основная футеровка с кислым шлаком и наоборот. Для предотвращения разрушения футеровки в печи с основной футеровкой вводят основные флюсы, с кислой – кислые. Выбор флюсов определяется также составом пустой породы руды. Если пустая порода представляет из себя песчано-глинистую, то в качестве флюса используют  $\text{CaCO}_3$  или даломит. В случае известковой пустой породы в качестве флюса применяют кварцит и другие песчаные составы, главным образом, на основе  $\text{SiO}_2$ .

Изменяя состав шлака, можно менять соотношение примесей между металлом и шлаком, т.е. удалять нежелательные примеси (серу и фосфор) из этого шлак металла в шлак. Для этого убирают шлак с поверхности металла и добавляют новый нужного состава.

**Огнеупорные материалы** применяют для внутренней облицовки (футеровки) печей и ковшей для разливки. Основное требование – выдерживать нагрузки при высоких температурах, а также резкие перепады температур, химическое воздействие шлаков и печных газов. Огнеупорность материала определяется в  $^{\circ}\text{C}$ . Обычно в качестве футеровки используют кирпичи, а также порошки или растворы, предназначенные для заполнения швов между кирпичами в кладке. По химическим свойствам огнеупорные материалы подразделяются на кислые, основные и нейтральные.

**Кислые (динасовые, кварцеглинистые)** – на основе кремнезема  $\text{SiO}_2$ . Содержат не менее 90 %  $\text{SiO}_2$  и имеют огнеупорность до 1700  $^{\circ}\text{C}$ .

**Основные (магнезитовые, магнезитохромитовые, доломитовые)** – на основе основных окислов  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ . Магнезитовый кирпич содержит до 95 %  $\text{MgO}$  и его огнеупорность достигает 2000 – 2400  $^{\circ}\text{C}$ . Доломитовый кирпич пред-

ставляет собой горную породу, состоящую из  $MgCO_3$  и  $CaCO_3$ , содержащий до 60 %  $CaCO_3$ . Его огнеупорность достигает 1800 – 1850 °С.

**Нейтральные (хромомагнетитовые, высокоглиноземные, шамотные)** – на основе окислов  $Al_2O_3$  и  $Cr_2O_3$ . Шамот представляет из себя наиболее широко применяемый в теплотехнике материал, который содержит  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ . Теплоустойчивость его не высока, но он самый дешевый.

Все эти огнеупорные материалы используются для футеровки металлургических комбинатов в различных комбинациях, как правило, многослойных.

### **3 Технология выплавки чугуна**

**Чугун** – сплав железа с углеродом с содержанием углерода от 2,14 до 6,67 мас. %. Кроме углерода чугун всегда содержит кремний до 4 мас. %, марганец – до 2 мас. %, а также серу и фосфор (вредные примеси). В процессе получения чугуна от серы и фосфора стремятся избавиться с использованием различных приемов.

#### **3.1 Подготовка руд к плавке**

Подготовка руд к доменной плавке осуществляется для повышения производительности доменной печи, снижения расхода кокса и улучшения качества чугуна. Цель этой подготовки состоит в увеличении содержания железа в шихте и уменьшении в ней вредных примесей – серы, фосфора, повышение ее однородности по кусковатости и химическому составу. Метод подготовки добываемой руды зависит от ее качества.

Первый этап - **дробление и сортировка руд** по крупности для оптимизации плавки. Куски руды дробят и сортируют на дробилках и классификаторах. Затем проводят **обогащение** для повышения содержания железа, которое основано на различных физических свойствах минералов (плотности, магнитной восприимчивости и т.д.). Применяют следующие способы обогащения:

- *Промывка руды водой* – для отделения плотных составляющих руды от рыхлой породы (песка, глины).

- *Гравитация* основана на отделении руды от пустой породы при пропускании струи воды через дно вибрирующего сита, на котором лежит руда. При этом пустая порода вытесняется в верхний слой и уносится водой, а тяжелые рудные минералы опускаются вниз.

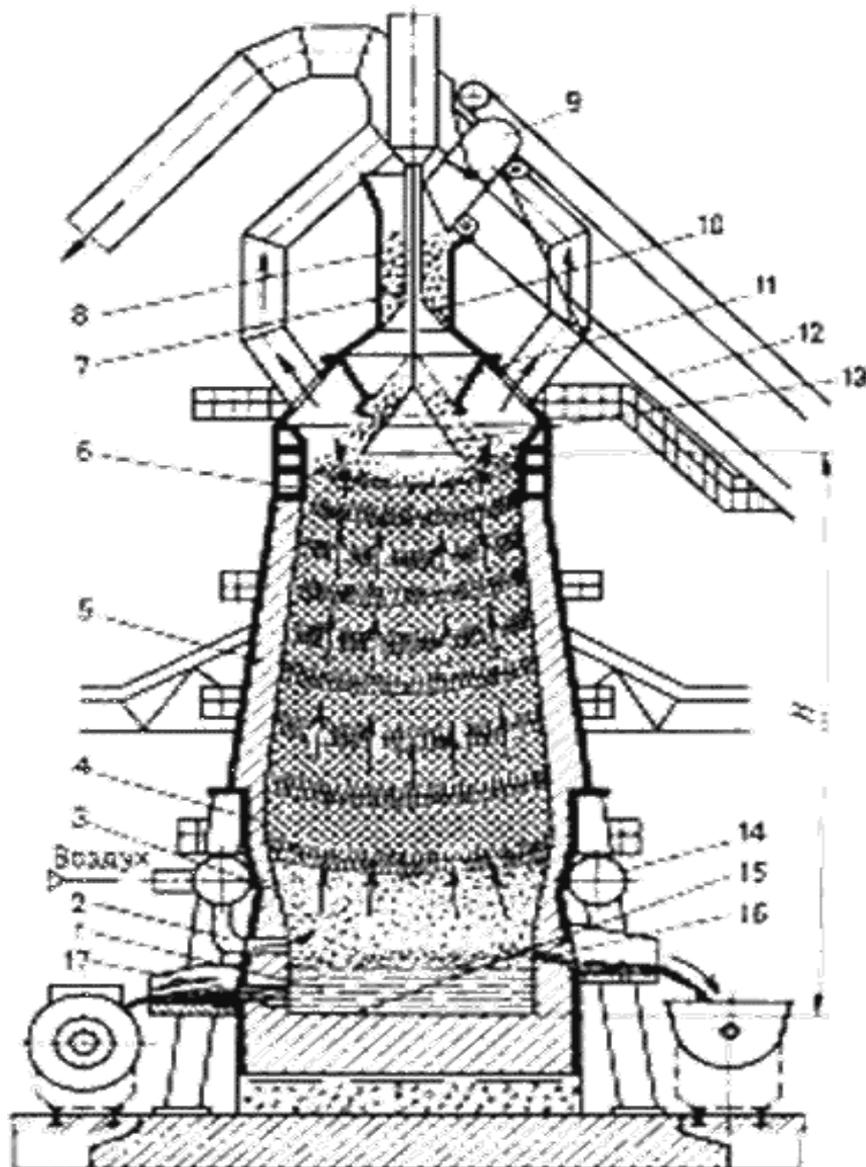
- *Магнитная сепарация* основана на различии магнитных свойств железосодержащих минералов и частиц пустой породы. Измельченную руду подвергают действию магнита, притягивающего железосодержащие минералы, отделяя их от пустой породы.

Следующая операция – **окускование**, которое производят для переработки концентратов, полученных после обогащения, в куски необходимых размеров. С этой целью выполняют агломерацию и окатывание. *Агломерация* - спекание шихты при 1300-1500<sup>0</sup>С в агломерационных машинах. В результате из руды удаляется вредные примеси (сера, частично мышьяк), карбонаты разлагаются, получается кусковой пористый материал – агломерат. *Окатывание* применяют для обработки тонко измельченных концентратов. Шихта из измельченных концентратов, флюса и топлива увлажняется и при обработке во вращающихся барабанах, в результате, приобретает форму шариков – окатышей диаметром до 30 мм. Окатыши высушивают и обжигают при 1200-1350<sup>0</sup>С на обжиговых машинах, после чего они становятся прочными и пористыми. При подаче агломерата и окатышей не надо добавлять флюс – известняк, повышается производительность доменной печи и снижается расход кокса.

### **3.2 Устройство доменной печи и ее работа**

Чугун выплавляют в печах шахтного типа – доменных печах. Сущность процесса получения чугуна в доменных печах заключается в восстановлении железа из его оксидов, входящих в состав руды, оксидом углерода, водородом и твердым углеродом, выделяющимися при сгорании топлива в печи.

Доменная печь (рисунок 1) имеет стальной кожух, выложенный внутри огнеупорным шамотным кирпичом. Рабочее пространство печи включает колошник 6, шахту 5, распар 4, заплечики 3, горн 1, лещадь 15. В верхней части колошника находится засыпной аппарат 8, через который в печь загружают шихту. Шихту взвешивают, подают в вагонетки 9 подъемника, которые передвигаются по мосту 12 к засыпному аппарату 8 и, опрокидываясь, высыпают шихту в приемную воронку 7 распределителя шихты.



*Рисунок 1 - Устройство доменной печи*

При опускании малого конуса 10 засыпного аппарата шихта попадает в чашу 11, а при опускании большого конуса 13 – в доменную печь, что предотвращает выход газов из доменной печи в атмосферу. Для равномерного распределения шихты в доменной печи малый конус и приемная воронка после очередной загрузки поворачиваются на угол, кратный  $60^{\circ}$ .

При работе печи шихтовые материалы, проплавляясь, опускаются, через загрузочное устройство в печь подаются новые порции шихты в таком количестве, чтобы весь полезный объем печи был заполнен. **Полезный объем печи** – это объем, занимаемый шихтой от лещади до нижней кромки большого конуса засыпного аппарата при его опускании. Современные доменные печи имеют полезный объем 2000 – 5000 м<sup>3</sup>. Полезная высота доменной печи достигает 35 м.

В верхней части горна находятся фурменные устройства 14, через которые в печь поступает нагретый воздух, необходимый для горения топлива. Воздух нагревают для уменьшения потерь теплоты и снижения расхода кокса. Воздух поступает в доменную печь из воздухонагревателя, внутри которого имеется камера сгорания и насадка. Насадка выложена из огнеупорных кирпичей, так что между ними образуются вертикальные каналы. В камеру сгорания к горелке подается очищенный от пыли доменный газ, который сгорает и образует горячие газы.

Газы, проходя через насадку, нагревают ее и удаляются через дымовую трубу. Затем подача газа к горелке прекращается и через насадку пропускается воздух, подаваемый турбовоздуходувной машиной. Воздух, проходя через насадку, нагревается до температуры 1000 – 1200<sup>0</sup>С и поступает к фурменному устройству 14, а оттуда через фурмы 2 – в рабочее пространство. Доменная печь имеет несколько воздухонагревателей: в то время как в одних насадка нагревается, в других насадка отдает теплоту холодному воздуху, нагревая его. После охлаждения насадки воздухонагреватели переключаются.

Современные доменные печи имеют общую высоту до 80 м при соотношении полезной высоты к максимальному диаметру, равному приблизительно 3 и полез-

ным объемом до 5600 м<sup>3</sup>. Доменная печь является агрегатом непрерывного действия и поэтому все процессы в ней механизированы и автоматизированы.

### 3.3 Физико-химические процессы, происходящие в доменной печи

Все физико-химические процессы в доменной печи определяются существующими на разных уровнях температурными режимами. При загрузке через конус сырые материалы попадают в область температур 200-300 °С, по мере опускания температура шихты растет, достигая 1900-2100 °С в нижней части распара, а потом постепенно снижается до температуры 1450 °С в горне.

**Горение топлива.** Вблизи фурм углерод кокса взаимодействует с кислородом и сгорает:  $C + O_2 = CO_2 + 393,51 \text{ кДж}$ . При высоких температурах и в присутствии твердого углерода кокса двуокись углерода неустойчива и частично переходит в окись углерода:  $CO_2 + C = 2CO - 171,88 \text{ кДж}$ . Одновременно, на некотором расстоянии от фурм, идет реакция неполного горения углерода кокса:  $C + 1/2O_2 = CO + 110 \text{ кДж}$ .

В результате горения кокса в доменной печи выделяется теплота и образуется газовый поток, содержащий CO, CO<sub>2</sub>, и другие газы. При этом в печи немного выше уровня фурм температура становится более 2000 °С. Горячие газы поднимаются вверх, отдают свою теплоту шихтовым материалам и нагревают их, охлаждаясь при до 300 – 400 °С у колошника.

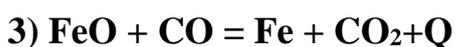
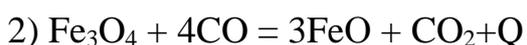
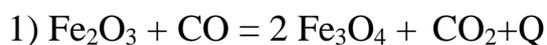
В зоне печи, где температура газов достигает 450 – 700 °С, часть окиси углерода разлагается с образованием сажистого углерода, оседающего на шихтовых материалах:  $2CO = CO_2 + C$ . Остальная часть газа (CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>-колошниковый газ) отводится из печи по трубам и после очистки используется как топливо для воздухонагревателей.

**Восстановление окислов железа и других металлов.** Шихтовые материалы (агломерат, кокс) опускаются вниз навстречу потоку газов и нагреваются. В результате в них: удаляется влага, из топлива выделяются летучие вещества, про-

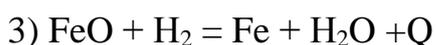
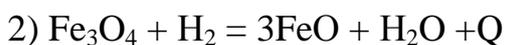
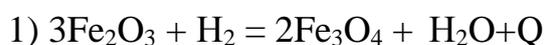
исходит основной процесс – восстановление железа из окислов, которое осуществляется в несколько стадий – от высших окислов к низшим в следующей последовательности:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ .

В восстановлении железа участвуют газы ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) и твердый углерод кокса. Восстановление газами называют **косвенным**, а твердым углеродом – **прямым**. Реакции косвенного восстановления экзотермические, т.е. сопровождаются выделением тепла и происходят, главным образом, в верхних горизонтах печи. Реакции прямого восстановления эндотермические, т.е. сопровождаются поглощением тепла и протекают в нижней части печи.

**Косвенное восстановление железа** происходит в несколько стадий по следующим реакциям:



В процесс косвенного восстановления определенный вклад вносит водород ( $\text{H}_2$ ) по аналогичным реакциям:



Реакции косвенного восстановления начинаются при температурах 400 – 500 °С (первая реакция) и заканчиваются при 900 – 950 °С (третья реакция). Косвенное восстановление имеет большое значение, т.к. за счет него восстанавливается 60 – 80 % всего железа, и лишь остальная часть восстанавливается твердым углеродом кокса (прямое восстановление).

**Прямое восстановление железа** происходит в зоне распара печи при температуре 950 – 1000 °С по реакции  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2 - \text{Q}$ .

В прямом восстановлении участвует только низший оксид **FeO**, который один присутствует в шихте при этих температурах.

**Науглероживание железа.** Восстановление железа заканчивается при 1300–1400 °С в распаре печи. При этих температурах восстановленное железо ( $T_{пл.}=1539$  °С) находится в твердом состоянии в виде пористой губчатой массы. Наряду с реакциями восстановления железа происходит его науглероживание при температурах более 500 °С за счет взаимодействия с оксидом углерода, коксом и сажистым углеродом по реакции  $3Fe + 2CO = Fe_3C + CO_2 + Q$ .

Продуктом науглероживания является карбид железа  $Fe_3C$ , который хорошо растворяется в твердом железе и постепенно образует сплав железа с углеродом. При концентрации углерода в сплаве ~ 4,3 мас. % температура плавления уменьшается до 1147 °С. В результате в нижней части печи на уровне распара и заплечиков начинается плавление. Жидкий расплав – чугуны – стекает вниз, омывает куски раскаленного кокса и дополнительно интенсивно науглероживается. В расплаве также растворяются восстановленные марганец, кремний, фосфор (из руды), а также сера (из кокса). Конечный состав чугуна устанавливается в горне. При этом большое значение имеют состав, свойства и количество шлака.

**Восстановление других элементов.** В доменную печь с шихтовыми материалами попадают Mn, Si, S, P, As и др. элементы в виде различных химических соединений. Эти элементы частично или полностью восстанавливаются и входят в состав чугуна, улучшая или ухудшая его свойства. Эти примеси считают постоянными и подразделяют их на вредные (S, P, Pb, As) и полезные (Mn, Si)

Марганец и кремний частично восстанавливаются и переходят в состав чугуна. Другая часть в виде  $MnO$  и  $SiO_2$  входит в состав шлака. Фосфор полностью восстанавливается и входит в состав чугуна. Сера образует летучие соединения ( $SO_2$  и  $H_2S$ ) и в значительной части удаляется с газом при нагреве шихты. Определенная ее часть взаимодействует с известью  $CaO$  и переходит в шлак. Большая часть (до 50 %) серы взаимодействует с железом и входит в состав чугуна. Сера – наиболее вредная примесь в чугуне и стали, поэтому разрабатывают различные способы ее удаления из металла как доменные, так и внедоменные. В состав чугуна

на могут попасть и другие примеси, если они содержатся в руде (никель, хром, ванадий).

### **3.4 Продукты доменной плавки и технико-экономические показатели производства чугуна**

Чугун – основной продукт доменной плавки. В доменных печах получают чугун различного химического состава в зависимости от его назначения.

**Передельные чугуны** в соответствии с ГОСТ 805-80 маркируются следующим образом - М1, М2, М3; Б1, Б2; фосфористые чугуны - МФ1, МФ2, МФ3; высококачественные - ПВК1, ПВК2, ПВК3. Передельный чугун выплавляют для последующего передела его в сталь в конвертерах или мартеновских печах.

Литейные чугуны (ГОСТ 4832-58) ЛК0, ЛК1, ...ЛК5. Литейный чугун используют на машиностроительных заводах при производстве фасонных отливок.

Доменные ферросплавы: зеркальный чугун ЗЧ1, ЗЧ2, ЗЧ3 (5,0-5,5 С, 2 Si, 10 – 25 Mn, 0,1 – 1,2 P, 0,03 S) и ферросилиций Си10 и Си 15 (2 С, 9 - 13 Si, 3 Mn) и ферромарганец Мн6, Мн6 (7 С, 2 Si, 70 – 75 Mn).

К технико-экономическим показателям производства чугуна относятся:

**Коэффициент использования полезного объема доменной печи** (К.И.П.О.) в м<sup>3</sup>/т – определяется как соотношение полезного объема печи (V) в м<sup>3</sup> к ее среднесуточной производительности (P) в тоннах. В нашей стране К.И.П.О. = 0,5-0,7.

**Удельный расход кокса (К)** – отношение расхода (А) кокса за сутки к количеству (P) в тоннах передельного чугуна, выплавленного за то же время:  $K=A/P$ . В нашей стране  $K=0,5-0,7$ . Стоимость кокса составляет более половины стоимости чугуна.

**Мероприятия по оценке и увеличению производительности доменных печей** - совершенствование конструкций печей, в частности, увеличение полезного объема доменных печей. При полезном объеме 5000 м<sup>3</sup> в сутки выплавляют бо-

лее 10000 т чугуна; совершенствование способов подготовки шихты – обогащение руд, применение офлюсованного агломерата и окатышей; интенсификация доменного процесса за счет повышения давления газа в колошнике (в результате снижается скорость движения газов в доменной печи, улучшаются условия восстановления, уменьшается расход кокса и вынос колошниковой пыли). Кроме того, за счет обогащения дутья кислородом повышается интенсивность горения кокса, повышается температура в горне доменной печи, ускоряются процессы восстановления кремния и марганца. За счет вдувания в горн природного газа и угольной пыли, что позволяет снизить расход кокса на 10-15 % и увеличить производительность печей на 2-3 % за счет повышения восстановительной способности газов.

#### **4 Технология выплавки стали**

**Сталь** - это сплав железа с углеродом с содержанием углерода менее 2,14 мас. %. Поэтому сущность выплавки стали заключается в окислении углерода и вредных примесей, содержащихся в передельном чугуне.

##### **4.1 Физико-химические процессы при выплавке стали**

Сталь нельзя сразу получить из железной руды. Обязательно сначала получают чугун, а затем из него можно выплавить сталь. Однако при выплавке стали используют в небольшом количестве железную руду. Основными исходными материалами для производства стали являются передельный чугун и стальной лом (скрап). Содержание углерода и примесей в стали значительно ниже, чем в чугуне (таблица 1), поэтому сущность передела чугуна в сталь заключается в снижении содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе плавки.

Таблица 1 - Состав передельного чугуна и низкоуглеродистой стали, мас. %

Материал	C	Si	Mn	P	S
Передельный чугун	4 – 4,4	0,76 – 1,26	до 1,75	0,15 – 0,3	0,03 – 0,07
Сталь низкоуглеродистая	0,14 – 0,22	0,12 – 0,3	0,4 – 0,65	0,05	0,055

Железо окисляется в первую очередь при взаимодействии чугуна с кислородом в сталеплавильных печах:  $\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 = \text{FeO} + 263,68 \text{ кДж}$ . Одновременно с железом окисляются Si, P, Mn, C и др. Образующийся оксид железа при высоких температурах отдаёт свой кислород более активным примесям в чугуне, окисляя их:  $2\text{FeO} + \text{Si} = \text{SiO}_2 + 2\text{Fe} + 330,5 \text{ кДж}$ ;  $5\text{FeO} + 2\text{P} = \text{P}_2\text{O}_5 + 5\text{Fe} + 225,94 \text{ кДж}$ ;  $\text{FeO} + \text{Mn} = \text{MnO} + \text{Fe} + 122,59 \text{ кДж}$ ;  $\text{FeO} + \text{C} = \text{CO} + \text{Fe} - 153,93 \text{ кДж}$ .

Процессы выплавки стали осуществляют в три этапа. **Первый этап** – расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла. Температура металла сравнительно невысокая, интенсивно происходит окисление железа, образование оксида железа и окисление примесей: кремния, марганца и фосфора. Главная задача этапа – удаление фосфора. Для этого желательно проведение плавки в основной печи, где шлак содержит оксид кальция. Фосфорный ангидрид образует с оксидом железа нестойкое соединение  $(\text{FeO})_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ . Оксид кальция характеризуется более сильными основными свойствами, чем оксид железа, поэтому при невысоких температурах связывает  $\text{P}_2\text{O}_5$  и переводит его в шлак:  $2[\text{P}] + 5(\text{Fe O}) + (\text{CaO}) = (4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5) + 5[\text{Fe}]$ .

Для удаления фосфора необходимы невысокие температура ванны металла и шлака, а также достаточное содержание в шлаке FeO. Для повышения содержания FeO в шлаке и ускорения окисления примесей в печь добавляют железную руду и окалину, наводя железистый шлак. По мере удаления фосфора из металла в шлак, содержание фосфора в шлаке увеличивается. Поэтому необходимо убрать этот шлак с зеркала металла и заменить его новым со свежими добавками CaO.

**Второй этап** – кипение металлической ванны – начинается по мере прогрева до более высоких температур. При повышении температуры более интенсивно протекает реакция окисления углерода, происходящая с поглощением теплоты:  **$\text{FeO} + \text{C} = \text{CO} + \text{Fe} - 153,93 \text{ кДж}$** .

Для окисления углерода в металл вводят незначительное количество руды, окалины или вдувают кислород. При реакции оксида железа с углеродом, пузырьки оксида углерода выделяются из жидкого металла, вызывая «кипение ванны». **При «кипении» уменьшается содержание углерода в металле до требуемого, выравнивается температура по объему ванны, частично удаляются неметаллические включения, прилипающие к всплывающим пузырькам CO, а также газы, проникающие в пузырьки CO.** Все это способствует повышению качества металла. Следовательно, этот этап - основной в процессе выплавки стали. На этом этапе создаются условия для удаления серы, которая в стали находится в виде сульфида (FeS), растворимого в основном шлаке. Чем выше температура, тем большее количество сульфида железа (FeS) растворяется в шлаке и взаимодействует с оксидом кальция CaO:  **$(\text{FeS}) + (\text{CaO}) = (\text{CaS}) + (\text{FeO})$** . Образующееся соединение растворяется в шлаке, но не растворяется в железе, поэтому сера удаляется в шлак.

**Третий этап** – раскисление стали заключается в восстановлении железа из его оксида, растворённого в жидком металле. При плавке повышение содержания кислорода в металле необходимо для окисления примесей, но в готовой стали кислород – вредная примесь, так как понижает механические свойства стали, особенно при высоких температурах. Сталь раскисляют двумя способами: осаждающим и диффузионным. Осаждающее раскисление осуществляется введением в жидкую сталь растворимых раскислителей (ферромарганца, ферросилиция, ферроалюминия), содержащих элементы, которые обладают большим сродством к кислороду, чем железо. В результате раскисления восстанавливается железо и образуются оксиды: MnO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др., которые имеют меньшую плотность, чем сталь, и удаляются в шлак.

Диффузионное раскисление осуществляется раскислением шлака. Ферро-марганец, ферросилиций и алюминий в измельчённом виде загружают на поверхность шлака. Раскислители, восстанавливая оксид железа, уменьшают его содержание в шлаке. Следовательно, оксид железа, растворённый в стали переходит в шлак. Образующиеся при этом процессе оксиды остаются в шлаке, а восстановленное железо переходит в сталь, при этом в стали снижается содержание неметаллических включений и повышается ее качество.

В зависимости от степени раскисления выплавляют стали: а) спокойные, б) кипящие, в) полуспокойные. **Спокойная сталь** получается при полном раскислении в печи и ковше. **Кипящая сталь** раскислена в печи неполностью, ее раскисление продолжается в изложнице при затвердевании слитка, благодаря взаимодействию оксида железа и углерода. **Полуспокойная сталь** имеет промежуточную раскисленность между спокойной и кипящей. Частично она раскисляется в печи и в ковше, а частично – в изложнице, благодаря взаимодействию оксида железа и углерода, содержащихся в стали.

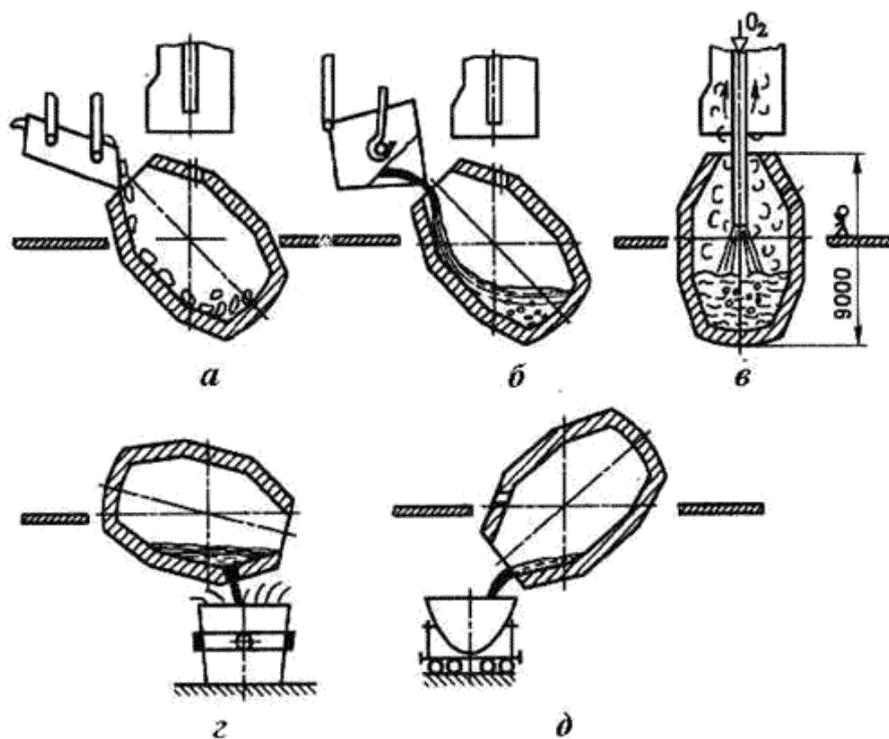
Легирование стали осуществляется введением ферросплавов или чистых металлов в необходимом количестве в расплав. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду меньше, чем у железа (Ni, Co, Mo, Cu), при плавке и разливке не окисляются, поэтому их вводят в любое время плавки. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду больше, чем у железа (Si, Mn, Al, Cr, V, Ti и др.), вводят в металл после раскисления или одновременно с ним в конце плавки, а иногда в ковш.

## 4.2 Способы выплавки стали

**Кислородно-конвертерный процесс** включает в себя выплавку стали из жидкого чугуна в конвертере с основной футеровкой и продувкой кислородом через водоохлаждаемую фурму. Кислородный конвертер представляет собой сосуд грушевидной формы из стального листа, футерованный основным кирпичом.

Вместимость конвертера – 130 - 350 т жидкого чугуна. В процессе работы конвертер может поворачиваться на  $360^\circ$  для загрузки скрапа, заливки чугуна, слива стали и шлака.

Шихтовыми материалами кислородно-конвертерного процесса являются жидкий передельный чугун, стальной лом (не более 30%), известь для наведения шлака, железная руда, а также боксит и плавиковый шпат для разжижения шлака. Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородных конвертерах представлена на рис. 2.



*а - загрузка скрапа; б - заливка чугуна; в - продувка кислородом, г - разливка стали; д - слив шлака*

*Рисунок 2. - Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородных конвертерах*

После очередной плавки стали выпускное отверстие заделывают огнеупорной массой, осматривают футеровку, ремонтируют. Перед плавкой конвертер наклоняют, с помощью завалочных машин загружают скрап рис. (1 а), заливают

чугун при температуре 1250...1400 °С (рис. 1 б). После этого конвертер поворачивают в рабочее положение (рис. 1 в), внутрь вводят охлаждаемую фурму и через неё подают кислород под давлением 0,9 - 1,4 МПа.

Одновременно с началом продувки загружают известь, боксит, железную руду. Кислород проникает в металл, вызывает его циркуляцию в конвертере и перемешивание со шлаком. Под фурмой развивается температура 2400 °С. В зоне контакта кислородной струи с металлом окисляется железо. Оксид железа растворяется в шлаке и металле, обогащая металл кислородом. Растворенный кислород окисляет кремний, марганец, углерод в металле, и их содержание падает. Происходит разогрев металла теплотой, выделяющейся при окислении. Фосфор удаляется в начале продувки ванны кислородом, когда ее температура невысока (содержание фосфора в чугуне не должно превышать 0,15 %). При повышенном содержании фосфора для его удаления необходимо сливать шлак и наводить новый, что снижает производительность конвертера. Сера удаляется в течение всей плавки (содержание серы в чугуне должно быть до 0,07 %).

Подачу кислорода заканчивают, когда содержание углерода в металле соответствует заданному марочным составом. После этого конвертер поворачивают и выпускают сталь в ковш (рис. 1 г), где раскисляют осаждающим методом ферромарганцем, ферросилицием и алюминием, затем сливают шлак (рис. 1 д).

В кислородных конвертерах выплавляют малоуглеродистые конструкционные стали, кипящие и спокойные, а также низколегированные стали. Легирующие элементы в расплавленном виде вводят в ковш перед выпуском в него стали. Плавка в конвертерах вместимостью 130 - 300 т заканчивается через 25 - 30 минут.

**Мартеновская печь** – это пламенная отражательная регенеративная печь (рис. 3). Современная мартеновская печь представляет собой вытянутую в горизонтальном направлении камеру, сложенную из огнеупорного кирпича. Рабочее

плавильное пространство ограничено снизу подиной 12, сверху сводом 11, а с боков передней 5 и задней 10 стенками.

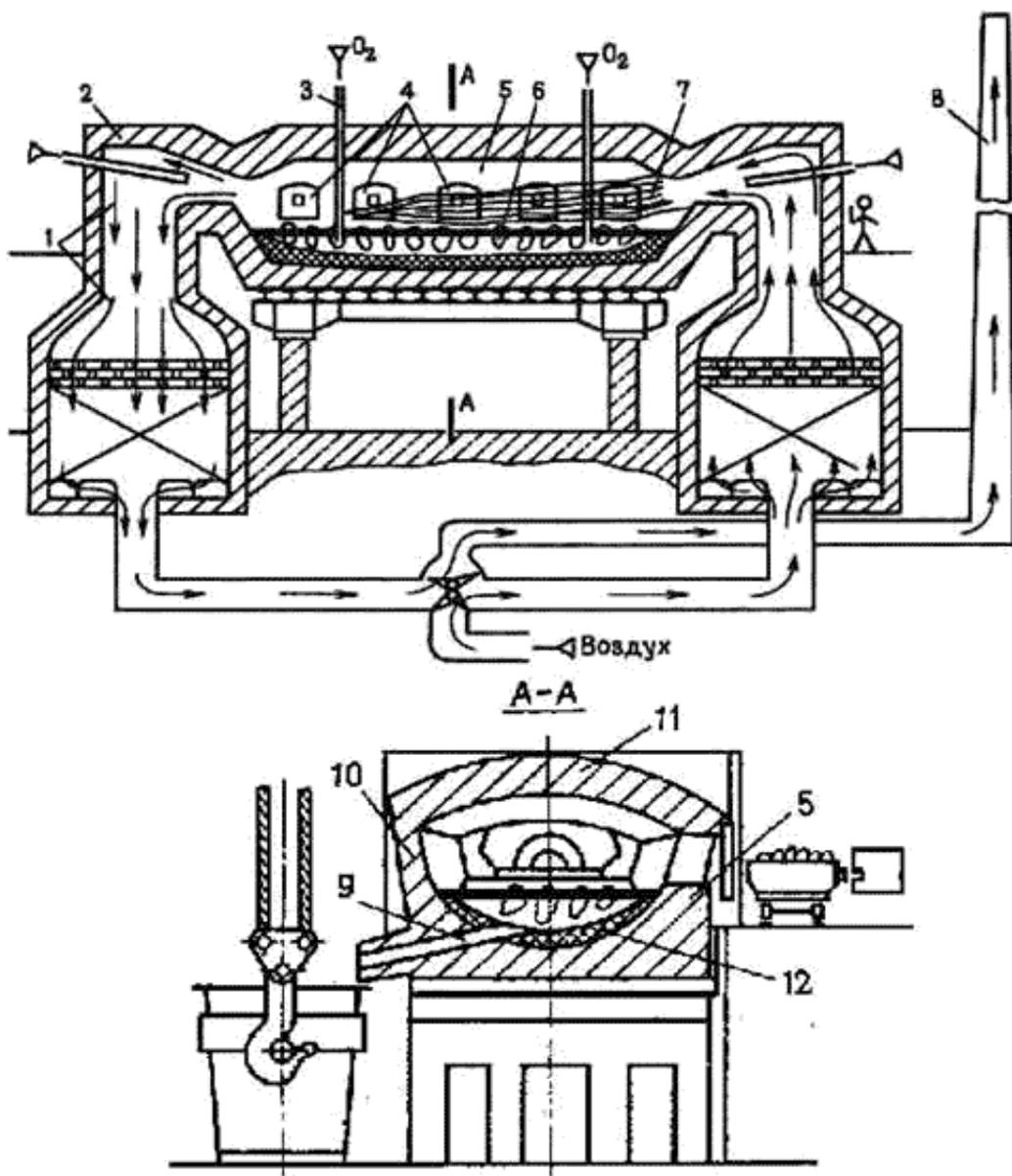


Рисунок 3 - Схема мартеновской печи

Подина имеет форму ванны с откосами по направлению к стенкам печи. В передней стенке имеются загрузочные окна 4 для подачи шихты и флюса, а в задней – отверстие 9 для выпуска готовой стали. Характеристикой рабочего пространства является площадь пода печи, которую подсчитывают на уровне порогов загрузочных окон. С обоих торцов плавильного пространства расположены

головки печи 2, которые служат для смешивания топлива с воздухом и подачи этой смеси в плавильное пространство. В качестве топлива используют природный газ, мазут. Для подогрева воздуха и газа при работе на низкокалорийном газе печь имеет два регенератора (1).

**Регенератор** – камера, в которой размещена насадка – огнеупорный кирпич, выложенный в клетку, предназначен для нагрева воздуха и газов. Отходящие от печи газы имеют температуру 1500 - 1600 °С. Попадая в регенератор, газы нагревают насадку до температуры 1250 °С. Через один из регенераторов подают воздух, который проходя через насадку нагревается до 1200 °С и поступает в головку печи, где смешивается с топливом, на выходе из головки образует факел (7), направленный на шихту (6).

Размеры плавильного пространства зависят от емкости печи. В нашей стране работают печи емкостью 20 - 900 т жидкой стали. Важной характеристикой печи является площадь пода, которую условно подсчитывают на уровне порогов загрузочных окон. Для подогрева воздуха в печи при работе на газообразном топливе печь имеет два регенератора – это камера с выложенным в клетку кирпичом. Отходящий из печи воздух с температурой 1000-1500 °С нагревает кирпичи до 1250 – 1280 °С, а попадающий атмосферный воздух, соответственно, нагревается до температур 100 – 1200 °С, а потом только попадает в рабочее пространство печи, где смешивается с топливом.

**Шихта** – стальной скрап, жидкий и твердый чугун. В зависимости от состава шихты различают: 1) скрап-процесс, шихта – скрап и чушковый передельный чугун, применяют на заводах, далеко расположенных от доменного производства, и в крупных промышленных центрах, где много металлолома; 2) скрап-рудный процесс, основная часть шихты состоит из жидкого чугуна; наиболее экономичен, производство должно быть расположено вблизи домны.

В зависимости от футеровки печи различают кислый и основной процесс. Наибольшее количество сталей получают в печах с основной футеровкой, т.к. можно использовать различные шихтовые материалы (скрап-рудный процесс).

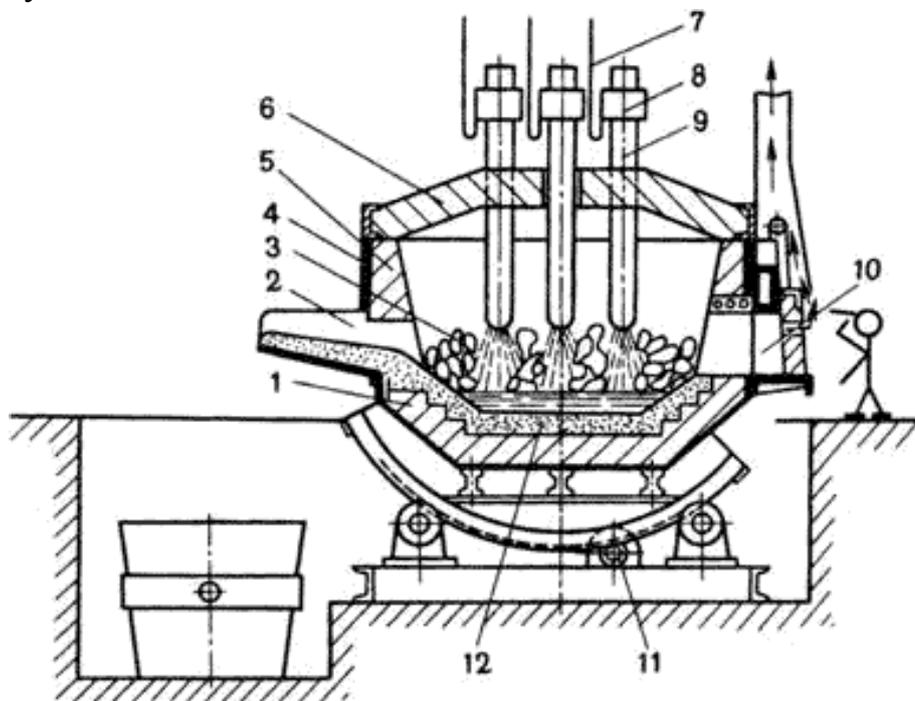
Качественные стали, содержащие меньшее количество растворенных газов, выплавляют кислым мартеновским процессом.

Технология плавки основным скрап-рудным процессом: 1) осмотр и ремонт пода печи; 2) загрузка железной руды и известняка, прогрев; 3) подача скрапа, прогрев; 4) подача жидкого чугуна и продувка кислородом для ускорения процесса; 5) окисление примесей чугуна – кремния и фосфора, марганца и частично углерода; 6) кипение ванны – главный процесс в мартеновской печи, окисление углерода, отключение подачи топлива и воздуха в печь, 7) вспенивание шлака окисью углерода, выпуск шлака в чаши (скачивание шлака), удаление фосфора и серы; 8) процесс оканчивается при получении заданного содержания углерода и минимального содержания серы и фосфора., что определяют по пробам металла, которые берут постоянно в процессе плавки; 9) раскисление металла в два этапа: первый этап – в период кипения путем прекращения подачи руды в печь и одновременно подачей только раскислителей, второй этап – подача алюминия и ферросилиция в ковш перед разливкой стали; 10) выпуск плавки через сталевыпускное отверстие в задней стенке в ковш.

**Производство стали в электропечах.** Использование для разогрева и расплавления материалов энергии электрического тока осуществляется в электропечах. Преимущества – быстрый нагрев; точная регулировка температуры; возможность создавать окислительную, восстановительную, нейтральную атмосферы или вакуум, выплавлять стали и сплавы любого состава, более полно раскислять сталь, получать высококачественные стали и сплавы.

В дуговых электроплавильных печах в качестве источника тепла используется электрическая дуга, возникающая между электродами и металлической шихтой. Печь питается трехфазным электрическим током и имеет три графитовых электрода. Емкость дуговых электропечей 0,5 - 400 т. В металлургических цехах обычно используют дуговые электропечи с основной футеровкой, а в литейных – с кислой (рис. 4).

Первый (окислительный) период начинается сразу после завалки шихты и пропускания тока через электроды. За счет кислорода воздуха, окислов шихты и окислы окисляются кремний, марганец, углерод, железо. После нагрева металла и шлака до 1500 – 1540 °С в печь загружают руду и известь. Происходит интенсивное окисление углерода, начинается кипение ванны жидкого металла. Печь наклоняют и выпускают вспенившийся шлак в чашу. Руду и известь добавляют 2-3 раза. Содержание фосфора в стали снижается до 0,01 мас. %. Когда содержание углерода становится меньше заданного на 0,1 мас. %, кипение прекращают и полностью удаляют из печи шлак.



*Рисунок 4 - Схема дуговой плавильной электропечи*

Второй период – восстановительный – это раскисление стали, удаление серы и доведения стали до заданного химического состава в соответствии с маркой. В печь подают ферромарганец, в требуемом по химическому составу количестве, производят при необходимости науглероживание. Затем нагружают флюс: известь, плавиковый шпат и шамотный бой. После его расплавления вводят раскислительную смесь: известь, плавиковый шпат, молотый кокс, ферросилиций. При этом в шлаке происходят реакции:  $FeO + C = Fe + CO$ ,  $2FeO + Si = Fe + SiO_2$ . Ко-

личество закиси железа в шлаке снижается и она из металла переходит в шлак по закону распределения (диффузионное раскисление). Из металла удаляется сера по следующей химической реакции:  $\text{FeS} + \text{CaO} = \text{CaS} + \text{FeO}$ .

По ходу восстановительного периода берут пробы для определения химического состава стали. Когда химический состав соответствует марочному, проводят окончательное раскисление стали и выпускают металл в ковш.

При выплавке легированных сталей легирующие элементы вводят в виде ферросплавов. Порядок ввода определяется сродством легирующего элемента к кислороду: никель и молибден вводят в период плавления или в окислительный период, поскольку они обладают меньшим сродством к кислороду, чем железо; хром легко окисляется, поэтому его вводят в восстановительный период; кремний, ванадий и титан легко окисляются, поэтому их вводят перед выпуском металла в ковш.

Индукционные печи состоят из водоохлаждаемого индуктора (3), внутри него тигель (4) с металлической шихтой (рис. 5). Тигель изготовлен из огнеупорных материалов: кислый – кварцит или основной – магнезит.

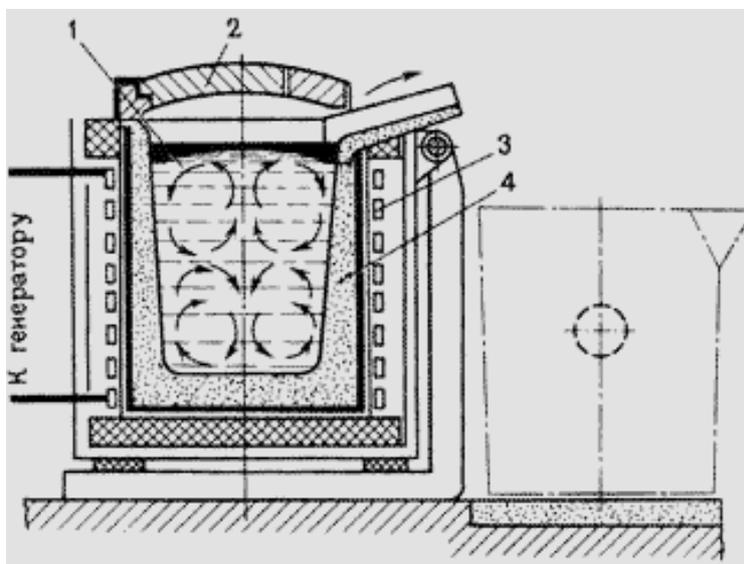


Рисунок 5 - Схема индукционной тигельной плавильной печи

Через индуктор проходит однофазный переменный ток повышенной частоты (500-100 кГц), который создает переменный магнитный поток, пронизывающий куски металла в тигле, наводит в них мощные вихревые токи Фуко, металл (1) нагревается до расплавления (рис. 5). В электропечах выплавляют высоколегированные стали, к которым предъявляются особые требования по качеству.

**Технико-экономические показатели** – емкость печи, расход электроэнергии (чем больше емкость, тем расход электроэнергии на 1 т выплавляемого металла меньше). Для интенсификации выплавки используют: электромагнитное перемешивание металла, кислород для продувки ванны стали в окислительный период. Для выплавки легированных марок сталей применяют дуплекс-процесс: выплавка стали в основном кислородном конвертере с последующим рафинированием и доводкой по химическому составу в электропечи.

## **5 Способы разливки стали**

Из плавильных печей сталь выпускают в ковш, который мостовым краном переносят к месту разливки стали. Из ковша сталь разливают в изложницы или кристаллизаторы машины для непрерывного литья заготовок. В изложницах или кристаллизаторах сталь затвердевает, в результате получают слитки, которые затем подвергаются обработке давлением.

**Изложницы** – это чугунные формы для изготовления слитков. Изложницы выполняют с квадратным, прямоугольным, круглым и многогранным поперечными сечениями. Слитки с квадратным сечением переделывают на сортовой прокат: двутавровые балки, швеллеры, уголки. Слитки прямоугольного сечения – на листы. Слитки круглого сечения используются для изготовления труб, колёс. Слитки с многогранным сечением применяют для изготовления поковок. Спокойные и кипящие углеродистые стали разливают в слитки массой до 25 тонн, легированные и высококачественные стали – в слитки массой 0,5 - 7 тонн, а некоторые сорта высоколегированных сталей – в слитки до нескольких килограммов.

Сталь разливают в изложницы сверху (рис. 6 а), снизу (сифоном) (рис. 6 б) и на машинах непрерывного литья. В изложницы сверху сталь разливают непосредственно из ковша 1. При этом исключается расход металла на литники, упрощается подготовка оборудования к разливке. К недостаткам следует отнести менее качественную поверхность слитков, из-за наличия пленок оксидов от брызг металла, затвердевающих на

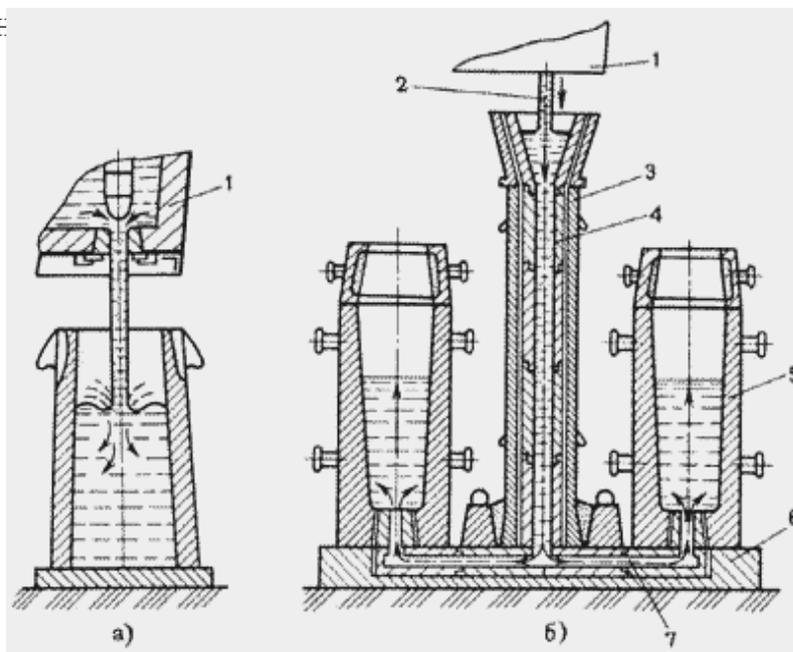


Рисунок 6 - Разливка стали в изложницы: а – сверху; б – снизу (сифоном)

В изложницы сверху сталь разливают непосредственно из ковша (1). При этом исключается расход металла на литники, упрощается подготовка оборудования к разливке. К недостаткам следует отнести менее качественную поверхность слитков, из-за наличия пленок оксидов от брызг металла, затвердевающих на стенках изложницы. Применяется для разливки углеродистых сталей.

При **сифонной разливке** одновременно заполняются несколько изложниц (от 4 до 60). Изложницы устанавливаются на поддоне (6), в центре которого располагается центровой литник (3), футерованный огнеупорными трубками (4), соединённый каналами (7) с изложницами. Жидкая сталь (2) из ковша (1) поступает в центровой литник и снизу плавно, без разбрызгивания наполняет изложницу (5). Поверхность слитка получается чистой, можно разливать большую массу металла

одновременно в несколько изложниц. Используют этот способ для легированных и высококачественных сталей.

**Непрерывная разливка** стали состоит в том, что жидкую сталь из ковша через промежуточное разливочное устройство непрерывно подают в водоохлаждаемую изложницу без дна – кристаллизатор, из нижней части которого вытягивается затвердевающий слиток.

Перед заливкой металла в кристаллизатор вводят затравку – стальную штангу со сменной головкой, имеющей паз в виде ласточкиного хвоста, которая в начале заливки служит дном кристаллизатора. Вследствие интенсивного охлаждения жидкий металл у стенок кристаллизатора и на затравке затвердевает, образуется корка, соединяющая металл с затравкой. Затравка движется вниз при помощи тяговых роликов, постепенно вытягивая затвердевающий слиток из кристаллизатора. После прохождения тяговых роликов, затравку отделяют. Скорость вытягивания составляет в среднем 1 м/мин. Окончательное затвердевание в сердцевине происходит в результате вторичного охлаждения водой из брызгал. Затем затвердевший слиток попадает в зону резки, где его разрезают газовым резаком, на куски заданной длины. Слитки имеют плотное строение и мелкозернистую структуру, отсутствуют усадочные раковины. Этот метод используют для высоколегированных сталей и цветных сплавов.

## **6 Особенности производства цветных металлов и сплавов**

Цветные металлы разделяют на четыре группы:

- 1) тяжелые металлы (Cu, Ni, Zn, Pb, Sn);
- 2) легкие металлы (Al, Mg, Be, Li);
- 3) благородные металлы (Au, Ag, Pt и ее природные спутники Ro, Ir, Os);
- 4) редкие металлы:
  - тугоплавкие (Mo, W, V, Ti, Nb, Ta, Zr, Cr);
  - легкие (Sc, St, Ru);

- радиоактивные (U, Th, Ra);
- редкоземельные

Наиболее широко в машиностроении применяют Cu, Al, Mg, Ti, Zn, Ni, Pb и Sn, которые используют в чистом виде и в составе многих сплавов. Цветные металлы имеют решающее значение для развития современного машиностроения и обеспечивают прогресс в развитии новой техники. Однако они весьма дороги, и когда это возможно, их заменяют на черные или неметаллические материалы. Из всех рассмотренных цветных металлов по объемам производства в металлургии важнейшими считаются Cu, Al, Mg и Ti.

Методы производства цветных металлов очень разнообразны. Многие металлы получают пирометаллургическим способом с проведением избирательной восстановительной или окислительной плавки, часто в качестве источника тепла и химического реагента используют серу, содержащуюся в рудах. Кроме того, используют **электролиз**. Этот способ основан на диссоциации содержащего металл сырья в электролите и последующем осаждении металла на катоде. Электролиз ведут не из водного раствора, а из расплава. Это обусловлено тем, что в растворе на катоде осаждается водород, как более положительный ион, а чистый металл выделить невозможно, образуются лишь его соединения (гидраты окислов). Оборудование – электролизер, имеющий катодное и анодное устройство. Катодное устройство – ванна из огнеупорного материала, в которой находится расплавленный металл и электролит (криолит  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  для производства алюминия, хлористый магний  $\text{MgCl}$  для производства магния и т.п.). Катодом служит либо расплавленный металл, как в случае получения алюминия, либо стальные пластины, как при получении магния. Анодом служит, как правило, угольный стержень или пластина. В процессе электролиза происходит разряжение ионов металла на катоде и осаждение. Иногда применяют металлотермические процессы, используя в качестве восстановителей производимых металлов другие металлы с большим сродством к кислороду.

**Металлотермия** – восстановление соединений металла (хлоридов или окислов) другими металлами. Используется при производстве титана. Титановый шлак (продукт доменного производства) хлорируют:  $\text{TiO}_2 + 2\text{C} + 2\text{Cl}_2 = \text{TiCl}_4 + 2\text{CO}$ . Хлорид титана очищается от остальных побочных продуктов за счет различной температуры кипения в конденсационных и фильтрационных установках, затем восстанавливается в реакторах:  $2\text{Mg} + \text{TiCl}_4 = \text{Ti} + 2\text{MgCl}_2$ .

Титан и магний обычно производят на одном заводе, т.к.  $\text{MgCl}_2$  – побочный продукт при получении титана служит сырьем для получения магния, а магний и хлор используют при производстве титана.

Также используются такие способы, как химико-термический, цианирование и хлорид-возгонка.

## **6.1 Последовательность получения меди**

Для производства меди используют пирометаллургический способ, так как он позволяет извлекать из руд попутно с медью другие металлы, в том числе и драгоценные. Производство меди осуществляется в следующей последовательности (рис. 7):

1. Для плавки применяют медные руды, содержащие 1 – 6 % Cu, в виде, главным образом, сернистых соединений ( $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CuS}$ ), а также отходы меди.

2. Для обогащения применяют метод флотации, позволяющий получить концентрат с содержанием Cu ~ 10 – 35 %.

**Флотация** – процесс обогащения, основанный на избирательном прилипании частиц минералов, дисперсированных в жидкой среде, к поверхности раздела двух фаз (жидкость – газ, жидкость – жидкость и др.).

3. Для уменьшения содержания серы в руде (концентрате) проводят окислительный обжиг при  $T = 750 - 800^0 \text{ C}$ . В присутствии кислорода сульфиды окисляются и содержание серы уменьшается почти в 2 раза. Отходящие газы в виде  $\text{SO}_2$

(сернистый газ) идут на производство  $H_2SO_4$ . Для бедных руд, с содержанием Cu 8 – 25 %, обжиг проводят. Богатые руды, с содержанием Cu 25 – 35 %, плавят без обжига.

4. В специальных печах при  $T = 1250 - 1300^0 C$  происходит плавка концентрата, при которой расплавленная масса за счет соответствующих химических реакций разделяется на две части: штейн, состоящий из сульфидов  $Cu_2S$  и  $FeS$ , и шлак, состоящий из окислов и силикатов.

**Штейн** – промежуточный продукт производства цветных металлов (Cu, Ni, Pb и др.), представляет сплав сульфидов этих элементов с  $FeS$ .

5. Продукт плавки выпускают из печи в виде сплава – штейна, который содержит 20 – 60 % Fe и 20 – 25 % S. В расплавленном состоянии ( $T_{пл} = 950 - 1050^0C$ ) штейн поступает в конвертеры.

6. В конвертерах расплавленный медный штейн продувают воздухом (конвертируют) для окисления сульфидов Cu и Fe с образованием оксидов Cu и Fe. Оксиды железа выводятся в шлак и на первом этапе продувки образуется штейн, содержащий в основном, только **сульфиды меди (белый штейн)**.

7. На втором этапе продувки в конвертере образуется черновая медь за счет окисления сульфида меди и перевода серы в  $SO_2$ . Черновая медь содержит 98,4 – 99,4% Cu (МК1), 0,01 – 0,04% Fe и 0,02 – 0,1% S и др. примеси (Ni, Sn, Sb, Au, Ag). Эту медь через ковш разливают в изложницы на чушки или плиты. Для удаления вредных примесей черновую медь рафинируют.

8. Для очистки черновой меди от примесей применяют двойное рафинирование огневым и электролитическим способом.

9. Огневое рафинирование применяют для удаления примесей с большим сродством к кислороду за счет продувки воздухом расплавленной черновой меди. Окисляют S, Fe, Ni, As, Sb, Zn и переводят их в шлак. Затем с использованием технологии сухой перегонки древесины, погруженной в расплав меди, удаляют газы и восстанавливают остатки  $Cu_2O$ . В результате получают медь чистотой 99,0

– 99,5%. Эта медь в виде чушек идет на производство сплавов меди (латуней, бронз), а в виде плит на электролитическое рафинирование.

10. Электролитическое рафинирование проводят для получения чистой от примесей меди (не менее 99,95% Cu). Электролиз ведут в ваннах, где электролитом служит водный раствор  $\text{CuSO}_4$  (10 – 16%) и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (10 – 16%). Аноды делают из меди огневого рафинирования, а катоды – из листов чистой (электролитической) меди. Анод при постоянном токе растворяется и ионы меди через раствор переходят и осаждаются на катоде. Примеси (Sb, As, Bi, Au, Ag) осаждаются на дно ванны и после выгрузки перерабатываются для извлечения этих металлов. Катоды переплавляют в электропечах.

## 6.2 Получения титана

Наиболее распространенным сырьем для получения титана являются следующие руды: ильменит  $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ; рутил  $\text{TiO}_2$ ; титаномагнетит  $\text{FeTiO}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$ . Наибольшее количество титана получают из минерала ильменит ( $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ), содержащего до 60 %  $\text{TiO}_2$ .

Сущность процесса получения металлического титана заключается в восстановлении четыреххлористого титана ( $\text{TiCl}_4$ ) магниетермическим способом.

Титан и магний обычно производят на одном заводе, так как хлористый магний ( $\text{MgCl}_2$ ) – побочный продукт при получении титана, служит сырьем для получения магния.

Производство титана осуществляется в следующей последовательности (рис. 8):

1. Руда титана содержит от 10%  $\text{TiO}_2$  (титаномагнетит) до 90 – 100%  $\text{TiO}_2$  (рутил). Поэтому бедные руды обогащают магнитной сепарацией или флотацией. Получают ильменитовый концентрат, содержащий: 40 – 45%  $\text{TiO}_2$ , около 30%  $\text{FeO}$ , около 20%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , остальное примеси. Рутил используют без обогащения.

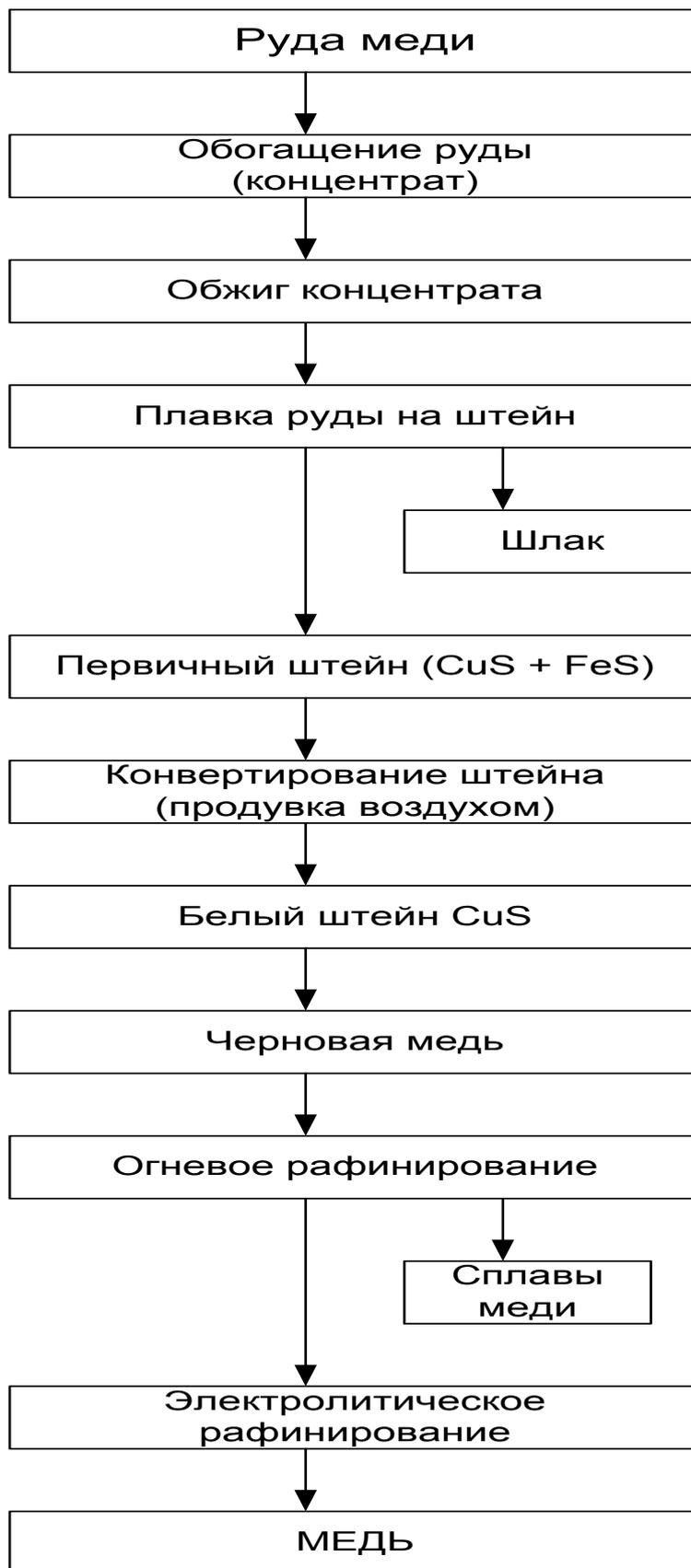


Рисунок 7 - Схема технологических операций получения меди



*Рисунок 8 - Схема технологических операций получения титана*

2. Ильменитовый концентрат плавят в смеси с древесным углем и антрацитом (восстановителем) в специальных руднотермических печах (электродуговых). При  $T = 1600 - 1800^{\circ}\text{C}$  оксиды Fe восстанавливаются. Образующееся железо науглероживается и получается чугун, а низшие оксиды титана переходят в шлак. Основным продуктом – титановый шлак содержит до 80 – 90%  $\text{TiO}_2$ , 2 – 5 % FeO и примеси –  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO и др. Шлак совместно с древесным углем брикетируют, спекают и отправляют на хлорирование. Побочный продукт – чугун используют в металлургическом производстве.

3. Хлорирование титанового шлака проводят в специальных печах с электронагревом и герметизацией рабочего пространства. Брикетированный титановый шлак через специальные фурмы продуваются газообразным хлором. При  $T = 800 - 1250^{\circ}\text{C}$  в присутствии углерода образуется четыреххлористый титан, также другие хлориды:  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$  и др. Четыреххлористый титан отделяется и очищается от других хлоридов благодаря различию температур кипения этих хлоридов методом ректификации в специальных установках. Для более полной очистки от твердых частиц конденсат отстаивают и фильтруют. Жидкий тетрагидрохлорид титана направляют на восстановление.

4. Титан восстанавливают в реакторах при  $T = 950 - 1000^{\circ}\text{C}$ . В реактор загружают чушковый магний, откачивают воздух и заполняют реактор аргоном. Затем внутрь подают паробразный  $\text{TiCl}_4$ . Жидкий Mg и  $\text{TiCl}_4$  взаимодействуют по реакции:  $2\text{Mg} + \text{TiCl}_4 = \text{Ti} + 2\text{MgCl}_2$  с образованием чистого титана в виде спеченной массы – губки с очень высокой пористостью. Губка титана пропитана Mg и  $\text{MgCl}_2$  в количестве до 35 – 40 %, поэтому ее подвергают последующему вакуумированию. Жидкий  $\text{MgCl}_2$  через летку удаляют из реактора.

5. Для удаления из губки  $\text{MgCl}_2$  и других примесей ее нагревают до  $T = 900 - 950^{\circ}\text{C}$  в вакууме. Все примеси возгоняются и в виде паров конденсируются в специальных конденсаторах реактора.

6. Титановую губку на слитки плавят в вакуумно-дуговых печах. Вакуум в печах предохраняет титан от окисления и способствует очистке его от примесей.

Полученные слитки из-за высокой пористости губки имеют большое количество дефектов – раковин, пор. Для получения плотного металла их подвергают второму вакуумно-дуговому переплаву, используя как расходимые электроды. После этого чистота титана составляет 99,6 – 99,7%. Слитки после второго переплава используют для прокатки на лист, профиль,ковки, штамповки заготовок и т. д.

Для получения сплавов титана с другими металлами (Al, Mg, V и др.) эти металлы примешивают к губке перед первым переплавом. После второго переплава получают плотные с равномерным составом сплавы.

### 6.3 Получение алюминия и магния

Основной способ изготовления алюминия – электролиз из расплава криолита ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) с добавлением  $\text{AlF}_3$  и Na. Перед электролизом проводят подготовку расплава и подготовку алюминиевых руд, а затем путем электролиза и рафинирования получают чушковый алюминий. Последовательность получения алюминия схематично показана на рис. 9.

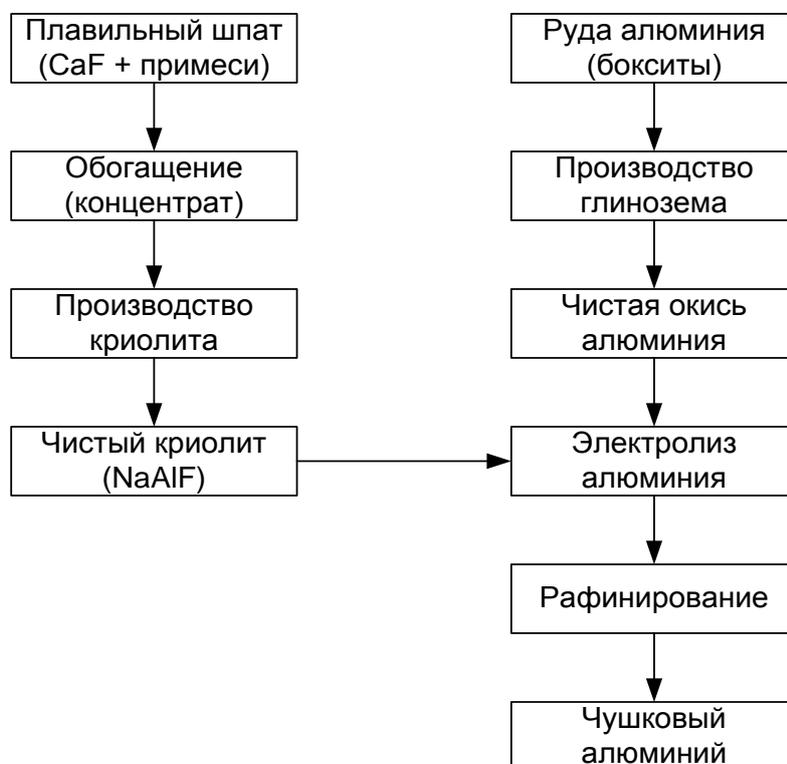
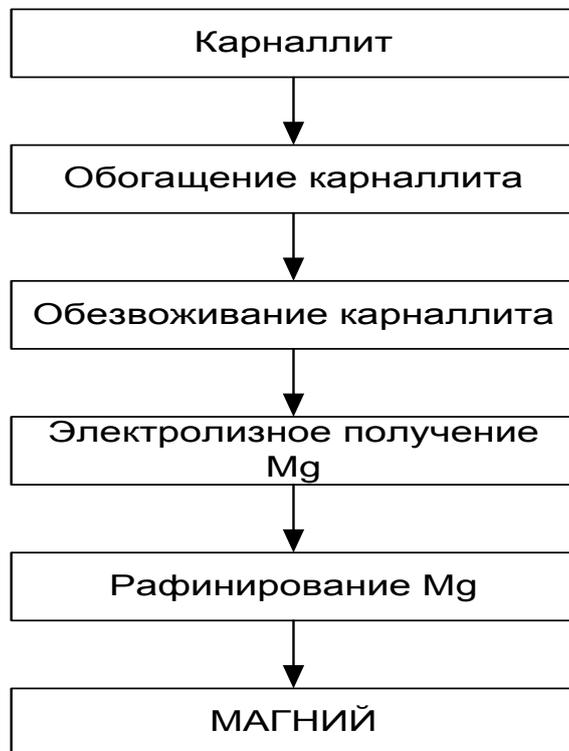


Рисунок 9 - Последовательность производства алюминия

Так же, как и алюминий, магний получают электролизом из его расплавленных солей. Основным сырьем для производства магния являются: карналлит, магнезит, доломит. Последовательность получения магния схематично показана на рис. 10.



*Рисунок 10 - Последовательность получения магния*

### **Вопросы для самопроверки по первому разделу**

1. Какие металлы относятся к черным, а какие - к цветным?
3. Что такое чугун и сталь и чем они отличаются друг от друга?
4. В чём состоит сущность выплавки чугуна
5. В чём заключается сущность передела чугуна в сталь?
6. Назовите способы выплавки стали и чем они отличаются?
7. Что составляет основную продукцию черной металлургии?
8. Какие физико-химические процессы лежат в основе выплавки меди, титана, алюминия, магния?

## Раздел второй

### Основы получения металлических заготовок

#### 7 Технология получения отливок

Изготовление деталей машин, разнообразных механизмов и приборов из любых конструкционных материалов состоит в из формообразовании с соблюдением необходимой геометрии (размеры, форма), а также допустимой чистоты поверхности (шероховатость). В результате соответствующих переработок формообразования получают заготовку или полупродукт, который служит для изготовления соответствующей детали. Заготовка может быть получена способами литья, сваркой, пайкой, методами порошковой металлургии. При этом улучшение качества заготовки подразумевает достижение минимальных припусков на последующую механическую обработку и высокая чистота поверхности.

**Процесс литья** заключается в заливке расплавленного и перегретого (до оптимальной температуры) металла в литейную форму, внутренняя полость которой соответствует (с определенным допуском) конфигурации и размерам будущей детали. Конечную продукцию называют **отливкой**. В процессе кристаллизации расплавленного металла и последующего охлаждения формируются механические и эксплуатационные свойства отливок. После литья отливка может быть либо полностью готовым изделием, либо заготовкой. В последнем случае на отливке предусматривается припуск.

Достоинства литейной технологии: 1) универсальность, позволяющая получать отливки сложной конфигурации из большой номенклатуры сплавов, широкого диапазона размеров и массы (от нескольких граммов до сотен тонн); 2) экономичность процесса в серийном производстве.

Недостатки процесса литья: 1) пониженные пластичность и прочность литой заготовки по сравнению с деталями, полученными методом штамповки; 2)

необходимость проведения сложных и дорогостоящих операций по обеспечению техники безопасности и экологической защиты окружающей среды.

Для производства отливок используются сплавы черных металлов: серые, высокопрочные, ковкие и другие виды чугунов; углеродистые и легированные стали; сплавы цветных металлов; медные (бронзы и латуни), цинковые, алюминиевые и магниевые сплавы; сплавы тугоплавких металлов; титановые, молибденовые, вольфрамовые и другие.

Все сплавы, используемые для литья, должны обладать специальными литейными свойствами:

- жидкотекучесть (способность сплава свободно заполнять литейную форму). Она зависит от температурного интервала кристаллизации, вязкости и поверхностного натяжения расплава, температуры заливки и формы, свойств литейной формы;
- усадка (уменьшение размеров при затвердевании и охлаждении). Различают объемную и линейную усадки. Для фасонного литья допустимая усадка – не должна превышать 2,5%;
- ликвация (дендритная, объемная, по удельному весу). Это химическая неоднородность состава стали по объему отливки. Стали и сплавы, склонные к ликвации, требуют специальной обработки, уменьшающей ее величину;
- склонность к поглощению газов, которые могут быть уменьшены специальными технологиями.

Требования к отливкам: 1) заданная плотность; 2) однородность по химическому составу и структуре; 3) минимальные внутренние напряжения; 4) гладкая и чистая поверхность отливки.

**Литейная форма** представляет собой конструкцию, состоящую из элементов, образующих рабочую полость, заполнение которой расплавом обеспечивает получение отливки заданных размеров и конфигурации. Литейные формы под-

разделяют по количеству заливок на разовые и многократные, по материалу – на песчаные, песчано-цементные, гипсовые, металлические и другие.

Металлические формы из чугуна и стали являются многократными (постоянными), поскольку выдерживают сотни и тысячи заливок. Песчаные, оболочковые формы со смоляным связующим и формы, изготовленные по выплавляемым моделям, являются разовыми. Разовые литейные формы получают с помощью специальных приспособлений – моделей. Процесс изготовления литейных форм из формовочных смесей называют **формовкой**. Последний включает подготовку оснастки; дозирование смеси; введение ее в рабочую полость оснастки; уплотнение смеси в оснастке; выполнение вентиляционных каналов; вытяжка модели из формы и извлечение стержня; отделка элементов формы, сборки и установка под заливку.

**Модельный комплект** – это совокупность технологической оснастки и приспособлений, необходимых для образования в форме полости, соответствующей контурам отливки. В модельный комплект входят модели, модельные плиты, стержневые ящики, модели элементов литниковой системы и другие приспособления.

**Литейная модель** (рис. 11а) – это приспособление, при помощи которого в литейной форме получают полость с формой и размерами, близкими к конфигурации получаемой отливки. Литейные модели бывают неразъемными, разъемными, с отъемными частями и другие.

**Модельная плита** (рис. 11 б) – металлическая плита с закрепленными на ней моделями и элементами литниковой системы. Ее применяют при машинной формовке.

**Стержневой ящик** (рис. 11в) – приспособление, служащее для изготовления стержней. Бывают цельными, разъемными, вытряхными и другие. *Стержень* - это элемент литейной формы для образования отверстия или внутренней полости, или сложного контура в отливке.

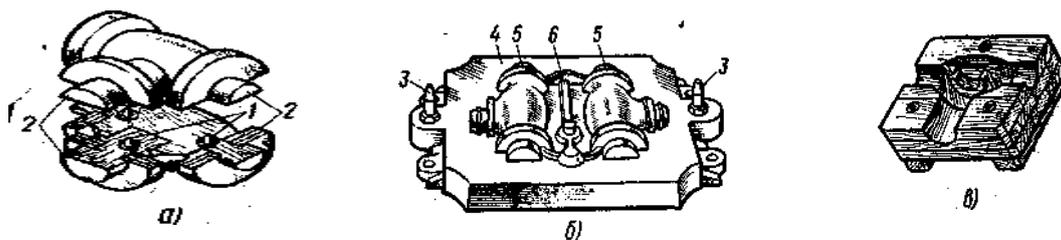


Рисунок 11 - Литейная модель (а), модельная плита (б) и стержневой ящик (в) для корпуса вентиля

**Припуск на механическую обработку** – слой металла, удаляемый в процессе механической обработки отливки с ее обрабатываемых поверхностей для обеспечения заданной геометрической точности и качества поверхности детали.

**Формовочные уклоны** служат для удобства извлечения модели из формы без ее разрушения и для свободного удаления стержня из стержневого ящика. Уклоны выполняют в направлении извлечения модели из формы.

Модели и стержневые ящики для единичного и серийного производства изготавливают деревянными, а для массового производства – из чугуна, алюминиевых сплавов, пластмассы.

**Формовочные материалы** – это совокупность природных и искусственных материалов, используемых для приготовления формовочных и стержневых смесей. В качестве исходных материалов используют формовочные кварцевые пески и литейные формовочные глины. Глины обладают связующей способностью и термохимической устойчивостью, что позволяет получать отливки без пригара. Если глина не обеспечивает необходимых свойств смесей, применяют различные связующие материалы: смолы, олифа, жидкое стекло.

**Формовочная смесь** – это многокомпонентная смесь формовочных материалов, соответствующая условиям технологического процесса изготов-

ления литейных форм. Формовочные смеси по характеру использования разделяют на облицовочные, наполнительные и единые.

**Облицовочная смесь** – это формовочная смесь, используемая для изготовления рабочего слоя формы. Такие смеси содержат повышенное количество исходных формовочных материалов (песка, глины) и имеют высокие физико-механические свойства.

**Наполнительная смесь** – это формовочная смесь для заполнения формы после нанесения на модель облицовочной смеси. Поэтому ее готовят путем переработки оборотной смеси с малым количеством исходных формовочных материалов. Облицовочные и наполнительные формовочные смеси используют при изготовлении крупных и сложных отливок.

**Единая смесь** – это формовочная смесь, применяемая одновременно в качестве облицовочной и наполнительной смеси. Такие смеси применяют при машинной формовке и на автоматических линиях в серийном и массовом производствах. Единые смеси готовят из наиболее огнеупорных песков и глин с наибольшей связующей способностью, чтобы обеспечить их долговечность.

Формовочные смеси должны иметь высокую огнеупорность, достаточную прочность и газопроницаемость, пластичность, податливость и т.д.

**Огнеупорность** – способность смеси и формы сопротивляться размягчению или расплавлению под воздействием температуры расплавленного металла. Чем крупнее песок, тем меньше в нем примесей и пыли, и чем больше кремнезема, тем более огнеупорная смесь. При низкой огнеупорности на поверхности отливки образуется пригар – прочное соединение формовочной или стержневой смеси с поверхностью отливки.

**Прочность** – способность материала формы не разрушаться при извлечении модели из формы, транспортировании и заливке форм. Прочность формовочной смеси увеличивается с увеличением содержания глины, с уменьшением размеров зерен песка, плотности.

**Газопроницаемость** – способность смеси пропускать через себя газы. Газопроницаемость тем выше, чем больше песка в формовочной смеси и чем он крупнее, а также чем меньше содержание глины в формовочной смеси.

**Пластичность** – способность деформироваться без разрушения и точно воспроизводить отпечаток модели. Пластичность смеси увеличивается с повышением в ней (до определенного предела) связующих материалов и воды, а также песка с мелкими зернами.

**Податливость** – способность формы или стержня сжиматься при усадке отливки.

Технологические свойства формовочных смесей:

1) **текучесть** – способность обтекать модели под действием внешних сил или заполнять полости стержневых ящиков;

2) **термохимическая устойчивость** – способность смеси не оплавляться и не образовывать химических соединений. Если низкая, то на поверхности формы образуется пригар (смесь окислов);

3) **выбиваемость** – способность свободно удаляться из отливки после ее охлаждения;

4) **гигроскопичность** – способность смеси после сушки поглощать влагу из окружающей среды; должна быть минимальной.

**Стержневая смесь** – это многокомпонентная смесь формовочных материалов, соответствующая условиям технологического процесса изготовления литейных стержней. Стержни при заливке расплавленного металла испытывают значительные тепловые и механические воздействия по сравнению с формой, поэтому стержневые смеси должны иметь более высокую огнеупорность, газопроницаемость, податливость, малую газотворную способность, легко выбиваться из отливок и т.д.

Приготавливают формовочные и стержневые смеси перемешиванием компонентов смеси в течение 5-12 минут с последующим их выстаиванием в бункерах. Все операции приготовления смесей – просушка, дробление и про-

сеивание формовочных материалов, отделение металлических включений, подача в смесители компонентов смеси, перемешивание их, разрыхление и подача готовой смеси к формовочным машинам – осуществляются автоматически.

**Литниковая система** представляет собой систему каналов и элементов литейной формы, обеспечивающих подвод расплавленного металла в полость формы и ее заполнение, а также питание отливки при затвердевании (рис. 12).

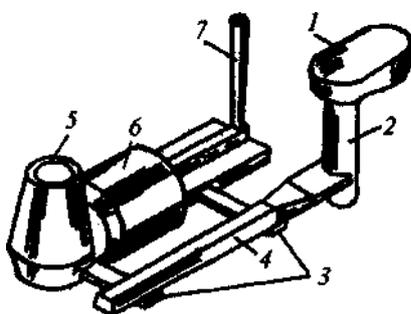


Рисунок 12 - Отливка с литниковой системой: 1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3- питатели; 4 – шлакоуловитель; 5 – прибыль; 6 – отливка; 7 – выпор.

**Шлакоуловитель** – элемент литниковой системы, канал в плоскости разъема литейной формы. Предназначен для задержки шлака и других неметаллических включений и для подачи металла к питателям.

К литниковой системе относят также выпоры и прибыли. *Выпор* предназначен для вывода газов и всплывающих шлаков из полости формы: он же сигнализирует о конце заливки появлением избытка металла. **Прибыли** компенсируют усадку отливки, поэтому их располагают над массивными частями отливки. При этом конфигурацию и размеры прибылей подбирают таким образом, чтобы процесс кристаллизации отливки завершился именно в них.

Условия эффективности прибылей:

1) прибыль должна затвердевать после отливки или питаемого термического узла;

2) запас жидкого металла в прибыли должен быть достаточным для питания отливки;

3) форма прибыли и ее расположение должны обеспечить свободный доступ жидкого металла к отливке;

4) размеры и масса прибыли должны быть минимальными.

Последовательность операций изготовления отливки

1. Окраска и сборка форм: для уменьшения физико-химического воздействия между жидким металлом и формовочной смесью для получения более чистой поверхности отливки, поверхность формы и стержня покрывают специальными высокотемпературными присыпками и красками. Краски содержат в себе: огнеупорный наполнитель – мелкоизмельченный кварцевый песок; связующие – жидкое стекло; дисперсную среду – бензин, ацетон, спирт. После окраски обе полуформы и стержни подвергают сборке. Для этого в нижнюю опоку устанавливают стержни. Затем ставят верхнюю опоку и скрепляют с нижней специальными замками.

2. Заливка литейных форм – это процесс заполнения полости литейной формы расплавленным металлом из чайниковых, барабанных и других ковшей. Ковш с расплавленным металлом от плавильных печей к месту разлива перевозят мостовым краном или по монорельсовому пути.

Важное значение при заливке форм имеет выбор температуры заливки расплавленного металла. При повышенной температуре заливки возрастает жидкотекучесть металла, улучшается питание отливок, но горячий металл более газонасыщен, сильнее окисляется, вызывает пригар на поверхности отливки. В то время как низкая температура заливки увеличивает опасность незаполнения полости формы, захвата воздуха, ухудшается питание отливки. Заливка производится при температуре металла на 30-100°C выше температуры плавления.

3. Охлаждение отливок в литейных формах после заливки продолжается до температуры выбивки. Небольшие тонкостенные отливки охлаждаются

в форме несколько минут, а толстостенные (массой 50-60 т) – в течение нескольких суток и даже недель.

4. Выбивка: после заливки металла, его охлаждения и затвердевания производят выбивку отливки (процесс удаления затвердевших и охлажденных до определенной температуры отливок из литейной формы, при этом литейная форма разрушается). Выбивка отливок осуществляют на различных выбивных установках. Отработанная формовочная смесь поступает в специальные формовочные участки для регенерации и последующего использования.

5. Обрубка: выбитые из формы отливки подвергают обрубке (процесс удаления с отливки прибылей, литников, выпоров и заливок по месту сопряжения полуформ). Обрубку производят пневматическими зубилами, ленточными и дисковыми пилами, газовой резкой и на прессах. Литники от чугунных отливок отбивают молотками сразу же после выбивки из форм перед удалением стержней. Литники и прибыли от стальных отливок отрезают газовой или плазменной резкой. Ленточные и дисковые пилы используют для обрубки отливок из алюминиевых, магниевых, медных сплавов. После обрубки отливки зачищают, удаляя мелкие заливки, остатки прибылей, выпоров и литников. Зачистку выполняют маятниковыми и стационарными шлифовальными кругами, пневматическими зубилами, газоплазменной обработкой и другими способами.

6. Очистка отливок - это процесс удаления пригара, остатков формовочной и стержневой смеси с наружных и внутренних поверхностей отливок. Ее осуществляют в галтовочных барабанах периодического или непрерывного действия, в гидropескоструйных и дробеметных камерах, химической или электрохимической обработкой и другими способами.

После всего этого отливка проходит термическую обработку, контроль качества металла и поступает в механические цеха на дальнейшую обработку.

**Литье в оболочковые формы** – это способ получения отливок свободной заливкой расплава в оболочковые формы из термореактивных смесей. Оболочковые формы отличаются высоким комплексом технологических свойств: достаточной прочностью, газопроницаемостью, податливостью, негигроскопичностью.

Оболочковые формы изготавливают из формовочных песчано-смоляных смесей с термопластичными или термореактивными связующими смолами. Если смола в смеси находится в порошкообразном состоянии, то такую формовочную смесь называют неплакированной, а если зерна песка покрыты сплошной тонкой пленкой смолы, то смесь будет плакированной. Формовочная смесь содержит наполнитель – мелкозернистый кварцевый песок – 100%; связующее – пульвербакелит (фенолформальдегидная смола с добавками уротропина) – 6-7%; увлажнитель (керосин, глицерин) – 0,2-0,5%; растворитель (ацетон, этиловый спирт) – до 1,5%.

Оболочковые формы получают с помощью нагретых металлических моделей, изготавливаемых из серого чугуна, стали и алюминиевых сплавов. Каждая из форм состоит из двух соединенных оболочковых полуформ. Толщины оболочек для мелких и среднего размера отливок колеблются соответственно в пределах 8-10 и 12-15 мм. Технология изготовления оболочек включает в себя следующие операции:

1. Нагрев модельной оснастки до 200 - 250°C.
2. Нанесение на рабочую поверхность модельной оснастки (пульверизатором) разделительного состава – быстро затвердевающей силиконовой жидкости, образующей при этом разделительную пленку, которая предотвращает прилипание к оснастке формовочной смеси и тем самым упрощает последующее отделение оболочки от модели.
3. Нанесение песчано-смоляной смеси на модельную оснастку.
4. Формирование и отверждение оболочки необходимой толщины.

5. Съём оболочковой полуформы после ее изготовления с модели осуществляется с помощью толкателей.

Способом литья в оболочковые формы получают отливки массой от 0,2 до 200 кг практически из любых литейных сплавов. Этим способом изготавливают ребристые мотоциклетные цилиндры, коленчатые валы автомобильных двигателей.

Преимущества способа литья в оболочковые формы: возможность получения тонкостенных отливок; небольшой расход смеси; качественная структура металла за счет повышенной газопроницаемости форм; широкая возможность автоматизации; небольшие допуски на обработку резанием.

Недостатки: ограниченный размер отливок (до 1500 мм); высокая стоимость смесей; выделение вредных паров и газов из смесей при изготовлении форм.

**Кокильным литьем** называют процесс получения отливок посредством свободной заливки расплавленного металла в многократно используемые металлические формы – **кокили**. Многократность использования формы обусловлена, главным образом, материалом отливки. С помощью одной формы (или большей части ее элементов) кокильным литьем получают до 500 мелких стальных, 5000 чугунных или десятки тысяч алюминиевых отливок. Отдельные элементы кокиля (в первую очередь – стержни, оформляющие внутренние полости отливки) могут изготавливаться как из металла, так и из стержневой смеси; в последнем случае они предназначены лишь для разового использования. Металлические стержни сложной формы целесообразно делать разборными.

При конструировании кокилей необходимо обеспечить их технологичность, в которую включаются следующие требования:

- 1) наличие минимально необходимого числа разъемов и стержней;
- 2) использование стандартных и унифицированных деталей;

3) конструктивное обеспечение быстрого удаления из рабочей полости кокиля газов посредством различных вентиляционных каналов;

4) легкое удаление из кокиля отливок и металлических стержней, а также сменных элементов кокиля;

5) наличие элементов для естественного и искусственного охлаждения;

6) включение в конструкцию кокиля (или стержня) элементов литниковой системы для обеспечения разливки расплава;

7) обеспечение (за счет центрирующих штырей, отверстий, фиксирующих шпонок) четкой сборки (без перекоса) при смыкании подвижных частей кокиля;

8) конструктивное обеспечение регулируемого теплоотвода за счет использования многослойных кокилей, стенки которых состоят из двух (или более) слоев с разным составом, структурой и теплопроводностью.

Технологический процесс кокильного литья требует специальной подготовки кокиля к заливке и включает следующие операции:

1) очистку рабочей поверхности кокиля от остатков отработанного покрытия, загрязнений и ржавчины;

2) нанесение на предварительно подогретые до 100-150°C рабочие поверхности кокиля специальных теплоизоляционных слоев и противопопригарных красок, одновременно повышающих качество поверхности отливок;

3) нагрев кокиля до оптимальной (для каждого сплава своей) температуры в пределах 115-475°C в целях повышения заполняемости формы расплавом и тем самым улучшения качества отливок;

4) сборку формы, состоящую из простановки стержней и соединения металлических полуформ;

5) заливку расплава в форму;

6) охлаждение отливок до установленной температуры;

7) разборку кокиля с извлечением отливки.

Металлический стержень извлекается из отливки до ее удаления из кокиля. Для удаления воздуха и газов из рабочих полостей кокилей широко используют естественные зазоры между элементами формы – разъемные и неразъемные стыки деталей кокиля. По этим стыкам устраивают газоотводные (вентиляционные) каналы глубиной 0,2-0,5 мм, выполняя их в виде рисок-насечек или тонких щелей. Глубокие полости вентилируются через специально устанавливаемые в стенках кокиля вентиляционные пробки и игольчатые вставки (пакеты иголок, запрессованные в сквозные отверстия формы), имеющие газоотводные зазоры.

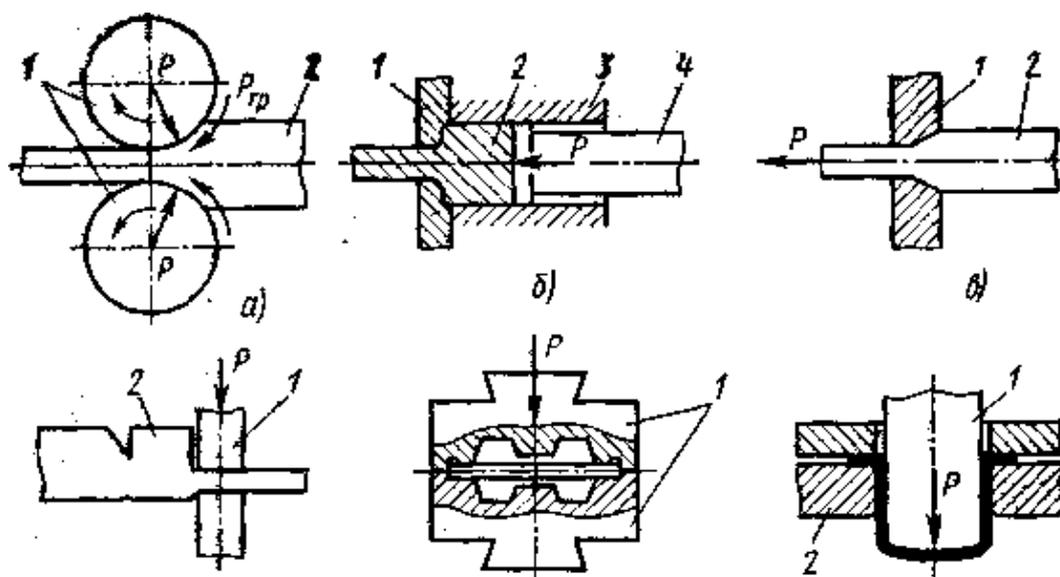
Все операции технологического процесса литья в кокиль механизированы и автоматизированы. Используют однопозиционные и многопозиционные автоматические кокильные машины и автоматические кокильные линии изготовления отливок.

При литье в кокиль сокращается расход формовочной и стержневой смесей. Затвердевание отливок происходит в условиях интенсивного отвода теплоты от залитого металла, что обеспечивает более высокие плотность металла и механические свойства, чем у отливок, полученных в песчаные формы. Кокильные отливки имеют высокую геометрическую точность размеров и малую шероховатость поверхности, что снижает припуски на механическую обработку вдвое по сравнению с литьем в песчаные формы. Этот способ литья высокопроизводителен.

Недостатки кокильного литья: высокая трудоемкость изготовления кокилей, их ограниченная стойкость, трудность изготовления сложных по конфигурации отливок.

## 8 Технология обработки металлов давлением

**Процесс обработки металлов давлением (ОМД)** – это придание материалу требуемой формы, размеров, физико-механических свойств без нарушения его сплошности путем пластической деформации. Обработка металлов давлением основана на их способности в определенных условиях пластически деформироваться в результате воздействия на деформируемое тело (заготовку) внешних сил. Нарушение сплошности строения материала деформируемой заготовки в большинстве случаев недопустимо и приводит к браку.



*а - прокатка; б - прессование; в - волочение;*

*г - ковка; д - штамповка; е - вытяжка*

*Рисунок 13 - Схемы основных видов обработки металлов давлением*

Процессы обработки металлов давлением по назначению подразделяют на два вида:

1) для получения заготовок постоянного поперечного сечения по длине (прутков, проволоки, лент, листов), применяемых в строительных конструкциях или в качестве заготовок для последующего изготовления из них деталей только обработкой резанием или с использованием предварительного пластического формоизменения. Основными разновидностями таких процессов являются прокатка (рис. 13 а), прессование (рис. 13 б) и волочение (рис. 13 в).

2) для получения деталей или заготовок (полуфабрикатов), имеющих приближенно формы и размеры готовых деталей и требующих обработки резанием лишь для придания им окончательных размеров и получения поверхности заданного качества. Основными разновидностями таких процессов являются ковка (рис. 13 г) и штамповка (рис. 13 д).

**Прокатное производство.** Прокатке подвергают до 90% всей выплавляемой стали и большую часть цветных металлов. При прокатке металл пластически деформируется вращающимися валками. Взаимное расположение валков и заготовки, форма и число валков могут быть различными. Выделяют три основных вида прокатки: продольную, поперечную и поперечно-винтовую.

При продольной прокатке (рис. 13 а, 14 а) заготовка 2 деформируется между двумя валками 1, вращающимися в разные стороны, и перемещается перпендикулярно к осям валков. При поперечной прокатке (рис. 14 б) валки 1, вращаясь в одном направлении, придают вращение заготовке 2 и деформируют ее. При поперечно-винтовой прокатке (рис. 14 в) валки 1 расположены под углом и сообщают заготовке 2 при деформировании вращательное и поступательное движения.

Для нормального протекания процесса, особенно для его начала в период захвата, необходима определенная величина сил трения. Со стороны валков на заготовку действуют нормальные силы  $N$  и сила трения  $T$ . Для обеспечения захвата заготовки валками необходимо, чтобы тангенс угла за-

хвата был меньше коэффициента трения. При горячей прокатке стали гладкими валками угол захвата равен  $15-24^\circ$ , при холодной –  $5-8^\circ$ .

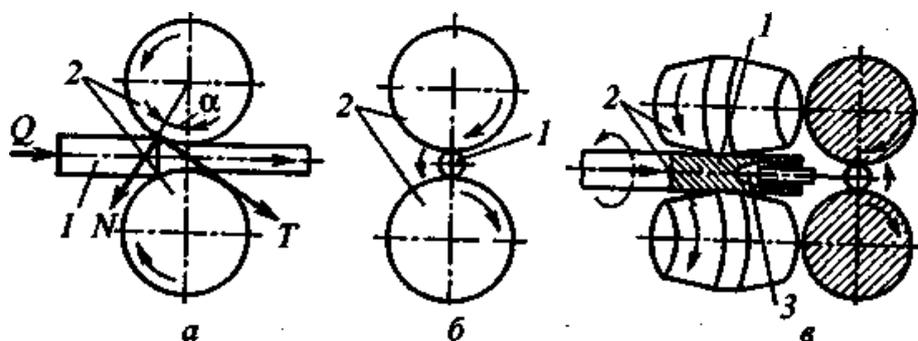


Рисунок 14 - Схема основных видов прокатки

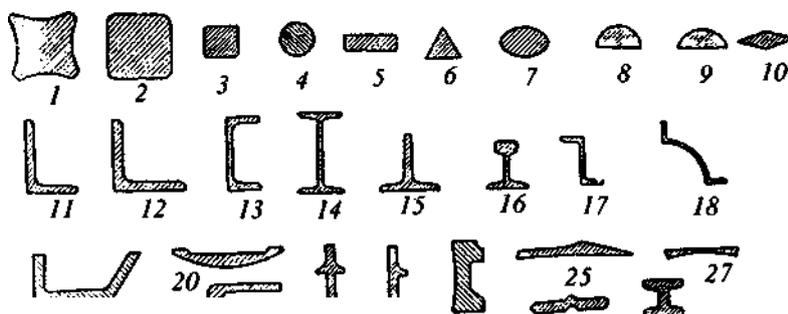
Таким образом, степень обжатия заготовки при прокатке в значительной степени определяется углом захвата или коэффициентом трения между валками и заготовкой. Для его увеличения часто на поверхность валков наносят риски, рифления, специальные наплавочные валики, повышая тем самым допустимую величину абсолютного обжатия.

**Инструментом прокатки являются валки**, которые могут быть гладкими для проката листов, полос либо с фигурными вырезами – ручьями. Совокупность соответствующих вырезов в верхнем и нижнем валках образует калибр. Пара валков обычно имеет несколько калибров.

Форму поперечного сечения продукции, получаемой при прокатке, называют **профилем**. Совокупность форм и размеров профилей, получаемых прокаткой, называют **сортаментом** (рис. 15).

Хотя сортамент прокатных изделий весьма обширен, все же представляется возможным весь прокат разбить на следующие основные четыре группы: сортовой, листовой, трубы, специальные виды проката (бандажи, колеса, периодические профили и пр.). Наиболее разнообразной является группа сортового проката, который подразделяется на простые и фасонные профили. Прокат в виде круга, квадрата, полос плоского сечения относится к

простым профилям. Прокат сложного поперечного сечения относится к фасонным профилям.



*Рисунок 15 - Разновидности профилей проката*

В зависимости от назначения фасонные профили подразделяются на профили общего или массового потребления (угловой профиль, швеллеры, двутавровые балки, шестигранные профили и др.) и профили специального назначения (рельсы железнодорожные широкой и узкой колеи, рельсы трамвайные, профили сельскохозяйственного машиностроения, электропромышленности, нефтяной промышленности и др.). В прокатных цехах производят более 1600 размеров простых профилей, более 1100 фасонных профилей общего потребления и примерно 1350 размеров профилей специального назначения.

**Волочение металла** — это процесс протягивания прутка через отверстие, размеры которого меньше, чем исходные размеры прутка. При этом длина прутка увеличивается, а поперечное сечение приобретает форму отверстия с одновременным уменьшением поперечного сечения. Волочение выполняется тяговым усилием, приложенным к переднему концу обрабатываемой заготовки. Волочение производят в холодном состоянии. Данным способом получают проволоку всех видов, прутки с высокой точностью поперечных размеров и трубы разнообразных сечений.

Основной **инструмент при волочении** сплошных профилей – **волоки** различной конструкции, а при волочении полых профилей – волоки и оправ-

ки к ним. Волочение осуществляют на волочильных станах, состоящих из тянущего устройства и волочильного инструмента.

Обработка металла волочением находит широкое применение в металлургической, кабельной и машиностроительной промышленности. Волочением получают проволоку с минимальным диаметром 0,002 мм, прутки диаметром до 100 мм, причем не только круглого сечения, трубы главным образом небольшого диаметра и с тонкой стенкой. Волочением обрабатывают стали разнообразного химического состава, прецизионные сплавы, а также практически все цветные металлы (золото, серебро, медь, алюминий, и др.) и их сплавы. Изделия, полученные волочением, обладают высоким качеством поверхности и высокой точностью размеров поперечного сечения. Если изделию требуется придать в основном эти характеристики, то такой вид обработки называют **калибровкой**.

Волочение выгодно отличается от механической обработки металла резанием (строганием), фрезерованием, обточкой и прочее, т. к. при этом отсутствуют отходы металла в виде стружки, а сам процесс заметно производительнее и менее трудоемок. Волочением можно изготавливать полые и сплошные изделия часто сложного поперечного сечения, производство которых другими способами не всегда представляется возможным (например, тонкие изделия, прутки значительной длины). При волочении ряда профилей (квадратный, треугольный, шестиугольный) используют составные волокна, которые отличаются высокой универсальностью, т. к. в одной и той же волоке, меняя профиль отверстия соответствующей перестановкой отдельных пластин, можно получать различные размеры профиля. Кроме составных волокон при производстве прутков и главным образом труб применяют шариковые и роликовые волокна. При получении профилей сложной формы применяют дисковые волокна, в которых рабочие поверхности волочильного канала образуются поверхностями свободно вращающихся дисков (неприводных валков-роликов).

В качестве исходного материала для волочения применяют катаную и прессованную заготовки. При производстве алюминиевой, медной и другой проволоки в качестве исходной заготовки используют катанку, получаемую непосредственно из плавильной печи через кристаллизатор и непрерывный прокатный стан. Независимо от способа получения исходная заготовка перед волочением проходит тщательную предварительную подготовку, которая заключается в проведении того или иного вида термической обработки, удалении окалины и подготовке поверхности для закрепления и удержания на ней смазки в процессе волочения. Эти предварительные операции обеспечивают нормальное выполнение пластической деформации в волочильном отверстии, способствуют получению высокого качества поверхности изделия, уменьшают усилие и энергию на волочение и снижают износ волочильного инструмента.

При производстве проволоки и прутков волочением большое внимание уделяют подготовке поверхности продукта обработки перед волочением. Удаление окалины в калибровочных и волочильных цехах производят механическим, химическим и электрохимическим способами, а также комбинациями этих способов.

**Прессование металла** — это процесс выдавливания металла из контейнера через одно или несколько отверстий в матрице с площадью меньшей, чем поперечное сечение исходной заготовки. При прессовании реализуется одна из самых благоприятных схем нагружения, обеспечивающая максимальную пластичность - всестороннее неравномерное сжатие.

Этот способ пластической обработки находит широкое применение при деформировании как в горячем, так и в холодном состоянии металлов, имеющих не только высокую податливость, но и обладающих значительной природной жесткостью, а также в одинаковой мере применим для обработки металлических порошков и неметаллических материалов (пластмасс и др.).

Прессованием изготавливают прутки диаметром 3...250 мм, трубы диаметром 20 - 400 мм при толщине стенки 1,5 - 12 мм, полые профили с несколькими каналами сложного сечения, с наружными и внутренними ребрами, разнообразные профили с постоянным и изменяющимся (плавно или ступенчато) сечением по длине. Профили для изготовления деталей машин, несущих конструкций и других изделий, получаемые прессованием, часто оказываются более экономичными, чем изготавливаемые прокаткой, штамповкой или отливкой с последующей механической обработкой. Кроме того, прессованием получают изделия весьма сложной конфигурации, что исключается при других способах пластической обработки.

К основным преимуществам прессования металла относятся: возможность успешной пластической обработки с высокими вытяжками (в том числе малопластичных металлов и сплавов); возможность получения практически любого поперечного сечения изделия, что при обработке металла другими способами не всегда удается; универсальность применяемого оборудования, позволяющего легко переходить на производство профилей различных конфигураций; производство изделий с высокими качеством поверхности и точностью размеров поперечного сечения, что во многих случаях превышает принятую точность при пластической обработке металла другими способами (например, при прокатке).

К недостаткам получения изделий прессованием следует отнести: повышенный расход металла на единицу изделия из-за существенных потерь в виде пресс-остатка; появление в некоторых случаях заметной неравномерности механических и других свойств по длине и поперечному сечению изделия; сравнительно высокую стоимость прессового инструмента.

Процесс прессования выполняется в условиях равномерного всестороннего сжатия металла, что положительно сказывается на увеличении его пластичности. Поэтому прессованием можно обрабатывать металлы и сплавы с низкой природной пластичностью. Однако трехосное сжатие вызывает

необходимость значительных усилий при обработке. Поэтому прессование требует повышенного расхода энергии на единицу объема деформируемого тела. В качестве силового агрегата для прессования наибольшее распространение получили гидравлические прессы с усилием прессования 1000-1500 т. Они не боятся перегрузки, позволяют регулировать в широких пределах скорость перемещения силового плунжера, легко автоматизируются, в том числе с помощью систем программного управления.

**Производство бесшовных и сварных труб.** Трубы подразделяют на бесшовные и сварные. Бесшовные трубы прокатывают диаметром 30-650 мм с толщиной стенки от 2 до 160 мм, сварные – диаметром от 5 до 2500 мм. Материалом для производства труб могут быть как углеродистые, так и легированные стали, цветные металлы. В качестве заготовки для производства бесшовных труб применяют круглые или граненые слитки, а также круглые катаные прутки большого диаметра. Основной операцией является прошивка заготовки, т.н. получение в заготовке сквозного отверстия. Перед прошивкой заготовку нагревают в методической печи до температуры горячей обработки давлением и направляют на прошивочный стан с двумя бочкообразными валками, оси которых расположены под углом 10-15° друг к другу. Таким образом, при прошивке отверстия используется принцип поперечно-винтовой прокатки. В результате вращательно-поступательного движения заготовки при достаточно большой степени обжатия в центре заготовки возникают весьма значительные радиальные растягивающие напряжения, вызывающие течение металла от центра к периферии. Металл в центре доводится до состояния разрыхления, и заготовка легко прошивается неподвижным прошивком, надвигаясь на него в результате поступательного движения заготовки. Прокатка производится несколько раз; каждый раз трубы вместе с оправкой поворачиваются в валках на 90°. Способ позволяет получать трубы диаметром 57-426 мм с толщиной стенки 3-30 мм.

Сварные трубы из низкоуглеродистых и низколегированных сталей изготавливают из прокатных полос, называемых штрипсами, или листов, ширина которых равна длине диаметра (или половине диаметра трубы). Процесс производства трубы включает в себя формовку плоской заготовки в трубу, сварку (печную, электрическую, газовую), правку, калибровку.

Печной сваркой получают трубы небольшого диаметра до 10-114 мм и толщиной 2-5 мм из низкоуглеродистой стали. Процесс включает в себя нагрев полос в газовой печи до 1300-1350°C, формовку нагретого участка в сварочной воронке и обжатие со значительной пластической деформацией. Большое распространение при производстве труб большого диаметра для магистральных трубопроводов получил способ с применением электросварки под флюсом.

Производят сварные трубы с прямыми и спиральными швами. По первой технологии из листа формируют трубную заготовку, затем ее сваривают с наложением наружного и внутреннего швов. При производстве труб со спиральным швом в качестве исходной заготовки используют ленту, которую сворачивают по спирали в трубу нужного диаметра и затем сваривают по кромке наружным и внутренним швами. Прочность, а главное надежность, труб со спиральным швом выше, чем с прямым.

**Объемная штамповка** – вид обработки металлов давлением, при котором формообразование поковки осуществляется пластическим деформированием заготовки в специальном инструменте – штампе. Полости в верхней и нижней частях штампа называют **ручьями штампа**. Течение металла в штампе ограничивается поверхностями полости штампа, и в конечный момент штамповки при смыкании они образуют единую замкнутую полость, соответствующую по конфигурации штамповке.

Исходным материалом для горячей объемной штамповки служат прокатанные или прессованные прутки круглого, квадратного или прямоугольного сечения, а также периодический прокат. Штамповку можно вести непо-

средственно от прутка с последующим отделением его от штампованной части, однако чаще предварительно от прутка отрезают мерные куски. Штамповке подвергают чаще всего углеродистые или низколегированные стали, реже цветные металлы и сплавы. Основными достоинствами горячей объемной штамповки являются: высокая производительность (до сотен поковок в час); меньшие припуски и допуски, чем при ковке (это приводит к упрощению механической обработки и снижению ее трудоемкости); квалификация штамповщика может быть существенно меньшей, чем кузнеца.

Процесс штамповки выполняется в зависимости от вида поковки, рода материала и характера производства на установках различного вида. Наиболее широкое распространение получила штамповка на молотах, прессах, горизонтально-ковочных машинах и другом оборудовании. Молоты представляют собой машины динамического действия на обрабатываемый металл и чаще всего характеризуются массой падающих частей.

В зависимости от типа штампа горячую объемную штамповку подразделяют на штамповку в открытых штампах, штамповку в закрытых штампах и в штампах для выдавливания.

К **листовой штамповке** относятся методы получения деталей и изделий, для которых в качестве исходной заготовки используют листовой материал, трубные заготовки, катаные и гнутые профили. Листовую штамповку осуществляют как в холодном, так и подогретом состоянии. Горячей листовой штамповкой получают крупногабаритные детали паровых и гидравлических турбин большой мощности, детали прессов, прокатных станов и другие.

## **9 Технологические основы сварочного производства**

**Сварка** – это технологический процесс получения неразъемных монолитных соединений материалов. Физическая сущность – установление непрерывной структурной связи, т.е. общей кристаллической решетки. Зона между соединенными материалами называется *сварным швом*.

**Свариваемость** – технологическое свойство материалов образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструкционным и эксплуатационным требованиям к ним. Свариваемость оценивают установлением степени соответствия заданных свойств сварного шва со свойствами основного металла (предел прочности, текучести, пластичность, сопротивление хрупкому разрушению). Кроме того, оценивают склонность к образованию сварочных дефектов: трещины, поры, шлаковые включения.

Необходимые для осуществления процесса сварки условия:

- 1) физический контакт свариваемых материалов;
- 2) электронное взаимодействие между поверхностями, в результате которого устанавливаются межатомные связи.

Сварке подвергают разнообразные металлы и их сплавы, неметаллы (графит, керамика) и пластмассы.

В зависимости от формы энергии, используемой для образования сварного соединения, различают три основных класса сварки:

- 1) **термическая сварка** – это класс сварки, который осуществляют плавлением в зоне соединения за счет подвода внешней энергии. При этом образуется сварочная ванна. К этому классу относят электрическую, плазменную, электронно-лучевую, лазерную сварки

Недостатки этого класса:

- чтобы избежать окисления расплава, его защищают пленкой шлака и защитными атмосферами;
- кристаллизация шва происходит при растягивающих напряжениях, что может вызвать растрескивание;
- ликвация, неметаллические включения снижают прочность шва;
- изменяется структура основного металла под влиянием нагрева, что может снизить прочностные свойства.

Достоинства:

- возможность сварки в монтажных и цеховых условиях;
- разнообразие типов соединений, габаритов конструкций;
- широкий диапазон толщин;
- возможность изменения химического состава за счет сварочных проволок разного химического состава, т.е. дополнительное микролегирование, создание покрытий.

2) **термомеханическая сварка** – используется и нагрев, и пластическая деформация за счет давления. К этому классу относятся контактная, диффузионная сварки.

Преимущества термомеханической сварки:

- меньшие остаточные напряжения в шве;
- меньше расход электрической энергии, т.к. нагрев, как правило, импульсный, кратковременный;
- возможность механизации и автоматизации.

3) **механическая сварка** – используется механическая энергия и давление. К ней относят: холодную сварку, сварку ультразвуком, сварку взрывом, трением. Давление вызывает упругопластические деформации, которые разрушают окисные пленки, обеспечивают физический контакт и образование межатомных связей.

Достоинства:

- расширение диапазона свариваемых материалов (металл - керамика);
- исключает возникновение трещин, пористости;
- исключает деформацию сварных узлов;
- меньше меняет структуру и свойства металла, хотя упругопластические деформации упрочняют металл, а, следовательно, уменьшают пластичность;
- возможность механизации и автоматизации.

Недостаток – не всегда конструкцию можно подвергать воздействию давлением.

**Электрическая дуга** – это мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла.

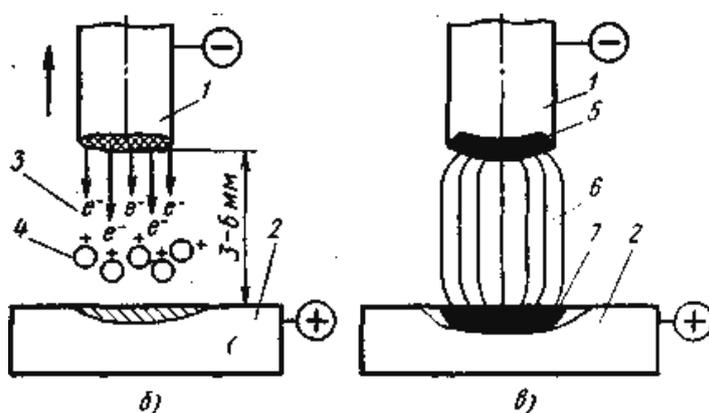


Рисунок 18 - Схема процесса зажигания дуги.

Процесс зажигания дуги в большинстве случаев включает три этапа: короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3 - 6 мм (рис. 18 а) и возникновение устойчивого дугового разряда (рис. 18 б). Электрическая дуга между электродом и заготовкой – это дуга прямого действия; а между двумя электродами – косвенная дуга.

Источник электропитания – трансформаторы постоянного или переменного действия.

Способы электродуговой сварки в зависимости от материала электрода и способа включения электрода и заготовки в цепь электрического тока:

1) Сварка неплавящимся электродом (графитовым или вольфрамовым): при этом дуга прямого действия. Сварка осуществляется за счет плавления основного металла или присадочного материала.

2) Сварка плавящимся (металлическим) электродом. Дуга прямого действия, расплавляются одновременно основной металл и электрод.

3) Сварка косвенной дугой, горящей между двумя электродами (как правило, неплавящимися). Основной металл расплавляется за счет тепла столба дуги.

4) Сварка трехфазной дугой (комбинированный вариант 1 и 3 способов), т.е. дуга горит между электродами, а также между каждым электродом и основным металлом. Мощность такой дуги значительно больше.

Питание дуги осуществляют от трансформаторов переменного тока или от сварочных выпрямителей, или генераторов постоянного тока. Преимущества генераторов постоянного тока: повышается устойчивость горения дуги; улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях; возможность вести сварку на прямой и обратной полярностях; возможность сваривать тугоплавкие материалы. Источники переменного тока более распространены, т.к. они долговечнее и имеют более высокий коэффициент полезного действия. Дугу и расплав защищают специальными защитными атмосферами (аргон).

При ручной дуговой сварке электроды перемещают вручную вдоль заготовки. **Электрод** – стержень из проволоки, близкой по химическому составу свариваемому материалу. Он же служит присадочным материалом. На электроды наносят покрытия для создания шлаковой и газовой защиты расплавленного металла сварочной ванны; раскисления наплавленного металла с помощью добавок в покрытие таких элементов, как марганец, кремний, титан, алюминий в виде ферросплавов или чистых элементов; легирования наплавленного металла, что позволяет изменять его химический состав, а также расширяет возможность получения требуемых свойств наплавленного металла; улучшения стабильности горения дуги посредством включения в покрытие элементов с малым потенциалом ионизации.

Достоинства ручной дуговой сварки:

- 1) возможность получать прерывистые короткие швы сложной конфигурации;
- 2) возможность проводить сварку в любых монтажных условиях.

Недостатки:

- 1) практически невозможно сварить тонкий металл (1-2 мм);
- 2) зависимость от умения сварщика.

При автоматической дуговой сварке под флюсом используют электроды без покрытия. Поэтому для защиты сварной ванны от окисления необходим флюс толщиной 30-50 мм. Этот метод обеспечивает повышенную производительность и качество. Подача и перемещение электродной проволоки механизированы. Автоматизированы процессы зажигания дуги и заварки кратера в конце шва. Используют его в серийном производстве для выполнения длинных прямолинейных и кольцевых швов, особенно часто используют в стане по производству сварных труб.

В зависимости от способа нагрева и расплавления соединяемых материалов существуют ещё электрошлаковая сварка, электронно-лучевая, плазменная, лазерная сварка. **Плазменная сварка** – локальное расплавление соединяемых материалов **плазменной струей**, которая представляет собой направленный поток частично или полностью ионизированного газа с температурой 10000 - 20000°C. **Лазерная сварка** использует для разогрева энергию луча лазера. **Лазер** – это устройство, генерирующее электромагнитное излучение в диапазоне длин волн ультрафиолетом до субмиллиметрового инфракрасного за счет вынужденного испускания или рассеяния света активной средой, помещенной в оптический резонатор. Внешний источник энергии: в газовых лазерах – тлеющий электрический разряд; в твердотельных – импульсная лампа; в жидкостных (растворы органических красителей) – свет вспомогательного лазера. В лазере происходит преобразование различных видов энергии в энергию лазерного излучения. Главный элемент лазера – активная среда, для образования которой используют воздействие света, электрический разряд в газах, химическую реакцию, бомбардировку электронным лучом. Активная среда расположена между зеркалами, образующими оптический резонатор. Лазерная сварка позволяет получать швы с минимальным расплавлением металла, снижает напряжения и деформации в сварных конструкциях по сравнению с другими способами сварки.

**Пайкой** называют соединения с межатомными связями в результате нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации. В качестве припоя при сварке используется металл или сплав с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов. Для удаления оксидов с поверхности паяемого материала и припоя и предотвращения из образования в процессе пайки применяется вспомогательный материал, называемый **паяльным флюсом**. Свойство материалов образовывать паяное соединение при заданном режиме пайки называется **паяемостью**.

Пайка отличается от сварки следующими характерными особенностями:

1) пайка производится при температуре ниже температуры плавления обоих или хотя бы одно из соединяемых металлов;

2) в процессе пайки между соединяемыми деталями в определенный момент находится жидкая металлическая прослойка припоя;

3) в отличие от сварки плавлением паяное соединение образуется не в результате непосредственного взаимодействия металлов соединяемых деталей, а вследствие взаимодействия припоя и основного металла;

4) обязательным условием пайки являются смачивание паяемых поверхностей припоем, диффузия компонентов припоя в сторону основного металла и компонентов основного металла в сторону припоя и последующая кристаллизация жидкой прослойки.

Пайкой можно изготавливать сложные по конфигурации узлы и целые конструкции, состоящие из нескольких деталей, за один производственный цикл (нагрев), что позволяет рассматривать пайку как групповой метод соединения материалов и превращает ее в высокопроизводительный технологический процесс, легко поддающийся механизации и автоматизации. К числу очень важных преимуществ пайки следует отнести возможность соединения разнородных металлов, а также металлов с неметаллами.

## 10 Основы размерной обработки заготовок деталей машин

Эксплуатационные свойства машин и механизмов в значительной мере определяются точностью изготовления деталей, качеством их рабочих поверхностей. Под **точностью** изготовления понимают отклонение фактических геометрических размеров и формы поверхности (неплоскостность, конусообразность, перекос и неперпендикулярность осей) от предельных значений, указанных в рабочих чертежах. **Качество поверхности** характеризуется ее шероховатостью, величиной и знаком остаточных напряжений в поверхностном слое, ее структурой и химическим составом. Требования точности и качества назначает конструктор на основе эксплуатационных требований к детали и рекомендаций ГОСТа. Несоблюдение заданных требований точности и качества детали в процессе ее изготовления может стать причиной снижения эксплуатационных свойств, надежности машин и их преждевременного выхода из строя.

Рассмотренные в предыдущих лекциях высокопроизводительные и экономичные способы формообразования деталей методами литья, обработки давлением и способы с применением сварки по своим технологическим возможностям не в состоянии обеспечить точность, необходимую для изготовления большинства деталей машин и механизмов. Поэтому полученные указанными методами изделия используются в качестве заготовок. Эти заготовки изготавливают несколько больших размеров с технологическим припуском. Наличие припуска позволяет методами размерной обработки получать деталь требуемой точности путем управляемого съема металла припуска. Чем точнее изготовлена заготовка, тем меньше требуемая величина припуска и тем ниже трудоемкость последующей размерной обработки заготовки. Многообразие используемых в современных конструкциях деталей различного типоразмера и материала требует применения эффективных способов размерной обработки.

Все способы размерной обработки деталей классифицируют по виду используемой энергии на механические, физико-химические и комбинированные.

Механические делятся на: 1) точение; 2) сверление; 3) строгание; 4) фрезерование; 5) протягивание; 6) шлифование; 7) отделочные операции.

В основу классификации способов механической обработки заложен вид используемого инструмента и кинематика движений. Так, в качестве инструмента при точении используются токарные резцы; при сверлении – сверла; при фрезеровании – фрезы; при строгании – строгальные резцы; при протягивании – протяжки; при шлифовании – шлифовальные круги; при хонинговании – хоны; а при суперфинише – абразивные бруски.

Физико-химические методы подразделяются на: 1) электроэрозионную; 2) электрохимическую; 3) лучевую; 4) ультразвуковую.

Комбинированные методы: ультразвуковая механическая обработка; плазменно-механическая; электрохимическое шлифование. Эти методы одновременно совмещают несколько традиционных методов.

**Обработка резанием** – это процесс получения деталей требуемой геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхностей за счет механического срезания с поверхностей заготовки режущим инструментом материала технологического припуска в виде стружки.

Основным режущим элементом любого инструмента является режущий клин. Его твердость и прочность должны существенно превосходить твердость и прочность обрабатываемого материала, обеспечивая его режущие свойства. К инструменту прикладывается усилие резания, равное силе сопротивления материала резанию, и сообщается перемещение относительно заготовки со скоростью  $V$ . Под действием приложенного усилия режущий клин врезается в заготовку и, разрушая обрабатываемый материал, срезает с поверхности заготовки стружку.

Внешний вид стружки характеризует процессы деформирования и разрушения материала, происходящие при резании. Различают четыре возможных типа образующихся стружек: сливная; суставчатая; элементная и стружка надлома.

В процессе резания режущий клин, испытывая интенсивное трение, контактирует с материалом стружки и обработанной поверхностью в контактных зонах.

Для снижения сил трения и нагрева инструмента применяют принудительное охлаждение зоны резания смазочно-охлаждающими средами (СОС), подавая их в зону резания специальными устройствами.

В зависимости от используемого типа инструмента способы механической обработки подразделяются на лезвийную и абразивную. Отличительной особенностью лезвийной обработки является наличие у обрабатываемого инструмента острой режущей кромки определенной геометрической формы, а для абразивной обработки – наличие различным образом ориентированных режущих зерен абразивного инструмента, каждое из которых представляет собой микроклин.

Основными способами лезвийной обработки являются точение, сверление, фрезерование, строгание и протягивание. Способы абразивной обработки – шлифование, хонингование и суперфиниширование (полирование).

Любой способ обработки включает два движения: главное – движение резания и вспомогательное – движение подачи. Подача – это расстояние между положениями режущей кромки за определенный промежуток времени. Главное движение обеспечивает срез металла, а вспомогательное – подачу в зону обработки следующего необработанного участка заготовки. Эти движения осуществляются за счет перемещения заготовки или инструмента.

В процессах сверления, точения, фрезерования и шлифования главное движение подачи выполняются одновременно, а в процессах строгания, хонингования движение подачи выполняется после главного движения.

К основным параметрам режима резания относятся скорость главного движения резания, скорость подачи и глубина резания. **Скорость главного движения резания** определяется максимальной линейной скоростью главного движения режущей кромки инструмента. Эта скорость выражается в м/с. Если главное движение резания вращательное, как при точении, сверлении, фрезеровании и шлифовании, то скорость резания будет определяться линейной скоростью главного движения наиболее удаленной от оси вращения точки режущей кромки – максимальной линейной скоростью главного движения:

$$v = \omega D/2,$$

где  $D$  – максимальный диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, определяющий положение наиболее удаленной от оси вращения точки режущей кромки;  $\omega$  – угловая скорость.

Выразив угловую скорость  $\omega$  через частоту вращения шпинделя станка  $n$ , получим:  $v = \pi n D$ .

При строгании и протягивании скорость резания определяется скоростью перемещения строгального резца и протяжки в процессе резания относительно заготовки. При хонинговании и суперфинишировании скорость резания определяется с учетом осевого перемещения инструмента. Скорость резания оказывает наибольшее влияние на производительность процесса, стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

**Подача инструмента** определяется скоростью подачи  $V_s$ . В технологических расчетах параметров режима при точении, сверлении, фрезеровании и шлифовании используется понятие подачи на один оборот заготовки  $S_0$ , мм/об. Подача на один оборот численно равна перемещению инструмента за время одного оборота:  $S_0 = V_s/n$ .

**Глубина резания**  $h$  определяется расстоянием по нормали от обработанной поверхности заготовки до обрабатываемой, мм. Глубину резания задают на каждый рабочий ход инструмента. **Геометрические параметры режущего инструмента** определяются углами, образуемыми пересечением поверхностей лезвия, а также положением поверхностей режущих лезвий относительно обрабатываемой поверхности и направлением главного движения.

**Силы резания**  $P$  представляют собой силы, действующие на режущий инструмент в процессе упругопластической деформации и разрушения срезаемой стружки. **Мощность процесса резания** определяется:  $N = P_s V$

**Производительность обработки** при резании определяется числом деталей, изготавливаемых в единицу времени:  $Q = 1/T_{шт}$ . Время изготовления одной детали равно:  $T_{шт} = T_0 + T_{ин} + T_{всп}$ , где  $T_0$  – машинное время обработки, затрачивае-

мое на процесс резания, определяется для каждого технологического способа;  $T_{ин}$  – время подвода и отвода инструмента при обработке одной детали;  $T_{всп}$  – вспомогательное время установки и настройки инструмента. При обработке резанием решается задача по установлению максимально допустимой производительности при сохранении требуемого качества поверхности и стойкости инструмента.

**Электроэрозионная обработка** основана на использовании явления электрической эрозии – разрушения материала электродов при электрическом пробое межэлектродного промежутка. Размерная электроэрозионная обработка заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки путем съема материала припуска за счет управляемого процесса электрической эрозии. Для неё требуется генератор электрических импульсов, рабочая жидкость (низкомолекулярные углеводороды различной вязкости – керосин, индустриальное масло, трансформаторное масло и их смеси, вода, кремнийорганические жидкости и водные растворы спиртов), электроды.

Размерная **электрохимическая обработка** заключается в получении деталей требуемой геометрической формы, размеров и качества поверхности путем снятия с поверхности заготовок слоя металла припуска электрохимическим растворением. Электрохимическая обработка основана на явлении анодного растворения металлов при электролизе.

Область эффективного использования электрохимической обработки обусловлена следующими технологическими особенностями:

- способ позволяет обрабатывать только электропроводные материалы;
- производительность способа не зависит от твердости и прочности обрабатываемых материалов и в несколько раз превосходит производительность обработки резанием заготовок из высокопрочных твердых сплавов, металлокерамики и сталей в закаленном состоянии;
- способ позволяет обрабатывать поверхности любой формы;
- в металле обработанной поверхности отсутствуют остаточные напряжения и наклеп.

Недостатком метода является ограничение его применения обработкой только таких электропроводных материалов, которые при растворении не образуют труднорастворимых пленок. Для этих материалов наряду с электрохимическим воздействием требуется механическое или электротермическое воздействие, удаляющее образующиеся оксидные пленки.

**Ультразвуковая абразивная размерная обработка** заключается в изменении размеров, формы, шероховатостей и свойств поверхности обрабатываемых заготовок за счет съема материала припуска хрупким скалыванием микрообъемов при импульсном ударном силовом воздействии частиц свободного абразива с ультразвуковой частотой  $f = 16-30$  кГц.

Ультразвуковая абразивная обработка эффективна при обработке заготовок из конструкционных материалов, имеющих низкую обрабатываемость резанием, электрофизическим и электрохимическим методами. Это заготовки из хрупких и твердых неэлектропроводных химически стойких материалов, таких, как стекло, кварц, керамика, алмаз, полупроводники.

При обработке используется энергия ультразвуковых колебаний. Главное движение при ультразвуковой обработке – продольные колебания торца инструмента с ультразвуковой частотой и амплитудой.

К **лучевым методам электрофизической обработки** относятся электронно-лучевая и светолучевая обработки. Различие носителей энергии обусловило технологические особенности методов лучевой обработки. При электронно-лучевой размерной обработке для съема материала при формообразовании используют кинетическую энергию сфокусированного пучка электронов. Формирование, фокусировка и управление электронным лучом осуществляются в электронной пушке. Электронно-лучевой нагрев ведется в импульсном режиме. При используемой удельной мощности тепловое воздействие луча приводит к разрушению нагреваемого микрообъема материала за время одного импульса. Разрушение происходит по механизму взрывного вскипания с выносом материала из

зоны обработки в виде паров и капель. В результате на бомбардируемом электронным лучом участке поверхности формируется лунка.

**Светолучевая (лазерная) размерная обработка** используется для съема материала при формообразовании деталей сфокусированный поток электромагнитной энергии высокой мощности, сформированный оптическим квантовым генератором. Светолучевая обработка ведется на воздухе и не требует специальных вакуумных камер. Она позволяет обрабатывать любые материалы независимо от их твердости и вязкости. Метод используется для сверления отверстий, вырезания заготовок, фрезерования пазов и другого.

**Комбинированные методы** являются результатом научно-технического совершенствования процессов размерной обработки. Они повышают производительность, точность обработки и ее экономические показатели. Например, **ультразвуковая механическая обработка** включает операции точения, фрезерования, строгания, протягивания, сверления, зенкерования и нарезания резьб. Ультразвуковые колебания прикладываются к инструменту в осевом направлении подачи. В качестве оборудования при ультразвуковом механическом резании используются стандартные станки, оснащенные сменными ультразвуковыми головками. Эффективность применения способа определяется надежностью работы ультразвуковых головок и качеством акустических контактов.

**Плазменная механическая обработка** включает локальный нагрев срезаемого слоя плазменной струей и последующий съем этого слоя режущим инструментом. Удаляемый при резании металл нагревают плазменным электрическим разрядом на расстоянии, исключающем разогрев режущего инструмента. Регулированием тока разряда обеспечивается нагрев металла на глубину резания до высоких температур.

**Электрохимическое шлифование** выполняют токопроводящим алмазным или абразивным кругом на металлической связке, являющимся катодом в электролите. Преимущества этого метода по сравнению с традиционным шлифованием следующие: исключаются сколы и трещины при обработке хрупких сплавов;

исключаются прижоги при обработке вязких сталей; резко повышается производительность. При электрохимическом шлифовании несколько снижается износ круга и его засаливание, обеспечивается обработка материалов, образующих нерастворимые пленки, исключающие обработку материала методами электрохимической размерной обработки.

### **Вопросы для самопроверки по второму разделу**

1. Что такое литейная форма и для чего она предназначена?
2. Какие свойства формовочных смесей Вы знаете?
3. Для чего необходима литниковая система?
4. Из каких материалов изготавливают кокиль?
5. Перечислите способы получения отливок.
6. На каком свойстве металлических сплавов основана ОМД?
7. Назовите инструмент и оборудование для прокатки сплавов?
8. Назовите характерные особенности процесса прессования.
9. Какие условия необходимы для выполнения сварки?
10. Чем отличается сварка от пайки?

## Раздел третий

### основы технологии производства заготовок и деталей машин из неметаллических материалов

#### 11 Особенности строения и классификация неметаллических материалов

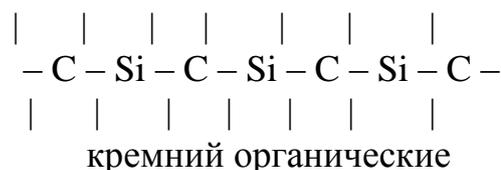
**Неметаллическими** называют материалы, состоящие из конденсированных веществ с неметаллической химической связью (ковалентной (направленной), ионной или молекулярной).

Не только неорганические, но и органические неметаллические материалы имеют полимерное строение. Поэтому одним из основных отличий неметаллических материалов от металлов, сплавов и графита, имеющего также металлическую связь между плоскостями металлической решетки, являются их тепло- и электроизоляционные свойства. Другим важнейшим отличием основной массы неметаллических материалов от металлов и сплавов являются существенно меньшие значения их плотности.

Получение деталей из неметаллических материалов в большинстве случаев сводится к пластической деформации исходной сырой композиции или расплава и закрепления полученной формы последующей термообработкой или охлаждением. Такая, практически лишенная отходов, технология выгодно отличается от получения металлических деталей путем механической обработки заготовок.

Все неметаллические материалы подразделяются на два больших класса:

1) **органические**, т. е. на основе химических соединений (синтез) атомов углерода с  $H_2$ ;  $O_2$ ;  $N_2$  и другими элементами; а также атомов кремния и углерода с другими элементами (кремний органические):



Эти материалы применяют в качестве конструкционных материалов при изготовлении корпусов микросхем, футляров, ручек управления, декоративных деталей, каркасов, подложек, колодок, стоек и т. д.

Существуют следующие материалы органического происхождения: полимеры; пластмассы; каучуки и резины; лаки и эмали; клеи и герметики.

2) **материалы неорганического происхождения** – оксиды металлов и соединения различных оксидов, т. е. материалы на основе минеральных веществ. Эти материалы не взаимодействуют с кислородом, не горючи, обладают высокой механической прочностью (гораздо больше, чем органические).

Их применяют для изготовления деталей электротехники с высокими диэлектрическими свойствами и высокой механической прочностью при высоких температурах: основания микромодулей, высокотемпературные резисторы, подложки микросхем и т. д.

К материалам неорганического происхождения относятся:

1. **Графит** – одна из полимерных модификаций углерода (гальванические элементы, электроды, предохранители, осветительные угли, электрощетки).

2. **Стекла** – аморфные вещества, получаемые переохлаждением жидких расплавов высокой вязкости кислых и основных окислов. Стекла обрабатывают: полировкой, стравливанием поверхности. Внутреннюю структуру улучшают за счет создания стеклокристаллических материалов – ситаллов. Их получают путем полной или частичной кристаллизации. Это промежуточные материалы между стеклом и керамикой.

3. **Керамика** – неорганические кристаллические материалы, получаемые специальной обработкой минеральных композиций с последующим спеканием отформованного изделия (температура спекания 1500 – 2500<sup>0</sup>С).

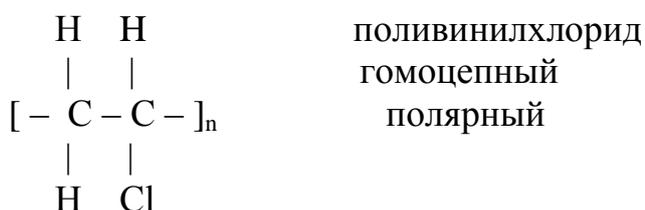
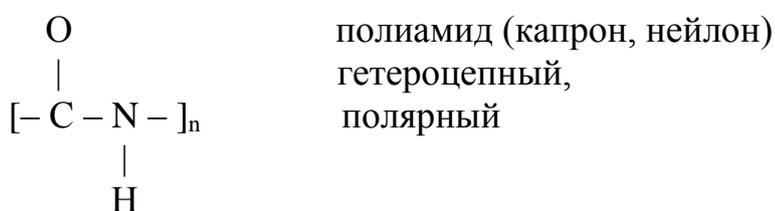
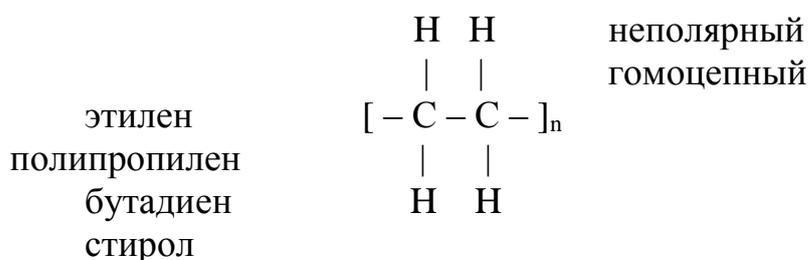
В более чем 80 % развитых стран в качестве **средств пожаротушения** используют **порошки на основе неорганических материалов**. Размер частиц и удельная поверхность частиц порошка оказывают влияние на ингибирование реакций горения и антиокислительный эффект, способствуют разрыву реакционных

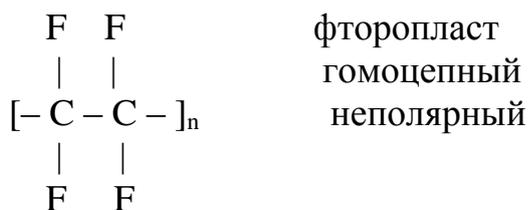
цепей внутри пламени (пропорционально площади удельной поверхности частиц). Применяемые в настоящее время огнетушащие порошки содержат в качестве основы неорганические соли (карбамид и его соединения, фосфаты, сульфаты, карбонаты магния, бария, кальция. диоксид кремния и др. Для повышения эффективности порошковых материалов для пожаротушения стремятся уменьшить размер частиц порошков до 4,5 нм. Этого достигают с помощью специальных технологий диспергирования, основанных на механохимической обработке глин с использованием специальных ПАВ.

## 12 Полимеры и их классификация

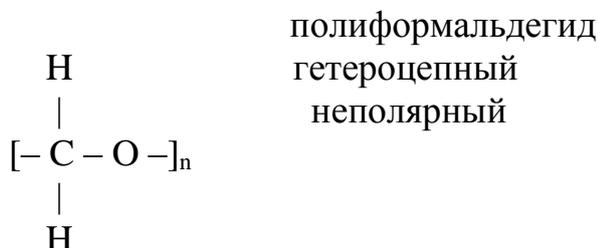
**Полимеры** (высокомолекулярные соединения) – это вещества, молекулы которых состоят из очень большого количества повторяющихся одинаковых элементарных звеньев, соединенных между собой химическими связями. Полимеры получают из **мономеров** – исходных веществ.

Соединение мономеров в полимер происходит при определенных давлении, температуре и в присутствии катализатора (т. е. вещества, способствующего протеканию реакции полимеризации).





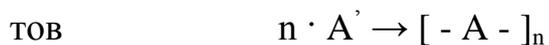
фторопласт  
гомоцепный  
неполярный



полиформальдегид  
гетероцепный  
неполярный

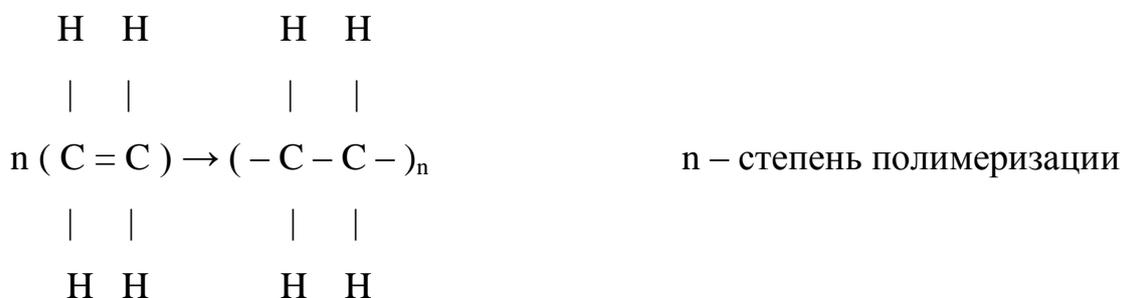
По методам получения полимеры подразделяют на:

1) полимеризационные, т. е. получаемые без выделения побочных продук-

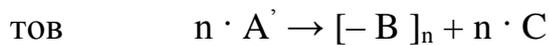


**Полимеризация** – это процесс соединения мономерных молекул в макромолекулы за счет перераспределения связей в молекуле мономера.

Например: этилен, мономолекула ( $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ )



2) поликонденсационные, т. е. получаемые с выделением побочных продук-



**Конденсация** – образование высокомолярных соединений из низкомолярных с выделением побочных веществ (воды, хлора, аммиака и др.). В название добавляется слово “смола”, например, фенол + формальдегид = фенолформальдегидная смола.

Полимеры классифицируют по форме макромолекулы (рис. 1):

а) линейные;



Лестничные, сетчатые и пространственные – термореактивные, т. е. необратимо меняют свойства при изменении температуры. Они нерастворимы в растворителях.

**Основной недостаток полимеров** – разрушение основной цепи макромолекулы (деструкция) под действием внешних факторов (тепла, света, кислорода, радиации, механического воздействия).

### **13 Технология производства изделий из пластмасс**

**Пластмассы** – это органические материалы на основе органических и синтетических полимеров и целевых добавок (наполнителей, стабилизаторов, красителей и т. д.), способные при нагреве размягчаться и под давлением принимать определенную форму.

Виды пластмасс:

1. Простые (ненаполненные).
2. Сложные (композиционные).

Простые – это термопластичные (полиэтилен, полистирол).

Сложные состоят из полимера и ряда специальных добавок, обеспечивающих необходимый комплекс свойств.

Полимеры в композиционных пластмассах выполняют роль связующего.

Наполнители, как правило, твердые (в виде порошка, волокон или листов).

- оксиды Ti, Zr, Si, и др.
- слюда, тальк, стекло
- древесина, лен, хлопок, целлюлоза.

В зависимости от температуры различают три физических состояния аморфного полимера (рис.2).

1. Стеклообразное (хрупкое) состояние от комнатной температуры до температуры  $T_C$  (стеклования).
2. Высокопластичное (от  $T_C$  до  $T_T$  (текучести)).

### 3. Вязкотекучее состояние.

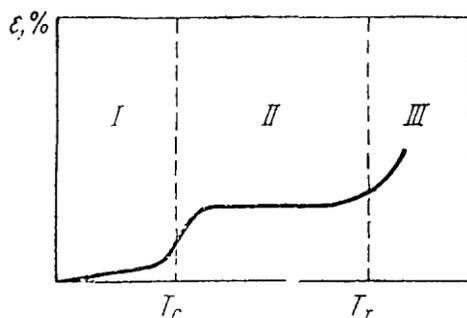


Рисунок 20 - Термомеханическая кривая аморфного полимера.

Эти состояния определяют отличия технологии обработки пластмасс от технологии обработки металлов и сплавов (см. табл. 2).

Таблица 2 - Отличия от производства изделий из сталей и сплавов

Стали, сплавы	Пластмассы
1. Многостадийность технологии выплавка → литье → ОМД → ТО → сварка	1. Одно- или двухстадийность техно- логии плата электротехническая за один прием
2. Значительные потери металла (от- ходы)	2. Высокий коэффициент использо- вания материала (0,85 – 0,95 %)
3. Высокая трудоемкость	3. Низкая трудоемкость (в 5 - 6 раз меньше, чем у металлов)
4. Высокая стоимость технологии из- готовления	4. Относительно малая стоимость технологии изготовления (в 2 – 9 раз меньше, чем металлов)
5. Зависимость метода переработки от химического состава и требуемых свойств.	5. Зависимость метода переработки от физического состояния при нагрее.

Подготовительные операции обработки пластмасс проводят перед переработкой для улучшения технологических свойств. Это:

1) смешение – получение однородной массы полимерных композиций из различных ингредиентов в измельченном виде. Как в жидкой, так и в твердой фазе; смесители;

2) вальцевание – на валковых машинах многократное пропускание массы через зазор между валками для придания пластичности и однородности;

3) таблетирование – для получения из пресс-порошков или пресс-волокон прочных таблеток, что увеличивает точность дозировки и уменьшает потери сырья;

4) сушка и предварительный подогрев для повышения сыпучести и удаления излишней влаги и летучих веществ;

5) гранулирование (та же цель, что и у таблетирования).

**Методы переработки пластмасс в вязкотекучем состоянии.** Сущность переработки – нагрев до температуры больше  $T_T$ , формообразование при этой температуре за счет приложения давления и фиксации полученной формы.

1. **Экструзия** – получение сырья в виде гранул, порошка или расплава изделий бесконечного типа заданного профильного сечения (труб, листов, лент, пленок, оболочек для кабелей и т. д.) путем непрерывного продавливания через формулирующий инструмент. Перерабатывают все полимеры.

2. Литье под давлением.

3. Центробежное литье.

4. **Каландрирование** (то же, что и **вальцевание**) получают листовые и пленочные изделия, а также наносят полимерные покрытия на ткани, нанесение тиснений и рельефного рисунка на пленки и слоистые материалы.

5. Прессование – самый распространенный способ реактопластов; в горячей пресс-форме.

6. Метод формования – из жидкой фазы с помощью отверждающихся смол.

7. Метод полива (кино- и фотопленки, целлофан) – непрерывно льют на движущуюся транспортную ленту, проходящую через специальную тепловую камеру. При этом удаляется растворитель и формируется пленка, которая затем сматывается в рулоны.

Формование крупногабаритных изделий из стеклопластиков и армированных различными волокнами пластмасс проводят следующими методами:

1) традиционные методы, основанные на совместном движении связующего и коротковолокнистого связующего в каналах и полостях формующего инструмента, т. е. это прессование, литье под давлением, экструзия;

2) специфические методы формования крупногабаритных изделий (оболочек, труб, цистерн, кровли, строительных панелей, кузовов автомобилей, корпусов лодок и судов, самолетов, ракет и др.)

- контактное формование (пропитка связующим волокнистого наполнителя, который неподвижен);

- формование с помощью эластичной диафрагмы;

- напыление;

- пропитка под давлением в замкнутой форме;

- намотка;

- центробежное формование;

- протяжка.

#### **Методы получения деталей из пластмасс в твердом состоянии:**

1. Холодное формование листовых заготовок.

2. Объемная штамповка листовых термопластов.

3. Разделительная штамповка (вырубка, пробивка, зачистка).

4. Обработка пластмасс резанием (сверление, шлифование, полирование).

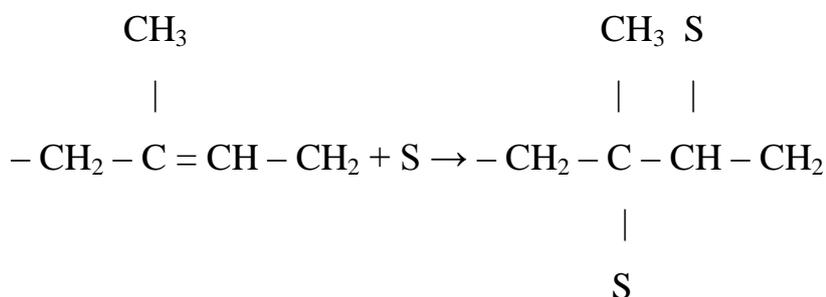
5. Сварка (нагретым газом, нагретым инструментом, ультразвуком, инфракрасным излучением).

6. Склеивание с помощью клея или растворителя.

#### **14 Резина и технология изготовления изделий из неё**

**Резина** – это продукт химической переработки каучуков. **Каучуки** – это высокомолекулярные соединения, линейные полимеры с очень большой молекулярной массой. Отличаются способностью к большим обратимым деформациям при обычных и пониженных температурах. Каучуки бывают: натуральные – сок (латекс) каучуковых растений – гевея и искусственные, синтетические.

Резина – это пластмассы с редкосетчатой структурой, в которых связующим является высокопластичный полимер – каучук.



Для повышения пластичности и долговечности резины используют операцию вулканизации. **Сущность вулканизации** – химическое взаимодействие каучука с серой (вулканизирующим веществом) по месту двойной связи. После этой операции резины способны выдерживать большие пластические деформации (до 1000 %), что свидетельствует о высокой эластичности.

В процессе эксплуатации на резину могут воздействовать внешние факторы (свет, тепло, холод, озон, вакуум и т. д.), что может привести к необратимым изменениям ее свойств. Для повышения стойкости к воздействию внешних факторов в резины добавляют различные вещества: 1) поверхностно-активные вещества; 2) наполнители (сажа, оксиды, мел, тальк, ткани, проволоку и т. д.); 3) пластификаторы (мягчители) – для улучшения формования; 4) красящие вещества.

**Технологический процесс изготовления резиновых изделий** заключается в следующих последовательных операциях:

1. Изготовление резиновых смесей:

а) каучук нарезают на куски и пропускают через нагретые до 40 – 50<sup>0</sup>С валки (вальцевание);

б) смешивают в определенных пропорциях и последовательности с другими ингредиентами: противостарителями; вулканизаторы (S, Se, Na, металлы и перекиси); ускорители процесса вулканизации (ZnO, PbO, MgO, полисульфиды и др.);

в) каландрирование полученной массы - получают сырую (не вулканизированную) резину.

2. Изготовление изделий из резины:

1) прорезинивание ткани в каландрах;

2) выдавливание (трубки, шнуры, полосы);

3) прессование (на гидравлических прессах  $P = 5 - 10$  МПа);

4) литье под давлением: форма заполняется предварительно разогретой смесью под давлением  $P = 30 - 150$  МПа – самый прогрессивный метод.

3. Армирование стальной проволокой, сеткой, капроновой или стеклянной нитью для прочности и долговечности.

4. Вулканизация – это всегда завершающая стадия технологического процесса. Проводят в котлах или прессах под давлением  $130 - 150^{\circ}\text{C}$ . Среда – горячий воздух, водяной пар, горячая вода, расплав соли. При вулканизации линейная структура каучука преобразуется в пространственную. Можно проводить вулканизацию при  $t_{\text{комн}}$ . В этом случае в составе сырой резины не должно быть серы, а изделия обрабатывают в растворе или парах дихлорида серы  $\text{SCl}_2$  или в атмосфере сернистого газа  $\text{SO}$ . Можно использовать сверхвысокочастотный или  $\gamma$  – излучатели. В результате вулканизации повышаются прочность и упругость резины, сопротивление старению, действию органических растворителей, изменяются электроизоляционные свойства.

Важным свойством резины является отсутствие электропроводности, что определяет использование резиновых перчаток, ковриков и прорезиненных тканей в качестве средств предохранения от поражения электрическим током.

## 15 Композиционные материалы

**Композиционными** называют материалы, состоящие из двух и более компонентов, объединенных различными способами в монолиты и сохраняющих при этом индивидуальные особенности. Для композиционных материалов характерна следующая совокупность признаков:

- состав, форма и распределение компонентов материала определены заранее;

- материалы состоят из двух и более компонентов различного химического состава, разделенных в материале границей;
- свойства материалов определяются каждым из его компонентов;
- материал обладает свойствами, отличными от свойств компонентов, взятых в отдельности;
- материал однороден в макромасштабе и неоднороден в микромасштабе;
- материал не встречается в природе, а является созданием человека.

Существующие композиционные материалы можно разделить на три основных класса, отличающиеся микроструктурой: дисперсно-упрочненные, упрочненные частицами и армированные волокном. Все эти материалы представляют собой матрицу из какого-либо вещества или сплава, в которой распределена вторая фаза – обычно более жесткая, чем матрица, которая служит для улучшения того или иного свойства. В основе разделения трех упомянутых классов композиционных материалов лежат особенности их структуры.

Для дисперсно-упрочненных композиций характерной является микроструктура, когда в матрице равномерно распределены мельчайшие частицы размером от 0,01 до 0,1 мкм в количестве от 1 до 15 об.%. В композициях, упрочненных частицами, размер последних превышает 1 мкм, а содержание – 20–25 об.%. Для структуры армировано-упрочненных композитов характерны значительная анизодиаметричность армирующих волокон – их диаметр колеблется от долей микрона до десятков микрон, а длина – от микрон до непрерывных волокон практически неограниченной длины при содержании от нескольких процентов до 70–80 об.%.

Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. Компонент, который обладает непрерывностью по всему объему, является матрицей. Прерывный компонент, разделенный в объеме композиционного материала, считается армирующим (упрочняющим).

В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, а также полимеры органические и неорганические, керами-

ческие, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и ее эксплуатационные характеристики: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Матрицы на неметаллической основе изготавливают из отвержденных эпоксидных, полиэфирных, фенольных, полиамидных и других смол. Наиболее распространены композиции, армированные стеклянными, углеродными, органическими, борными и другими видами волокон.

Композиционные материалы с полимерной матрицей обладают целым рядом достоинств: высокие удельные прочностные и упругие характеристики, стойкость к воздействию агрессивных сред, хорошие антифрикционные и фрикционные свойства наряду с высокими теплозащитными и амортизационными свойствами. Недостатки: низкая прочность и жесткость при сжатии и сдвиге, снижение прочности при повышении температуры до 100 - 200<sup>0</sup>С, изменение физико-механических характеристик при старении и под воздействием климатических факторов.

Наиболее распространенным конструкционным композиционным материалом являются железобетонные плиты, широко используемые в строительстве. Матрицей в них является бетон (неорганический материал), а армирующим волокном – прутки из малоуглеродистой конструкционной стали, называемые арматурой. Бетон обладает хорошей сопротивляемостью при сжатии, а сталь - высокой прочностью при растяжении. Благодаря сочетанию этих свойств железобетонные плиты являются прочным материалом для строительных конструкций.

**Технология производства изделий с полимерной матрицей, армированной волокнами, включает следующие основные операции:**

1) подготовка упрочняющих волокон: удаление замазливателя; нанесение на поверхность водоотталкивающих покрытий; основание, т. е. перемотка и укладывание волокон (лент) в однонаправленную полосу – ровнину;

2) приготовление связующего: проверка компонентов связующего; приготовление смеси компонентов (компаунда);

3) пропитка: пропитка волокон связующим; подсушивание и частичное отверждение;

4) формование;

5) отверждение;

6) удаление оправки;

7) контроль качества изделий;

8) механическая доработка и соединение с другими деталями.

**Применение композиционных материалов.** Стеклопластики (**стекловолокниты, стеклотекстолиты**) содержат в качестве наполнителя стеклянные волокна. По применению делят на конструкционные, электротехнические и радиотехнические. Однонаправленные стеклопластики применяют для изготовления труб и различных профилей, неориентированные – в производстве корпусов лодок, автомобилей, катеров, мебели, силовых деталей электрооборудования, с перекрестным армированием – в конструкциях типа оболочек, в секциях крыльев, хвостового оперения фюзеляжа самолетов, плиты, трубы, корпуса ракет и др.

**Углепластики** (карбоволокниты) получили широкое распространение как конструкционный материал в авиации, космонавтике, ядерной технике: лопасти несущего винта вертолетов, корпуса компрессора и вентилятора, панели солнечных батарей баллоны высокого давления, теплозащитные покрытия.

**Бороволокниты** используют в конструкциях деталей летательных аппаратов: балок, стрингеров, стоек шасси; широко используют в качестве подкрепляющих усиливающих элементов металлических силовых конструкций, банадажных дисков и роторов компрессоров газотурбинных двигателей.

**Органоволокниты** используют в элементах несущих и вспомогательных конструкций современных самолетов и вертолетов, применяют для обшивки самолетов и вертолетов, лопастей несущих винтов вертолетов, подкрепляющих элементов балок, в панелях пола, в сотовых конструкциях.

## Раздел четвёртый

### Теоретическое металловедение

#### 16 Строение и свойства чистых металлов

Как известно, все вещества делятся на металлы и неметаллы. Металлы расположены в левой части Периодической таблицы Менделеева (левее галлия, индия и таллия). Почти 80 % чистых веществ в природе – металлы. Внешние электроны у металлов не прочно связаны с ядром, на наружных электронных оболочках электронов не много (как правило 1-2), поэтому металлы, вступая в связь с неметаллами, легко отдают свои валентные электроны.

Металлы характеризуются рядом особенных свойств:

- металлический блеск;
- высокая тепло- и электропроводности;
- способность к пластической деформации.

Сплавы на основе железа называются черными, все остальные – цветными.

Легкие металлы – Al, Ti, Be, Mg, Li.

Легкоплавкие металлы – Zn, Hg, Pb, Sb.

Тугоплавкие металлы (температура плавления больше температуры плавления железа 1535<sup>0</sup>C) – W, Ta, Nb.

Благородные металлы – Au, Ag, Pt.

Урановые элементы – актиниды.

Редкоземельные металлы – лантаниды.

Щелочно-земельные металлы – K, Na, Li

С точки зрения атомного строения металлы можно подразделить на:

- простые с полностью заполненными или пустыми внутренними электронными оболочками;

- переходные (25 элементов), в которых заполнение внешних электронных оболочек происходит при частичном заполнении внутренних, такие металлы, как Fe, Ni, Co, W, Ti, Mo, Cr, Mn, Sm, Sc.

Простые металлы – диамагнетики. Переходные металлы – либо парамагнетики, либо ферромагнетики за счет наличия некомпенсированных электронов.

**Типы связи атомов в веществе.** Существуют 4 типа связи атомов в веществе:

1 – ионная (галогидно-водородные соединения типа HCl, галогидные соединения щелочных металлов NaCl, окислы и т.п.), взаимодействие двух противоположно заряженных составных частей сводится к электростатическому их притяжению, силы взаимодействия между ними являются в основном электростатическими (кулоновскими), такая связь называется гетерополярной;

2 – ковалентная (CH<sub>4</sub>, алмаз, графит, кремний, германий), характеризуется направленностью и жесткостью, наблюдается в кристаллах неметаллических элементов, валентные электроны одновременно принадлежат к двум соседним атомам, причем каждый атом стремится иметь максимальное число соседей, отдавая для связи с ним один из неспаренных электронов, связь гомеополярная;

3 – металлическая, в узлах кристаллической решетки расположены положительные ионы металла, между ними беспорядочно, подобно молекулам газа, движутся электроны, отщепившиеся от атомов при образовании ионов, связь ненаправленная и нежесткая, т.к. свободные электроны не принадлежат определенному атому и распределены равномерно, отсюда и высокая пластичность металлов;

4 – Ван-дер-Ваальсова, когда в узлах кристаллической решетки помещаются определенным образом ориентированные молекулы, силы связи между молекулами описываются законом Ван-дер-Ваальса (Ar, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O).

Для переходных металлов характерна смешанная связь – металлическая и ковалентная. Чем больше ковалентная связь, тем хуже металлические свойства, пластичность металлов и электропроводность уменьшаются.

Таблица 3 – Типы связи атомов в веществе

Вид связи	Представитель связи	Энергия связи ккал/моль
Ионная	NaCl	180
Ковалентная	алмаз	170
Металлическая	Na (простой)	26
	Fe (переходный)	95
Ван-дер-Ваальсова	Ar	1,8

В газах атомы (молекулы) расположены хаотически, беспорядочно, вследствие чего газы не имеют определенной формы и принимают форму сосуда, в котором они находятся. Частицы в газах хаотически двигаются, отталкиваются друг от друга и газ стремится занять возможно больший объем. Молекулы газа взаимодействуют друг с другом с силами, быстро убывающими с увеличением расстояния между молекулами. Все направления движения молекул газа равновероятны, о чем свидетельствует то обстоятельство, что давление газа на стенки сосуда всюду одинаково. Молекулы газа движутся с самыми различными скоростями, причем как величина, так и направление скорости каждой отдельно взятой молекулы непрерывно меняются из-за соударений (каждая молекула претерпевает в секунду примерно  $10^9$  соударений).

Жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами, сочетая в себе черты этих обоих состояний. Например, для жидкости, как и для кристаллических тел, характерно наличие определенного объема, и вместе с тем жидкость, подобно газу, принимает форму того сосуда, в котором она находится. Как и в кристаллических телах, в жидкости частицы (атомы, молекулы) сохраняют так называемый ближний порядок, т.е. в пространстве закономерно расположено небольшое количество атомов, а не атомы всего объема, как в твердом

теле. Ближний порядок не устойчив: он то возникает, то исчезает под действием тепловых колебаний.

В кристаллических твердых телах, в том числе и металлах, расположение атомов полностью упорядочено, о чем можно судить по часто встречающейся симметрии их внешней формы, правильной внешней органке. В кристаллах имеет место дальний порядок, т.е. упорядоченное расположение частиц по отношению к любой частице наблюдается в пределах значительного объема. Характерная черта кристаллического состояния, отличающая его от жидкого и газообразного, заключается в наличии **анизотропии** - зависимости ряда физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления. Тела, свойства которых одинаковы по всем направлениям, являются изотропными (газы, жидкости, аморфные тела).

Расположение атомов в кристаллических веществах всегда может быть представлено как совокупность параллелепипедов, образующих трехмерную решетку, в каждом параллелепипеде или элементарной ячейке расположение атомов одно и то же. Атомы (положительно заряженные ионы) располагаются в узлах параллелепипеда. В кристалле каждый атом имеет одно и тоже количество ближайших соседей, расположенных на одинаковом от него расстоянии. Длины ребер элементарной ячейки называются первичными трансляциями, поскольку всю решетку можно построить путем бесконечно повторяющегося переноса элементарной ячейки по трем осям координат.

Аморфные тела представляют собой сильно переохлажденные жидкости, частицы которых вследствие сильно возросшей вязкости имеют ограниченную подвижность. В некоторых случаях при больших переохлаждениях подвижность молекул жидкости, не имеющей зародышей кристаллизации, оказывается столь незначительной, что метастабильное состояние может сохраняться очень долго. Жидкость в каких случаях обладает весьма малой текучестью и представляет собой аморфное твердое тело. Для аморфных тел нет определенной температуры перехода в жидкое состояние. Этот переход совершается непрерывно, а не скач-

ком. Как у металлов. Можно лишь указать интервал температур, в пределах которого происходит размягчение тела. Это объясняется тем, что жидкости и аморфные тела отличаются лишь степенью подвижности молекул. Аморфные тела не обнаруживают анизотропии. Примерами аморфных тел служат стекло, смолы, битумы и т.п.

Совокупность атомов или молекул, находящихся в узлах **кристаллической решетки** называется **базисом решетки**. Базис решетки характеризуется векторами и произвольными углами между ними  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$  и  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Воображаемые линии, проведенные через центры атомов, образуют кристаллографическую плоскость. Многократное повторение кристаллографических плоскостей, расположенных параллельно друг другу, воспроизводит пространственную кристаллическую решетку. Расположение атомов в кристаллах удобно изображать в виде пространственных схем – **элементарных кристаллических ячеек**.

Размеры элементарных кристаллических ячеек характеризуются параметрами или периодами решетки  $\mathbf{a}$  – длина ребра куба или расстояние между двумя параллельными плоскостями. Параметры имеют размеры порядка атомных и измеряются в ангстремах.

Методом дифракции рентгеновских лучей через кристаллические материалы было выявлено 230 пространственных групп, объединенных в 32 класса или в 7 систем. Действительно, возможно 7 комбинаций 6 чисел ( $a_1, a_2, a_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ).

7 выделенных систем:

1 – триклинная:  $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ ;  $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3$ ; элементарная ячейка имеет форму косого угольного параллелепипеда;

2 – моноклинная:  $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ ;  $\alpha_3 \neq 90^\circ$ ; элементарная ячейка имеет форму прямой призмы, в основании которой лежит параллелограмм (т.е. форму прямого параллелепипеда);

3 – ромбическая:  $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$ ; элементарная ячейка имеет форму прямоугольного параллелепипеда;

4 – тетрагональная:  $a_1 = a_2 \neq a_3$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$ ; элементарная ячейка имеет форму прямой призмы с квадратным основанием;

5 – ромбоэдрическая:  $a_1 = a_2 = a_3$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \neq 90^\circ$ ; элементарная ячейка имеет форму куба, деформированного сжатием или растяжением вдоль диагонали;

6 – гексагональная:  $a_1 = a_2 \neq a_3$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ ;  $\alpha_3 = 120^\circ$

7 – кубическая система:  $a_1 = a_2 = a_3$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$ ; элементарная ячейка имеет форму куба.

Пример – ОЦК и ГЦК, ГПУ показан на рисунке (рис. 21)

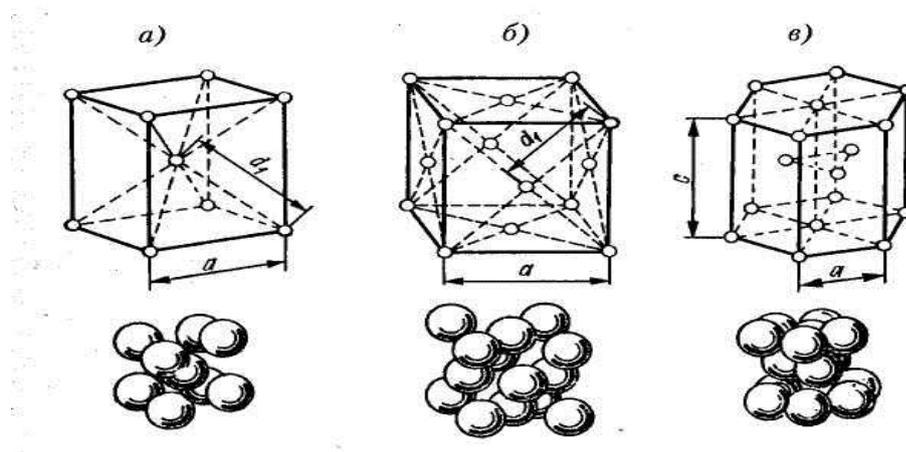


Рисунок 21 – Кристаллические решётки металлов

Каждая кристаллическая решётка характеризуется **координационным числом** ( $K$ ) – это число ближайших равноудаленных от данного атома соседей. Для ОЦК –  $K=8$  ( $K_8$ ), для ГЦК –  $K=12$  ( $K_{12}$ ); для ГПУ –  $K=12$  ( $\Gamma_{12}$ ), для простой кубической –  $K=6$  ( $K_6$ ); для гексагональной –  $K=6$  ( $\Gamma_6$ ). Плотность упаковки кристаллической решетки ( $\gamma$ ) определяется по формуле  $\gamma = V_{\text{ат}}/V_{\text{яч}}$  (где  $V_{\text{ат}}$  – это объем атома, а  $V_{\text{яч}}$  – объем ячейки). Для ГЦК ( $K=12$ ) -  $\gamma=74\%$ ; для ОЦК ( $K=8$ ) -  $\gamma=68\%$ , для простой кубической ( $K=6$ ) -  $\gamma=50\%$ .

Каждый тип кристаллической решётки характеризуется числом атомов, принадлежащих данной ячейке  $n$ : для ОЦК -  $n=2$ , а для ГЦК -  $n=4$

Атомные направления и плоскости кристаллических решёток обозначают с помощью индексов Миллера. Чтобы определить индексы плоскости нужно:

- 1 – определить отрезки на осях координат, отсекаемые этой плоскостью;
- 2 – выразить эти отрезки в параметрах решетки;
- 3 – взять числа, обратные полученным;
- 4 - сделать числа целыми.

Например, плоскость октаэдра  $\{111\}$ . У ГПУ индексы – 4 числа.

Индексы направления определяются по координатам ближайшего атома в данном направлении. Пример (рис. 22)

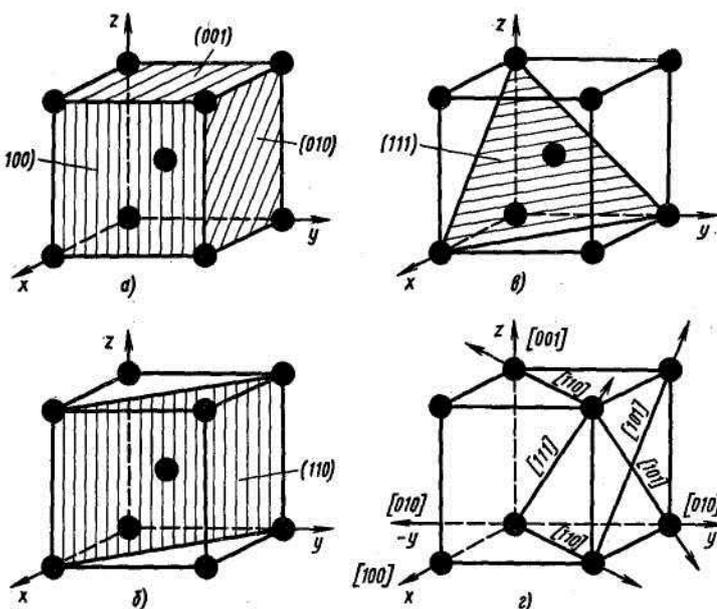


Рисунок 22 – Примеры обозначения кристаллографических направлений и плоскостей

Только для кубической системы индексы направлений и индексы перпендикулярных им плоскостей совпадают.

Реальные кристаллы имеют дефектную структуру. **Дефект кристаллической решетки** – это область, где нарушено расположение атомов и окружение соседних атомов не идентично окружению в идеальном кристалле. Дефект – это любое искажение кристаллической решетки. Дефекты классифицируют по их размерам:

**1 – нуль-мерные (точечные) – вакансии, межузельные атомы, примесные атомы.** Образование вакансий – самопроизвольный процесс. Это беспорядок, который необходим порядку в других узлах кристаллической решетки; основной механизм образования вакансий – растворение пустоты в кристалле (по Шотки, т.е. внешнее испарение рис. 23 а); основной источник вакансий – линейные, объемные и поверхностные дефекты. В металле всегда присутствуют примесные атомы – это прежде всего растворенные водород, азот углерод и т.п. (рис. 23 б). В решетке одного металла могут растворятся другие металлы (в сплавах) с большим атомным радиусом (рис. 23 в).

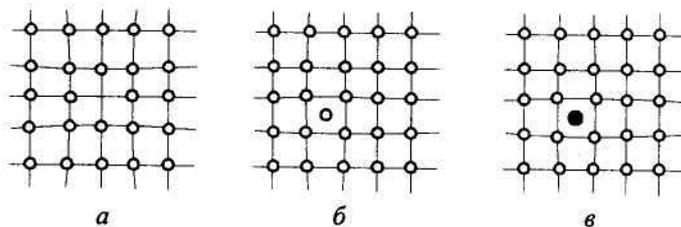


Рисунок 23 – Примеры точечных дефектов кристаллических решёток

Около вакансий и межузельных атомов решетка всегда будет искажена (рис. 23). Точечные дефекты могут взаимодействовать друг с другом, например, примесные атомы могут присутствовать в месте вакансии, тогда общее искажение решетки уменьшается. Точечные дефекты играют большую роль в протекании диффузионных процессов в металлах.

**2 – одномерные (линейные) – цепочки точечных дефектов, дислокации.**

**Дислокация** – это линейный дефект, нарушающий правильное чередование атомных плоскостей. Край лишней полуплоскости (экстраплоскости) наз. краевой дислокацией (рис. 24). Винтовая дислокация – граница незавершенного сдвига.

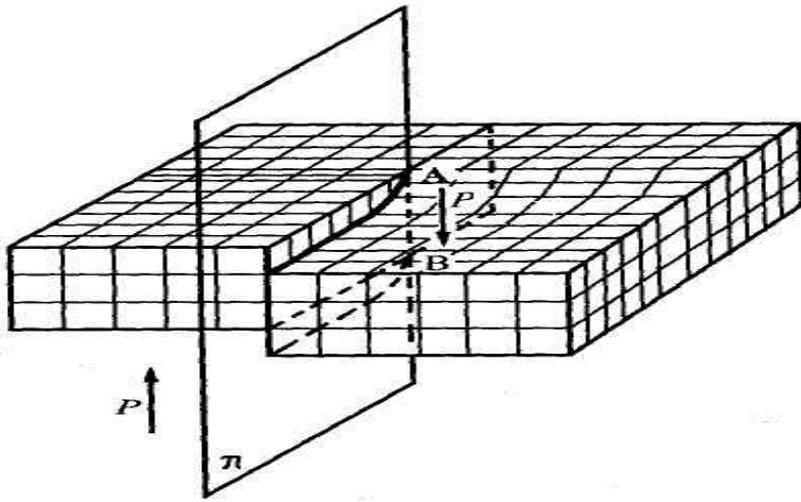


Рисунок 24 – Винтовая дислокация в кристаллической решётке

Дислокации характеризуются вектором Бюргерса ( $\mathbf{b}$ ), который показывает направление и величину смещения кристаллической решетки при движении дислокации.  $\mathbf{b}$  имеет постоянное значение вдоль линии дислокации. **Вектор Бюргерса** характеризует энергию искажения кристаллической решетки вокруг дислокации. Кроме того важной характеристикой является плотность дислокаций  $\rho$ , характеризующая суммарное количество дислокаций в металле. Под плотностью дислокаций понимают суммарную длину дислокаций в см, приходящуюся на  $1 \text{ см}^3$ , т.е. размерность  $\rho$  -  $\text{см}^{-2}$ . Для металлов плотность дислокаций колеблется обычно в пределах  $10^8$ - $10^{13} \text{ см}^{-2}$ , т.е. миллион км дислокаций в  $1 \text{ см}^3$ .

В отличие от точечных дефектов (вакансий) дислокации не двигаются самопроизвольно и хаотически. Но достаточно небольшого напряжения, чтобы дислокация начала двигаться, образуя плоскость, а в разрезе – линию скольжения. Дислокации могут взаимодействовать друг с другом. Разноименные дислокации в одной плоскости притягиваются и могут аннигилировать, одноименные – отталкиваются. Если дислокации находятся в параллельных плоскостях, то они занимают положение, соответствующее минимальной энергии. При движении дислокаций, находящихся под углом друг к другу, могут пересекаться, образуя сидячие дислокации.

Дислокация никогда не обрывается в кристалле, она либо выходит на поверхность, либо замыкается. Примесные атомы, как правило скапливаются у дислокаций, образуя атмосферы Коттрелла. Они затрудняют движение дислокаций.

**3 – двумерные (поверхностные) – поверхность кристалла, границы блоков, зерен, двойников, дефектов упаковки.** Между зёрнами имеется пограничный слой с сильно искаженной структурой и с высокой концентрацией точечных и линейных дефектов кристаллической решетки. Граница зерна обладает всегда избыточной поверхностной энергией. Аналогично границы блоков, двойников, дефектов упаковки имеют повышенную поверхностную энергию.

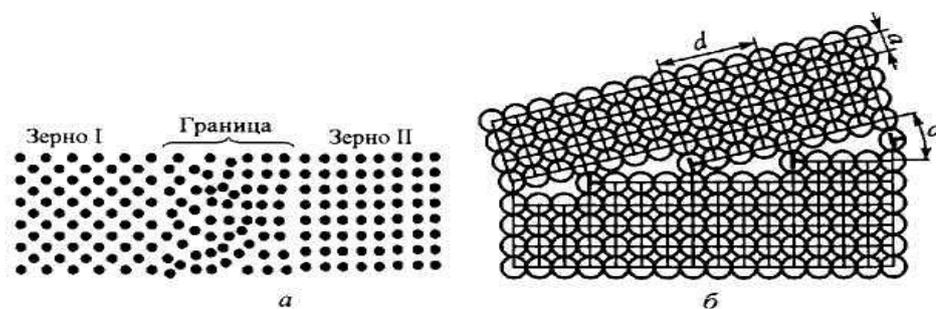


Рисунок 25 – Поверхностные дефекты в кристаллической решётке

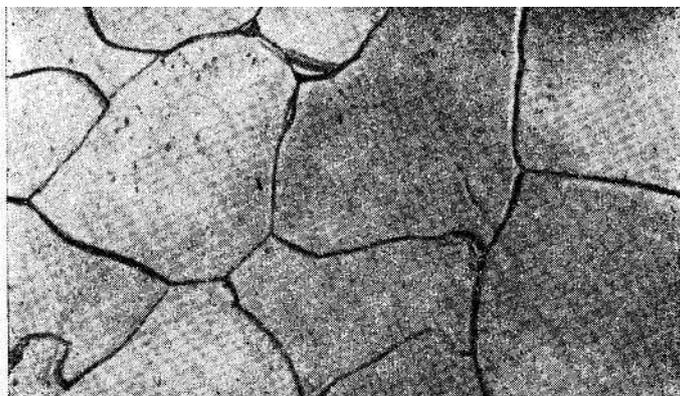
**4 – трехмерные (объемные) – различные включения или выделения, поры.** В реальном металле, особенно в сплавах, всегда присутствуют различные включения – неметаллические, частицы твердых фаз (карбидов, силицидов), а также микропоры, которые могут быть источниками зарождения микротрещин в процессе эксплуатации изделия.

Металлы и сплавы характеризуются определённой структурой. К элементам структуры относятся зёрна. Зерно в металле не является монолитным, а состоит из отдельных блоков размерами  $10^{-5} - 10^{-3}$  см, кристаллографические плоскости в которых повернуты друг относительно друга на небольшой угол – порядка нескольких минут. Такое строение зерна носит название мозаичной структуры, а составляющие ее блоки называются блоками мозаики. Зерна металла разориентированы относительно друг друга на величину в несколько десятков градусов.

Структурными составляющими сплава называют обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями. Различают макроструктуру (строение металла или сплава, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении в 30 - 40 раз) и микроструктуру (строение металла или сплава, наблюдаемое с помощью микроскопа при больших увеличениях).

Макроструктуру можно исследовать по излому и на специальных макрошлифах. Изучение излома - наиболее простой метод выявления кристаллического строения металлов. По излому можно судить о размере зерна, особенностях выплавки и литья (температуре литья, скорости и равномерности охлаждения сплава и т. д.), термической обработке, а следовательно, и о некоторых свойствах металла. Вид излома используют в качестве критерия при определении склонности стали к хрупкому разрушению.

На рис. 26 приведена структура металла при увеличении в 100 раз, так называемая **микроструктура**.



*Рисунок 26 - Микроструктура металла,  $\times 100$*

## **17 Кристаллизация металлов и сплавов**

По законам термодинамики: в изолированной системе самопроизвольно протекают только те процессы, которые приводят к уменьшению свободной энер-

гии системы (энергия Гиббса). При кристаллизации происходит образование зародышей, вырастающих затем в кристаллиты (зерна). Минимальный размер зародыша, обеспечивающий его устойчивость, рост и осуществление процесса кристаллизации, называют критическим (рис. 36). В процессе образования зародыша размером  $r_{кр}$  происходят увеличение межфазной поверхностной энергии ( $\Delta G_s$ ) и уменьшение объемной свободной энергии ( $\Delta G_v$ ) расплава за счет появления поверхностей раздела. Общее изменение свободной энергии металла ( $\Delta G_{общ}$ ) в результате формирования твердой частицы сферической формы радиуса  $r$  равно:

$$\Delta G_{общ} = \Delta G_v + \Delta G_s = -L\rho (\Delta T/T_{пл})(4/3)\pi r^3 + 4\pi r^2 \gamma_{т-ж},$$

где  $L$  – удельная теплота кристаллизации;  $\rho$  – плотность металла;  $\Delta T$  – степень переохлаждения;  $T_{пл}$  – температура плавления металла;  $\gamma_{т-ж}$  – удельная поверхностная (межфазная) свободная энергия на границе твердой и жидкой фаз.

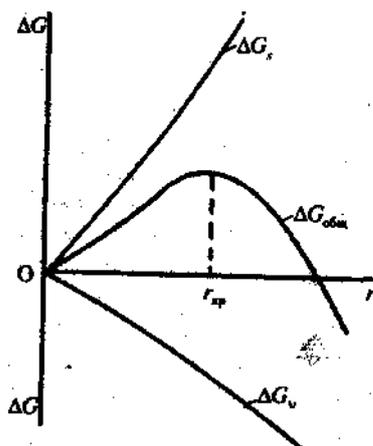


Рисунок 36 - Зависимость изменения свободной энергии расплава от размера зародышей

Зародыш может сохраняться лишь при условии уменьшения  $\Delta G_{общ}$  (при фиксированном переохлаждении  $\Delta T$ ). Однако при малых размерах частицы это условие не реализуется, поскольку отношение площади поверхности частицы к объему слишком велико. Зародыши же размерами, равными и большими критиче-

ского ( $r_{кр}$ ), растут с уменьшением энергии и поэтому способны к существованию. Критический размер зародыша определяется из условия:

$$d(\Delta G_{общ}) / dr = 0;$$

$$r_{кр} = 2 \gamma_{т-ж} T_{пл} / (L_p \Delta T).$$

Из последнего уравнения видно, что с уменьшением межфазного натяжения ( $\gamma_{т-ж}$ ) и увеличением степени переохлаждения критический размер зародыша уменьшается. Процесс зарождения центров кристаллизации количественно оценивается скоростью зарождения центров, т.е. числом центров, возникающих в единице объема ( $m^3$ ) за единицу времени (с).

Рост кристаллов характеризуется скоростью роста (с.р.) линейных размеров кристалла. Однородный металл при его охлаждении ниже температуры плавления находится определенное время в жидком состоянии, но оно является метастабильным (неравновесным). Интервалы метастабильности ( $\Delta T$ ) для процессов зарождения центров и их роста не одинаковы:  $\Delta T_{с.р.}$  меньше  $\Delta T_{ч.ц.}$ . На рис. 37 приведены зависимости скорости роста кристаллов и числа центров кристаллизации от степени переохлаждения металла.

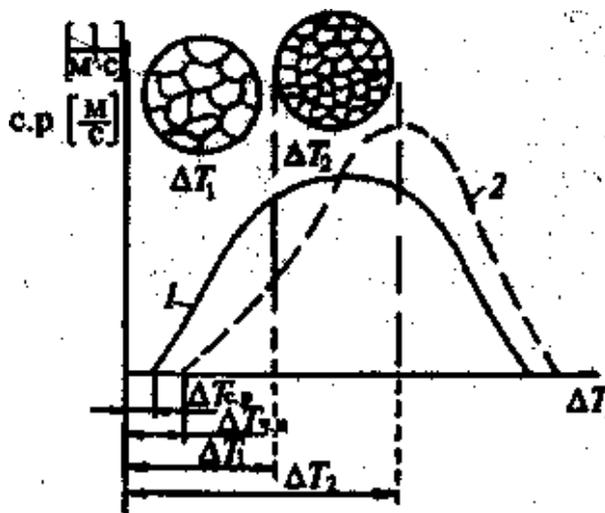


Рисунок 37 - Влияние степени переохлаждения на параметры кристаллизации и структуру металла: 1-скорость роста (с.р.); 2-число центров (ч.ц.)

Экстремальный характер обеих зависимостей обусловлен наличием двух противоположно влияющих на процесс кристаллизации факторов: с одной стороны, с повышением степени переохлаждения ( $\Delta T$ ) разность свободных энергий жидкого и твердого металлов ( $\Delta G$ ) возрастает, что способствует повышению скорости кристаллизации. С другой стороны, для образования и роста кристаллов необходимо диффузионное перемещение атомов в жидком металле, скорость которого уменьшается с понижением температуры металла. В зависимости от степени переохлаждения отношение между (с.р.) и (ч.ц.) изменяется; это приводит к тому, что с увеличением  $\Delta T$  измельчается зерно металла. В завершение необходимо отметить, что нисходящие ветви кривых (с.р.) и (ч.ц.) характерны для повышения скоростей охлаждения.

Последовательность формирования кристаллической структуры металлов и сплавов определяется условиями кристаллизации. Выделяют 5 стадий формирования структуры:

1 стадия – в период заливки литейной формы (образование мелких зерен на поверхности с дендритным строением) в условиях интенсивного теплоотвода.

2 стадия (конвекция) – после образования поверхностной твердой корочки затрудняется теплоотвод и температура  $t^\circ$  в расплаве выравнивается. Поверхностная корка может расплавиться частично или полностью.

3 стадия (рост столбчатых кристаллов) – после прекращения конвективного перемешивания расплава повышается его вязкость. Столбчатые кристаллы растут в направлении теплового потока.

4 стадия (образование равноосных зерен в центре) – формирование крупных равноосных зерен в центре отливки. Центр отливки охлаждается быстрее, чем периферия. Интенсивность теплоотдачи понижается, температура выравнивается.

5 стадия – охлаждение твердого сплава до комнатной температуры. Строение слитка представлено на рис. 38.

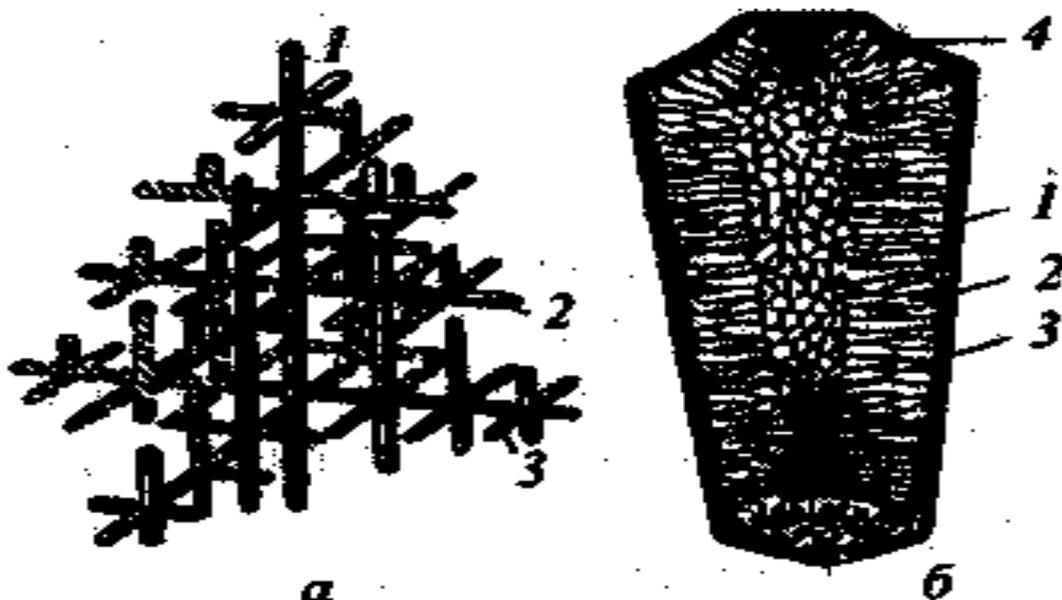


Рисунок 38 - Структура слитка. а - схема дендрита по Д.К.Чернову: 1,2,3 – оси первого, второго и третьего порядков соответственно; б – зонная структура слитка

Типичная структура слитка состоит из трех основных зон: 1) зоны мелких равноосных кристаллов, образующихся при быстром переохлаждении металла, соприкасающегося со стенкой формы; 2) зоны столбчатых кристаллов, ориентированных вдоль направления теплоотвода; 3) зоны равноосных кристаллов больших размеров, причем форма зерна в центре слитка обусловлена слабым влиянием теплоотвода. Усадочная раковина 4 формируется в верхней части слитка. В ней металл, затвердевающий в последнюю очередь, является рыхлым, поскольку пронизан газовыми порами и примесями. Эта дефектная область слитка подлежит отрезке.

## 18 Полиморфное и магнитное превращения в металлах

В металлах в твердом состоянии возможно протекание превращений двух видов: первое связано с перестройкой кристаллической решетки одного типа в другой, называемое полиморфным; второе не связано с перестройкой кристалли-

ческой решетки, при нём происходит изменение магнитных свойств металла, поэтому оно называется магнитным.

Многие металлы при разных температурах могут образовывать разные типы кристаллических решеток, т.е. иметь различную модификацию. Известны полиморфные превращения для железа, кобальта, титана, марганца, олова и некоторых других металлов. Полиморфное превращение протекает в том случае, если при данной температуре может существовать металл с иной кристаллической решеткой, характеризующейся минимальным уровнем свободной энергии. Переход чистого металла из одной полиморфной модификации в другую в равновесных условиях протекает при постоянной температуре (критической точке) и сопровождается выделением тепла при охлаждении и поглощением тепла при нагреве.

Как и в случае кристаллизации из жидкой фазы, для того, чтобы протекало полиморфное превращение необходимо некоторое переохлаждение, в том случае, если рассматривается охлаждение металла, или перегрев (в случае его нагрева). Необходимым условием протекания полиморфного превращения является разность свободных энергий между исходной и образующейся кристаллической решетки (модификации). В отличие от расплавленного жидкого состояния, в твердом металле возможно реализовать очень большие степени переохлаждения. Полиморфное превращение осуществляется, как и при кристаллизации, путем образования зародышей и их дальнейшего роста в результате перехода атомов из старой модификации в новую. Превращение может быть диффузионным и бездиффузионным (мартенситным).

В результате полиморфного превращения образуются новые кристаллические зерна, имеющие другой размер и форму. Поэтому такое превращение называют перекристаллизацией. Если нагрев металла проводился до температуры, незначительно превышающей температуру полиморфного превращения (критической точки), то получается очень мелкое зерно, что часто используется на практике для получения мелкозернистой структуры. Полиморфное превращение сопровождается скачкообразным изменением всех свойств металлов и сплавов: удель-

ного объема, теплопроводности, электропроводности, магнитных, механических, химических и других свойств.

Все вещества по магнитным свойствам можно разделить на три группы: парамагнитные, диамагнитные и ферромагнитные. Парамагнитные вещества слабо притягиваются магнитами. Это связано с тем, что, попадая в магнитное поле они слабо намагничиваются, причем против северного полюса магнита оказывается южный полюс парамагнитного тела, в результате чего наблюдается его втягивание в магнитное поле. Если парамагнитный стержень поместить в магнитное поле, то он стремится повернуться таким образом, чтобы его ось оказалась параллельна магнитному полю.

Диамагнитные тела также слабо намагничиваются, но отталкиваются магнитом, так как при попадании в магнитное поле они намагничиваются таким образом, что против северного полюса магнита оказывается северный полюс диамагнетика. Именно поэтому диамагнитные тела выталкиваются из магнитного поля, а стержень из диамагнитного материала стремится в магнитном поле повернуться перпендикулярно магнитным силовым линиям.

Ферромагнитные материалы очень сильно намагничиваются в магнитном поле. После удаления из магнитного поля они обладают остаточным магнетизмом, что позволяет использовать их в качестве постоянных магнитов. При нагреве выше определенной температуры, называемой «точкой Кюри», ферромагнитные материалы превращаются в парамагнитные. Для железа точка Кюри расположена при температуре около  $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Изменения кристаллической решетки или микроструктуры при этом не происходит, а магнитное превращение связано только с изменением электронного состояния атомов металла. Магнитное превращение является полностью обратимым и всегда протекает без заметного температурного гистерезиса.

## 19 Пластическая деформация и разрушение металлов и сплавов

**Деформацией** называется изменение размеров и формы тела под действием внешних усилий. Деформации подразделяют на упругие и пластические. Упругие деформации исчезают, а пластические остаются после окончания действия приложенных сил. В основе упругих деформаций лежат обратимые смещения атомов металлов от положений равновесия; в основе пластических - необратимые перемещения атомов на значительные расстояния от исходных положений равновесия.

Диаграмма растяжения металлов представляет собой зависимость напряжений от степени деформации металла (рис. 39).

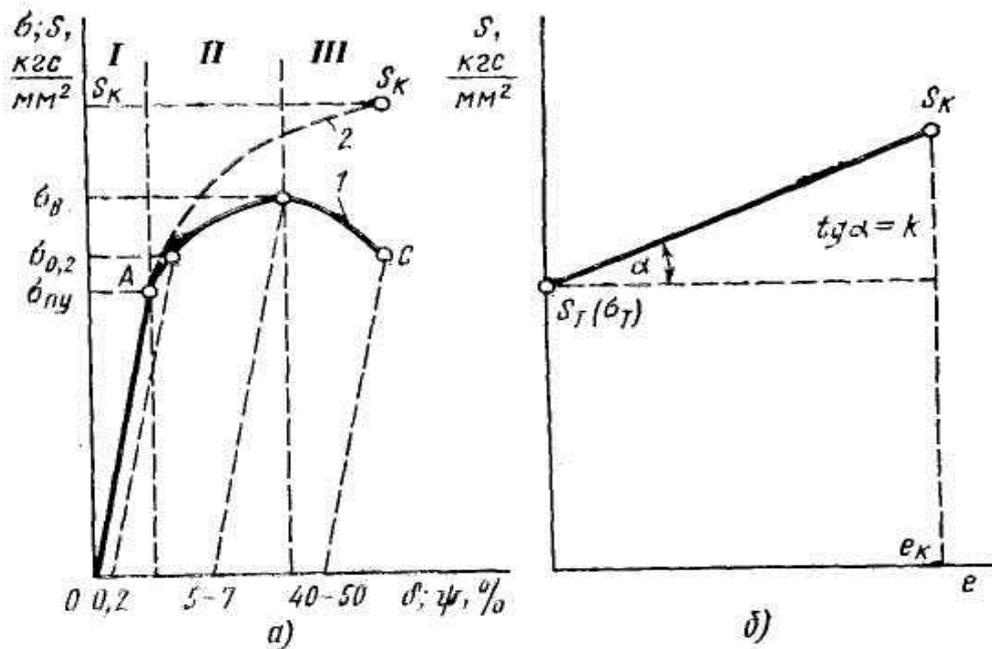


Рисунок 39 - Диаграммы: а – растяжения металлов для условных (1) и истинных(2) напряжений; I– область упругой деформации; II –область пластической деформации; III – область развития трещин; б – истинных напряжений

Строится она при статических испытаниях, когда прилагаемая к образцу нагрузка возрастает медленно и плавно. Кривая 1 характеризует деформацию металла под действием напряжений, величина которых является условной ( $\sigma$ ), т.е. ее вычисляют делением нагрузки  $P$  в данный момент времени на первоначальную

площадь поперечного сечения образца  $F_0$  ( $\sigma = \frac{P}{F_0}$ , кгс/мм<sup>2</sup>). До точки **A** деформация пропорциональна напряжению Тангенс угла наклона прямой **OA** к оси абсцисс характеризует модуль упругости материала  $E = \sigma/\delta$ , где  $\delta$  - относительная деформация. Модуль упругости  $E$  определяет жесткость материала, интенсивность увеличения напряжения по мере упругой деформации, т.е. смещение атомов из положения равновесия в решетке. **Модуль упругости практически не зависит от структуры металла и определяется силами межатомной связи. Все другие механические свойства являются структурно чувствительными и изменяются в зависимости от структуры (обработки) в широких пределах.**

Закон пропорциональности между напряжением и деформацией является справедливым лишь в первом приближении. При точных измерениях даже при небольших напряжениях в упругой области наблюдается отклонение от закона пропорциональности. Это явление называют неупругостью. Оно проявляется в том, что деформация, оставаясь обратимой, отстает по фазе от действующего напряжения. Неупругость связана с движением точечных дефектов, дислокаций и атомов в приграничных объемах.

Напряжение, соответствующее точке **A** называют **пределом пропорциональности** ( $\sigma_{п.ц}$ ). Обычно определяют условный предел пропорциональности, т.е. напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованный касательной к кривой деформации с осью напряжений, увеличивается на 50 % своего значения на линейном упругом участке.  $\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}$

**Предел упругости** – напряжение, при котором остаточная деформация достигает 0,05 % и меньше от начальной длины образца.  $\sigma_{уп} = \frac{P_{уп}}{F_0}$

**Предел текучести**  $\sigma_T$  - напряжение, начиная с которого деформация образца происходит почти без дальнейшего увеличения нагрузки:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$$

Если площадка текучести по диаграмме растяжения данного материала отсутствует, то определяется **условный предел текучести**  $\sigma_{0,2}$  - напряжение, вызывающее пластическую деформацию, равную 0,2 %.

**Физический предел текучести** – напряжение, при котором образец деформируется без увеличения растягивающей нагрузки.

**Предел прочности** (временное сопротивление)  $\sigma_B$  – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, предшествующей разрушению образца.

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}.$$

При испытании на растяжение определяют, кроме того, характеристики пластичности. К ним относятся:

**Относительное удлинение**  $\delta$  рассчитывается как отношение прироста длины образца после разрыва к его первоначальной расчетной длине, выраженное в процентах:

$$\delta = 100 \cdot \frac{(l_1 - l_0)}{l_0}$$

где  $l_1$  — длина образца после разрыва, мм;  $l_0$ — расчетная (начальная) длина образца.

**Относительное сужение**  $\psi$  определяется отношением уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва к первоначальной площади его поперечного, сечения, выраженным в процентах,

$$\psi = 100 \cdot \frac{(F_0 - F_1)}{F_0}$$

Здесь  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца;  $F_1$  - площадь поперечного сечения образца в месте разрушения.

Пластическая деформация осуществляется скольжением и двойникованием. Скольжение в кристаллической решетке протекает по плоскостям и направлениям с наиболее плотной упаковкой атомов, где сопротивление **сдвигу минимально. В**

металлах с ГЦК решеткой скольжение протекает по 4-м плоскостям типа (111) и в направлениях диагонали куба [110] (всего 3 направления и 12 систем скольжения). В ОЦК металлах – по 6 плоскостям типа (110) и в направлениях типа [111], всего 12 систем скольжения. В кристаллах с ГПУ решеткой скольжение идет по плоскостям базиса, всего 3 системы скольжения.

Металлы с кубической кристаллической решеткой обладают высокой пластичностью, т. к. скольжение в них происходит во многих направлениях. Металлы с ГПУ решеткой менее пластичны, труднее поддаются прокатке, штамповке.

Процесс скольжения нельзя представлять как одновременное передвижение одной части кристалла относительно другой. Такой синхронный сдвиг требует очень больших напряжений. Скольжение осуществляется в результате перемещения в кристалле дислокаций (рис. 40).

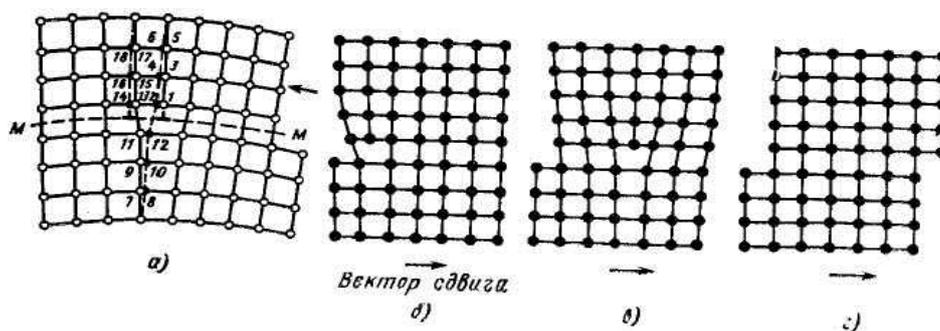


Рисунок 40 - Движение краевой дислокации, приводящее к образованию ступеньки единичного сдвига на поверхности кристалла: а - схема движения дислокации; б - краевая дислокация в кристаллической структуре; в – дислокация перемещена на два межатомных расстояния в решетке под влиянием приложенного напряжения; г – выход дислокации на поверхность и появление сдвига

Процесс сдвига в кристалле происходит тем легче, чем больше дислокаций будет в металле. С ростом числа дислокаций они располагаются в разных плоскостях и мешают друг другу перемещаться. На этом основаны способы упрочнения металлов путем механического наклепа.

В монокристаллах при приложении нагрузки весь объем находился в однородном напряженном состоянии, а в поликристалле разные зерна находятся в различных напряженных состояниях. В разных зернах может работать разное число систем скольжения, поэтому деформация в различно ориентированных зернах неоднородна. Кроме того, в поликристаллах сдвиг одного зерна в другое передается через границу и осуществляется неодинаково в разных зернах. Даже в пределах одного зерна деформация неоднородна из-за скольжения дислокаций у границ.

В поликристаллических материалах меньшее число дислокаций выходит на поверхность образца по сравнению с монокристаллами и большее их число тормозится в объеме. Поэтому в поликристаллических материалах прочностные характеристики более высокие, а пластические - более низкие, чем в монокристаллах и сильно зависят от размеров зерна.

**Двойникование** – способ пластической деформации, характерный для металлов, имеющих плотноупакованные решетки. Заключается в переориентации части кристалла в положение, симметричное по отношению к первой части относительно плоскости двойникования (рис. 41). Двойникование сопровождается прохождением дислокаций сквозь кристалл. В металлах с ОЦК и ГЦК решеткой двойникование наблюдается только при больших степенях деформации и низких температурах.

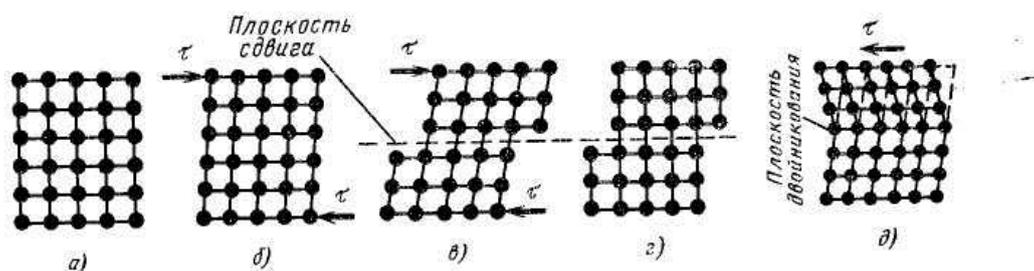


Рисунок 41 - Схема упругой и пластической деформации металла под действием напряжения сдвига: а-первоначальный кристалл; б- упругая деформация; в- увеличение упругой и пластической деформации, вызванных скольжением, при нагружении, большем предела упругости; г-напряжение, обуславливающее появление сдвига; д- образование двойника

Упрочнение металлов осуществляется за счет увеличения плотности дислокаций путем механического наклепа. При наклепе увеличивается количество дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий, межузельных атомов), при этом затрудняется движение дислокаций. Измельчение зерна и блоков мозаики, термическая обработка и легирование создают несовершенства и искажения кристаллической решетки, препятствующие свободному передвижению дислокаций. За счет термической обработки создают структуры с упрочняющими фазами, вызывающими дисперсионное твердение, которые также препятствуют свободному передвижению дислокаций. **Металлы с ГЦК решеткой упрочняются сильнее, чем с ОЦК.**

**Разрушение** – это процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящий к разделению его на части. Разрушение происходит в результате развития нескольких трещин или слияния трещин в одну магистральную, по которой металл разрушается. Разрушение может быть хрупким и вязким.

Механизм зарождения трещин при хрупком и вязком разрушениях одинаков. Скопление дислокаций перед препятствием в ходе пластической деформации является причиной возникновения микротрещины. В таком месте дислокации приходят в такое тесное соприкосновение, что их экстраплоскости сливаются, а под ними образуется зародышевая трещина (рис. 42).

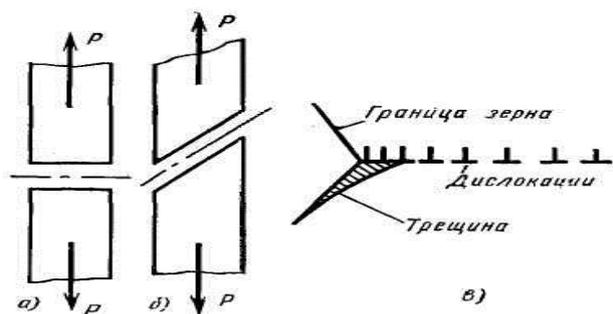
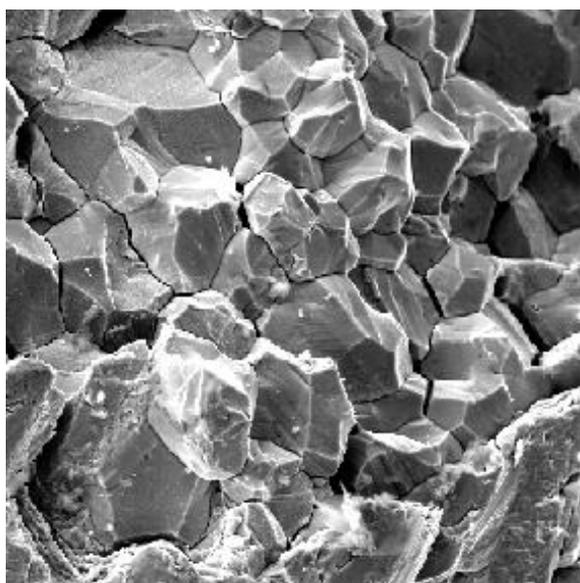


Рисунок 42 - Схемы отрыва (а), среза(б), образования трещины за счет скопления дислокаций у препятствия

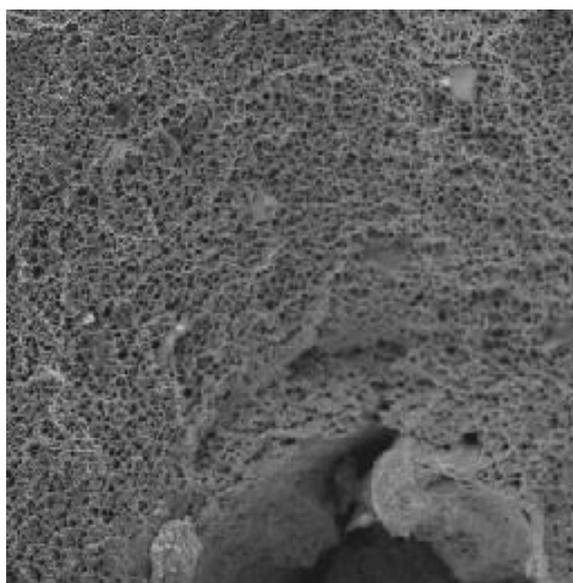
При хрупком разрушении возникшая трещина становится нестабильной и растет самопроизвольно, если ее длина при заданном напряжении превышает некоторое критическое значение, а вершина трещины сохраняет остроту, соизмеримую по радиусу у вершины с атомными размерами. В этом случае напряжения

краю трещины оказываются достаточными для нарушения межатомной связи (критерий Гриффитса).

При разрушении распространяющаяся трещина будет окаймлена узкой зоной пластической деформации, на создание которой затрачивается дополнительная энергия. Вязкое и хрупкое разрушения отличаются между собой по величине пластической зоны у вершины трещины. При хрупком – эта зона мала, при вязком – величина пластической зоны, идущей впереди распространяющейся трещины, велика, и трещина затупляется в вершине. Вязкое разрушение идет с малой скоростью роста трещины, а хрупкое – с очень большой. Транскристаллитное разрушение – по телу зерна, интеркристаллитное – по границам зерен (только хрупкое). Рельеф поверхности при хрупком и вязком разрушении различен (см. рис. 43)



*а*



*б*

*Рисунок 43 – Рельеф поверхности при хрупком (а) и вязком (б) разрушении*

**Статическими** называют испытания, при которых прилагаемая к образцу нагрузка возрастает медленно и плавно. Чаще – это испытания на растяжение (рис. 39). **Испытания на сжатие** – применяют для материалов, хрупких при растяжении (чугуны, алюминиевые сплавы и др.). При сжатии образцы разрушаются срезом. Определяют предел прочности при сжатии.

**Твердость металлов** – это свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое. Измеряют эту характеристику по Бринелю – вдавливание стального шарика, измерение диаметра отпечатка после снятия нагрузки; по Роквеллу – вдавливание алмазного конуса или стального шарика, измеряют глубину вдавливания (точнее остаточное увеличение глубины внедрения после снятия основной нагрузки и сохранения предварительной нагрузки); по Виккерсу – вдавливание алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды и измерение диагонали отпечатка после снятия нагрузки.

**Микротвердость** – определение твердости в микроскопических объемах по Виккерсу, только при небольших нагрузках и с помощью металлографического микроскопа.

**Испытания на изгиб** – применяют для хрупких материалов (чугун, инструментальные стали после поверхностного упрочнения). Испытания проводят сосредоточенной нагрузкой на образцах, лежащих на двух опорах. Предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг}(\sigma_{max}) = M_{max}/\omega$ , где  $M_{max}$  – максимальный изгибающий момент;  $\omega$  - характеристика сечения образца (для прямоугольного сечения  $\omega=bh^2/6$  – для прямоугольного сечения и  $\omega=\pi r^3/32$  – для круглого сечения).

Надежность конструкций во многом определяется сопротивлением металла распространению уже имеющейся опасной (острой) трещины (т.е. вязкостью разрушения), а не ее зарождению. При испытаниях в условиях плоского деформированного состояния обозначают  $K_{1C}$  – **вязкость разрушения**. Эта величина определяет способность металла противостоять развитию трещины (поэтому называют трещиностойкостью). Это структурно чувствительная характеристика материала. Испытания проводят на образцах с надрезом.

**Динамические испытания** – испытания, при которых скорость деформирования значительно выше, чем при статических испытаниях. Динамические испытания на ударный изгиб определяют склонность сталей к хрупкому разруше-

нию. Метод основан на разрушении образца с надрезом (концентратором напряжений) ударом маятникового копра. По шкале маятникового копра определяют полную работу  $K$ , затраченную при ударе.

**Ударная вязкость  $K_C$  (Дж/м<sup>2</sup>)** – это работа, отнесенная к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора напряжений. Является интегральной характеристикой, включающей работу зарождения и работу распространения вязкой трещины:  $K_C = a_3 + a_p$ .

**Порог хладноломкости** – это температура, при которой в изломе образца после испытаний имеется 50% волокна (вязкого разрушения, подобного показанному на рис. 43).

**Усталостью** называют постепенное накопление повреждений в металле под действием **циклических нагрузок**, приводящих к образованию трещин и разрушению (это может происходить при напряжениях гораздо менее  $\sigma_{0,2}$ ). Свойство металла сопротивляться усталости называют **выносливостью**. Испытания на усталость проводят при переменных напряжениях. Цикл напряжения – это совокупность переменных значений напряжений за один период их изменения. (рис. 44)

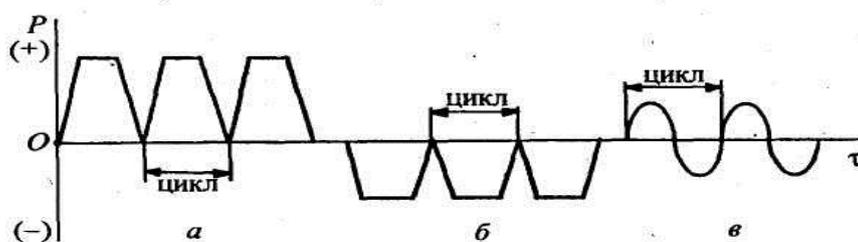


Рисунок 44 - Схема циклического нагружения: а–растяжением; сжатием; в–закономерным нагружением

Цикл характеризуется коэффициентом асимметрии:  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ . При  $R = -1$  цикл симметричный, при  $R \neq -1$  – асимметричный. В результате испытаний определяют предел выносливости.

**Предел выносливости**  $\sigma_R$  – наибольшее значение максимального напряжения цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образцов после большого или заданного числа циклов нагружения.

К специальным типам испытаний относятся методы испытания на износ, на обрабатываемость резанием, испытания сварных соединений, технологические испытания при различных температурах и в различных рабочих средах, моделирующие условия эксплуатации деталей

**Конструктивная прочность металлов** – это надежность металла против внезапных разрушений (ударная вязкость, живучесть), определяется в ходе статических и динамических испытаний образцов с острыми трещинами. Кроме того, она определяется долговечностью (сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость) и прочностью конструкции в целом (определяется в ходе стендовых испытаний или эксплуатационных).

Структура металлов и сплавов после деформации отличается от исходной. Во-первых, появляется текстура. **Текстура деформации** – это преимущественная ориентировка кристаллической решетки. Текстура приводит к тому, что свойства становятся разными в различных направлениях.

С увеличением степени деформации предел текучести растет быстрее временного сопротивления. Обе характеристики у сильно наклепанных металлов сравниваются, а удлинение становится равным нулю. Такое состояние наклепанного металла является предельным; при попытке продолжить деформирование металл разрушается. Путем наклепа твердость и временное сопротивление удается повысить в 1,5 - 3 раза, а предел текучести в 3 - 7 раз. Металлы с ГЦК решеткой упрочняются сильнее металлов с ОЦК решеткой. Среди сплавов с ГЦК решеткой сильнее упрочняются те, у которых энергия дефектов упаковки минимальна (например, интенсивно наклепываются аустенитная сталь, никель, а алюминий упрочняется незначительно).

Холоднодеформированный металл находится в термодинамически неустойчивом состоянии. Большая часть работы (90-95 %), затрачиваемой на деформацию металла, превращается в теплоту (металл нагревается), остальная накапливается в виде повышенной плотности дефектов строения кристаллической решетки, т.е. в виде внутренних напряжений. Такое состояние является причиной процессов, протекающих при нагреве металла.

1 – деформационное старение – явление повышения твердости, пределов упругости, текучести и прочности при нагреве до 50-250<sup>0</sup>С

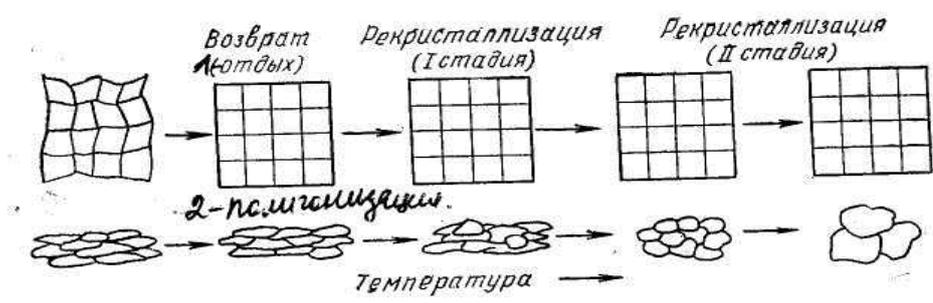


Рисунок 45 - Схема изменения строения нагартованного металла при нагреве

2 – возврат – повышение структурного совершенства наклепанного металла в результате уменьшения плотности дефектов кристаллической решетки без изменения структуры, видимой в световом микроскопе. Возврат происходит при нагреве ниже (0,2-0,3) от  $T_{пл}$ . Если металл был сильно деформирован, то вытянутость зерен после возврата сохраняется (рис. 45).

При температура ниже 0,2  $T_{пл}$ . протекает первая стадия возврата, при которой происходит уменьшение точечных дефектов за счет стока их к границам зерен, поглощения дислокациями, взаимодействия примесных атомов с вакансиями. Кроме того, происходит перегруппировка дислокаций (переползание в разных плоскостях, удлинение или укорачивание за счет взаимодействия с точечными дефектами и их взаимная аннигиляция). При этом не образуются новые субграницы. Эта стадия называется отдыхом.

Вторая стадия возврата происходит при нагреве до температур  $0,2-0,3 T_{пл.}$  и называется полигонизацией. Происходит фрагментация кристаллитов на субзерна (полигоны) с малоугловыми границами (рис. 46). При нагреве происходит аннигиляция дислокаций разного знака и выстраивание дислокаций одного знака в дислокационные стенки, что приводит к образованию полигонов, свободных от дислокаций.

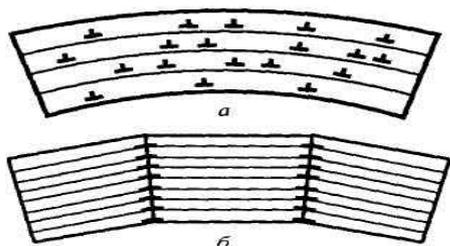


Рисунок 46 - Схема стабилизирующей полигонизации: а – хаотичное распределение дислокаций в изогнутом кристалле; б – стенки из дислокаций после полигонизации

3 – первичная рекристаллизация (или рекристаллизация обработки) – образование новых, равноосных зерен вместо ориентированной волокнистой структуры деформированного металла. Разупрочнение объясняется снятием искажения решетки и резким уменьшением плотности дислокаций.

4 – собирательная рекристаллизация (нормальный рост зерна) – новые рекристаллизованные зерна растут при дальнейшей выдержке, т.к. система стремится к уменьшению свободной энергии за счет уменьшения поверхностной энергии.

5 - вторичная рекристаллизация (аномальный рост зерна) – локальное объединение зерен. Причиной является также стремление к уменьшению свободной энергии. Благоприятное для роста соотношение кристаллографических ориентировок соседних зерен, меньшая, чем у других зерен концентрация дефектов и более высокая подвижность границ в результате неравномерного выделения примесей способствуют росту одних зерен за счет других.

Размер зерна после рекристаллизации определяется температурой рекристаллизационного отжига, его продолжительности, степени предварительной деформации, химического состава сплава, величины исходного зерна, наличия нерастворимых примесей и т.д.

Деформация, вызывающая скачкообразный рост зерен в процессе рекристаллизации, называется критической. Максимум на кривой обусловлен суммарным действием двух процессов: ростом отдельных зерен при критической деформации и образованием зародышей, их развитием при более высоких степенях деформации (рис. 47).

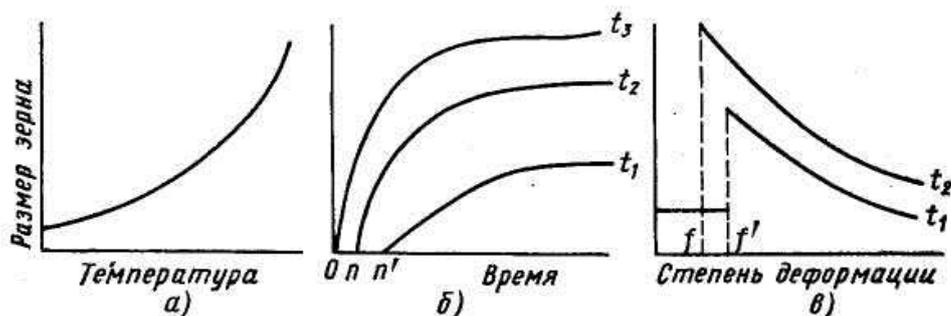


Рисунок 47 - Влияние температуры, продолжительности и степени деформации на величину рекристаллизованного зерна

**Холодная пластическая деформация** – это пластическое формоизменение металла, проводимое ниже температуры рекристаллизации металла. Поэтому холодная деформация сопровождается упрочнением (наклепом) металла. Может применяться только к изделиям с малыми сечениями: проволоке, ленте, листам.

**Горячая деформация** – формоизменение металла, проводимое при температурах выше температуры рекристаллизации, сопровождающееся получением полностью рекристаллизованной структуры. Одновременно протекают два процесса: деформация и рекристаллизация. Упрочнение, обусловленное деформацией, почти полностью снимается рекристаллизацией. Горячая деформация широко применяется на практике для обработки давлением крупных поковок: штамповке, прокатке, ковке, прессованию.

Механизм горячей деформации подобен механизму холодной – дислокационно-сдвиговой. Однако есть свои особенности: 1 – плотность дислокаций растет слабо из-за их активной аннигиляции; 2 – значительные смещения одних зерен

относительно других; 3 – создание новых дислокаций может происходить путем непосредственного сдвига у пограничных участков и создания экстраплоскостей; 4 – образование зубчатых границ; 5 – рекристаллизация отстает от деформации, можно сохранить наклеп путем быстрого охлаждения. ВТМО – сочетание высокой прочности и пластичности.

## 20 Фазы в сплавах

Металлическим сплавом называется вещество, состоящее из двух или более элементов (металлов или металлов с металлоидами), обладающее металлическими свойствами. Способы приготовления сплавов: сплавление, реже спекание, электролиз или возгонка. Сплав считается металлическим, если его основу (свыше 50 мас. %) составляют металлические компоненты. Металлические сплавы обладают более высокими прочностными и другими механическими свойствами по сравнению с чистыми металлами. По этой причине они получили широкое применение в качестве конструкционных материалов.

При сплавлении нескольких веществ образуются новые фазы. **Химические соединения** образуются между компонентами, имеющими большое различие в электронном строении атомов и кристаллических решеток. Существуют устойчивые и неустойчивые химические соединения. Устойчивое химическое соединение характеризуется строго определенной температурой плавления, а у неустойчивое плавится в интервале температур. Различают химические соединения с нормальной валентностью, электронные соединения и фазы внедрения.

Характерные особенности химических соединений:

1 – кристаллическая решетка отличается от решеток компонентов, образующих соединение; обычно сложная кристаллическая решетка;

2 – в соединении всегда сохраняется простое кратное весовое соотношение элементов,  $A_nB_m$  где  $n$  и  $m$  простые числа;

3 – свойства соединения резко отличаются от свойств образующих его компонентов;

4 – температура плавления (диссоциации) постоянная;

5 – образование химического соединения сопровождается значительным тепловым эффектом.

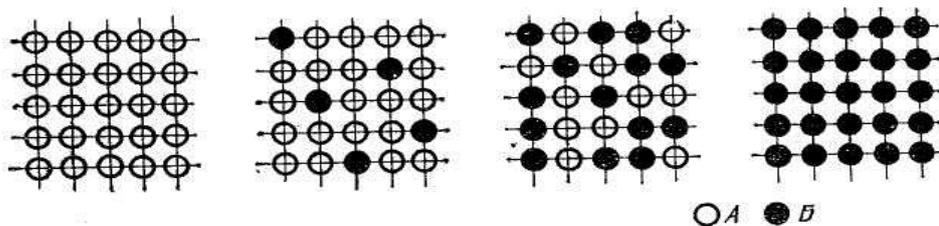
Соединения одних металлов с другими называются **интерметаллидами** ( $NiAl$ ,  $Ni_3Al$ ). Химическая связь между атомами в интерметаллидах обычно металлическая. **Электронные соединения** не подчиняются правилу валентности, но имеют определенную электронную концентрацию. Например:  $\beta$ - фаза  $CuZn$  с электронной концентрацией  $3/2$ ,  $\gamma$ -фаза  $Cu_5Zn_8$  с электронной концентрацией  $21/13$  и  $\epsilon$  - фаза  $CuZn_3$  с электронной концентрацией  $7/4$ . Электронные соединения имеют также свою кристаллическую решетку, но в отличие от химических соединений с нормальной валентностью, имеют переменный состав.

**Фазы внедрения** – на основе химических соединений, фазы переменного состава. Образуют переходные металлы Fe, Mn, Cr, Mo с элементами, имеющими малый атомный радиус (углеродом, азотом, бором, водородом). При образовании фазы внедрения меняется решетка растворителя. Пример фаз внедрения:  $TiC$ ,  $Fe_4N$ ,  $W_2C$ .

**Фазы Лавеса** имеют общую формулу  $AB_2$ , образуются между компонентами с соотношением атомных диаметров  $1,2$  ( $1,1 - 1,6$ ). Имеют гексагональную или гранецентрированную кубическую решетки. Пример:  $CaAl_2$ ,  $AgBe_2$ ,  $TiCr_2$ .

**$\sigma$ -фазы** – образуют соединения переходных металлов, содержит примерно 50% каждого из образующих элементов. Обладает повышенной твердостью и хрупкостью, нежелательна в сплавах. Пример:  $FeCr$ ,  $V_{Mn}$ ,  $CoCr$ ,  $FeMo$ .

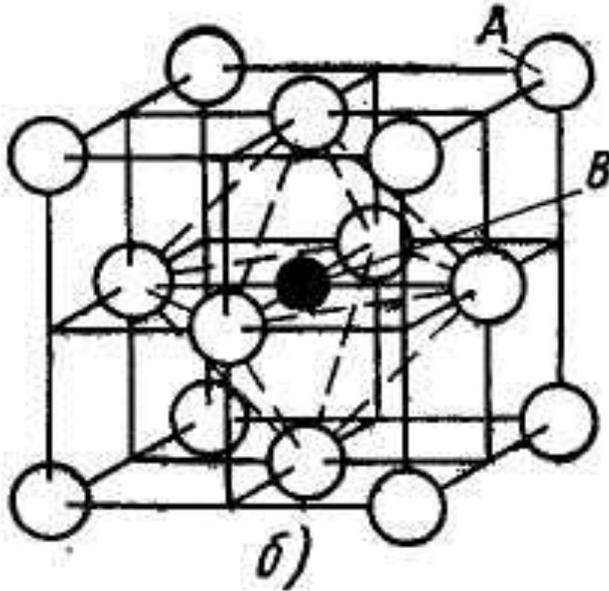
Основу любого сплава составляют твёрдые растворы. **Твёрдыми растворами называют фазы переменного состава, в которых один из компонентов сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы другого располагаются в решетке первого, изменяя ее размеры. Твёрдые растворы замещения образуются путем замены атомов растворителя атомами растворенного компонента (рис. 27).**



*Рисунок 27 - Кристаллические решетки твердого раствора замещения при неограниченной растворимости компонентов*

В зависимости от соотношения атомных радиусов растворяемого элемента и растворителя параметр решетки при образовании твердого раствора замещения может уменьшаться или увеличиваться. Твёрдые растворы замещения могут быть упорядоченными – атомы растворенного элемента занимают строго определенные узлы кристаллической решетки растворителя.

**Твёрдые растворы внедрения** образуются путем размещения атомов растворенного компонента в свободных промежутках между атомами решетки растворителя. Пример – твердый раствор углерода, азота, водорода и бора в  $\alpha$ - или  $\gamma$ -железе, когда растворяются элементы с малыми атомными радиусами с недостроенными внутренними электронными оболочками. Твёрдые растворы внедрения всегда имеют ограниченную растворимость, параметр кристаллической решетки увеличивается при образовании такого раствора (рис. 28).



*Рисунок 28 – Кристаллическая решётка твердого раствора внедрения*

**Твердые растворы вычитания** (растворы с дефектной решеткой) образуются когда при добавлении растворяемого компонента узлы решетки, где должны быть атомы растворяемого компонента заполнены, а где атомы растворителя – свободны. Такие растворы образуются только на базе химических соединений. При образовании такого раствора происходит уменьшение параметра решетки.

В отличие от химических соединений при образовании твердых растворов:

- 1 – сохраняется тип кристаллической решетки растворяемого компонента;
- 2 – состав переменный;
- 3 – плавление происходит в интервале температур.
- 4 – для образования твердого раствора не требуется тепловой расход.

Общее с химическими соединениями – свойства образующих компонент меняются, но в значительно меньшей степени.

Твердые растворы замещения с неограниченной растворимостью могут образовываться при соблюдении следующих условий:

- 1 – Кристаллические решетки компонентов должны быть одинаковы.

2 - Различие в атомных размерах компонентов должно быть незначительным и не превышать 8-15% (9 % для сплавов на основе железа).

3 – Компоненты должны принадлежать к одной и той же группе Периодической системы элементов или к смежным родственным группам и в связи с этим иметь близкое строение валентной оболочки электронов в атомах. Если не выполняется хотя бы одно из этих условий, растворимость ограничена.

Примеры твердых растворов с неограниченной растворимостью: Ni-Cu, Ag-Au, Fe-Co, Fe-Cr и др.

Если элементы, входящие в состав сплава, не растворяются друг в друге в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения, то при этих условиях из атомов каждого элемента образуется отдельная кристаллическая решетка, и кристаллы (зерна) элементов, входящие в сплав, образуют **механическую смесь**. При образовании механической смеси каждый элемент кристаллизуется самостоятельно, и свойства сплава получаются средними между свойствами элементов, которые его образуют.

Механические смеси образуются также в случаях, когда элементы обладают ограниченной растворимостью, а также когда они образуют химическое соединение. Если в сплаве количество элементов превышает их предельную растворимость, то возникает механическая смесь двух насыщенных твердых растворов. При наличии химического соединения образуется механическая смесь из зерен твердого раствора и химического соединения.

Химический состав сплава определяет его фазовый состав, свойства, режим термообработки. Обычно химический состав сталей и сплавов указывается в мас. %. Например: сталь 45ХН имеет следующий химический состав: 0.41-0.49 углерода, 0,17 - 0,37 кремния, 0,45 - 0,8 хрома, 1 - 1,4 никеля, фосфора не более 0,035, серы не более 0,035, меди не более 0,3.

**Фазой** называется однородная по химическому составу и кристаллическому строению часть системы, отделенная от других частей системы (фаз) поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или структура ве-

щества изменяется скачком. Однородная жидкость является однофазной системой, а механическая смесь двух видов кристаллов – двухфазной.

## 21 Диаграммы состояния двойных систем

**Системой** называется совокупность фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях (температуре, давлении). Система может быть простой, если она состоит из одного элемента, и сложной, если она состоит из нескольких элементов.

**Компонентами** называются вещества, образующие систему. Чистый металл представляет собой однокомпонентную систему, сплав двух металлов – двухкомпонентную и т.д. Устойчивые химические соединения могут быть компонентами.

**Диаграммы состояния (ДС)**, или диаграммы фазового равновесия в удобной графической форме показывают фазовый состав сплава в зависимости от температуры и концентрации. Диаграммы состояния строят для условий равновесия или условий, достаточно близких к ним и не учитывают кинетику процессов превращений.

По диаграммам состояния можно определить:

- число фаз, их весовое соотношение и состав фаз (содержание, концентрация компонентов в каждой фазе) в любом сплаве при любой температуре данной системы;
- можно проследить за структурными превращениями и дать качественную оценку ожидаемой структуры в сплаве при комнатной температуре.

Точкой **ликвидус** называется точка, отвечающая началу кристаллизации, а точкой **солидус** – точка, отвечающая концу кристаллизации.

Обычно ДС строят экспериментально в координатах температура - концентрация в весовых или реже атомных процентах. Для построения ДС используют термический анализ, разработанный Курнаковым Н.С. экспериментально получа-

ют кривые охлаждения отдельных сплавов и по их перегибам или остановкам, связанным с тепловыми эффектами превращений, определяют температуры соответствующих превращений. Эти температуры называют критическими точками. Температуру металлов измеряют обычно при помощи термопары.

**Диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии механические смеси кристаллов чистых компонентов (диаграмма состояния I рода).** Компоненты таких сплавов в жидком состоянии неограниченно растворимы друг в друге, а в твердом – не растворимы и не образуют химических соединений. Поэтому в этом сплаве возможно образование трех фаз: жидкого сплава и кристаллов компонентов. Механические смеси образуют сплавы свинца и сурьмы, свинца и олова, цинка и олова, алюминия и кремния и др. Рассмотрим построение диаграммы на примере сплава свинца с сурьмой. Вначале строятся кривые охлаждения чистых свинца и сурьмы (рис. 29.). Температуры их кристаллизации соответствуют горизонтальным площадкам на кривых *1* и *6* (для свинца 327°C и для сурьмы 631°C). Далее рассматриваются несколько сплавов с соответствующим содержанием свинца *Pb* и сурьмы *Sb*, %, например: *Pb* 95, *Sb* 5; *Pb* 90, *Sb* 10; *Pb* 87, *Sb* 13; *Pb* 60, *Sb* 40. Строятся кривые их охлаждения (кривые 2-5 соответственно).

Критические точки, полученные на кривых охлаждения, переносятся на диаграмму состояния и соединяются. получаются линии **AEB** и **MEN**. Линия **AEB** диаграммы является линией **ликвидус**: все сплавы, лежащие выше этой линии, находятся в жидком состоянии. Линия **MEN** является линией **солидус**, ниже нее все сплавы свинец – сурьма находятся в твердом состоянии. В интервале между ликвидусом и солидусом сплав состоит из двух фаз — жидкого раствора и кристаллов одного из компонентов. Сплавы, содержащие менее 13% *Sb*, лежащие слева от эвтектического сплава, называют **доэвтектическими**, а более 13% *Sb*, — **заэвтектическими**. Структура и свойства их резко отличаются. В доэвтектических сплавах наряду с эвтектикой находятся избыточные кристаллы свинца, а в

заэвтектических - кристаллы сурьмы. Различие структур определяет различие свойств сплавов.

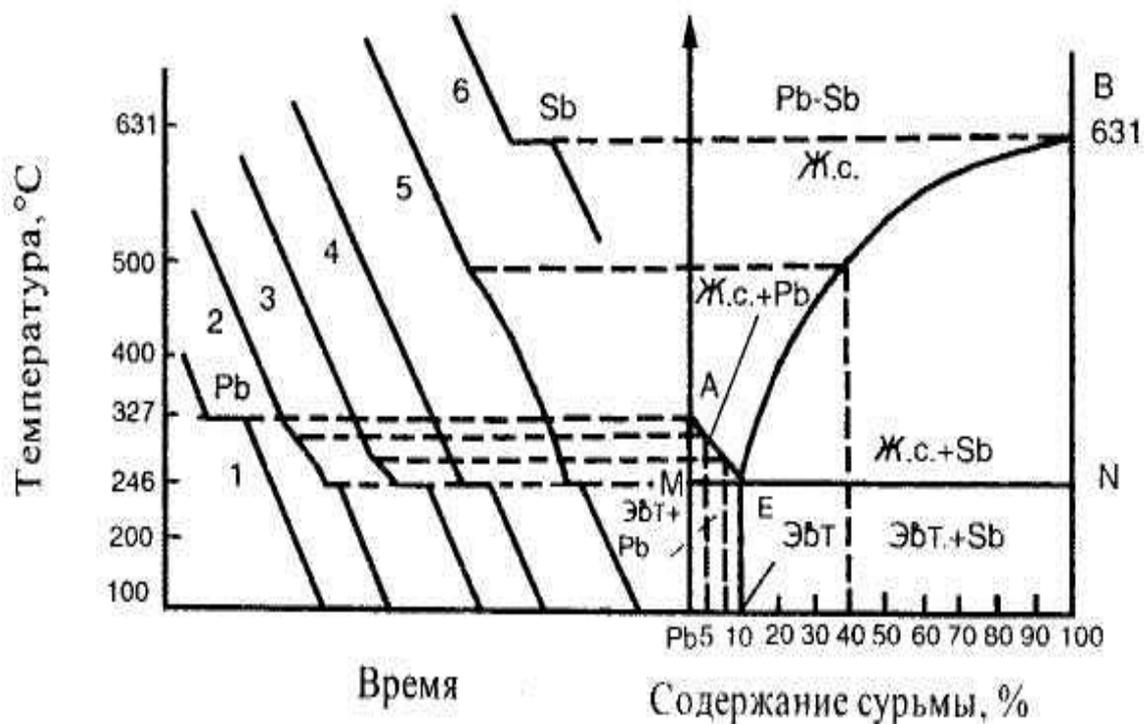


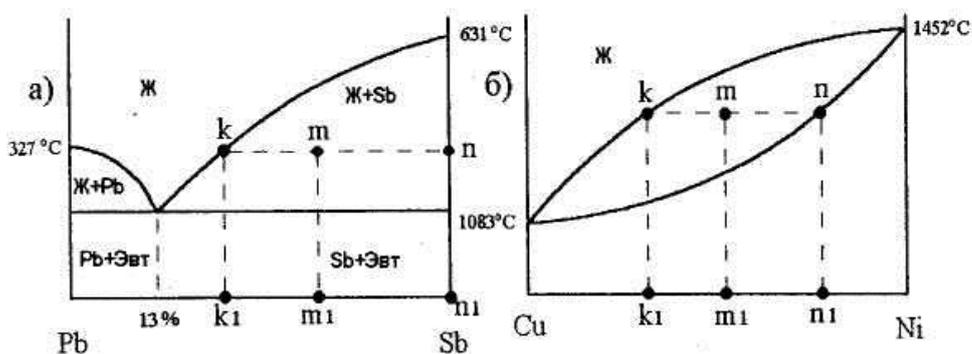
Рисунок 29 - Диаграмма состояния сплавов Pb – Sb

Чтобы определить состояние сплава любого состава при данной температуре и для нахождения его критических точек с помощью диаграммы, нужно из точки, указывающей содержание концентрации данного сплава, провести вертикальную линию до пересечения с линиями ликвидус и солидус (см. рис. 29). Точки пересечения показывают начало и конец кристаллизации заданного сплава. Например, требуется определить состояние сплава, содержащего 50 % сурьмы при температуре 400°C. Точка пересечения вертикали с линиями ликвидус и солидус показывают, что данный сплав будет иметь две фазы - жидкий сплав и кристаллы сурьмы, так как точка соответствующая 400°C лежит в области диаграммы **ВЕН**.

В процессе кристаллизации непрерывно изменяется концентрация фаз и количество каждой фазы (количество жидкой фазы уменьшается, а твердой увеличивается). Концентрацию (состав) и количество каждой фазы можно определить в любой точке двухфазной области диаграммы состояния, используя **правило от-**

**резков.** Правило отрезков формулируется следующим образом. **Через заданную точку диаграммы состояния проводится горизонтальная линия до пересечения с линиями, ограничивающими данную область диаграммы. Проекция точек пересечения на ось концентраций показывают состав фаз. Длины отрезков горизонтальной линии между заданной точкой и точками, определяющими состав фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.**

На рис. 30 показано применение правила отрезков для точки  $m$  диаграммы. Через нее проведена горизонтальная линия и отмечены точки пересечения с линиями диаграммы  $k$  и  $n$ . Проекция этих точек на ось концентраций  $k_1$  и  $n_1$  показывают состав фаз. Так, для диаграммы состояния свинец - сурьма (рис.4,а) точка  $k_1$  показывает состав жидкой фазы, а точка  $n_1$  твердой фазы (100 % Sb). Для диаграммы состояния медь - никель (рис.4,б) точка  $k_1$  показывает состав жидкой фазы, а точка  $n_1$  состав твердого раствора.



*Рисунок 30 - Пример применения правила отрезков: а – для сплавов, образующих механические смеси, б – для сплавов, образующих твердые растворы*

Рассмотрим теперь определение относительного количества каждой фазы. Обозначим количество жидкой фазы  $Q_{ж}$ , а количество твердой фазы —  $Q_{т}$ . (Для примера на рис. 4,а твердой фазой является сурьма, а на рис. 4,б — твердый раствор).

Тогда, в соответствии с правилом отрезков, количества фаз обратно пропорциональны длинам соответствующих отрезков:

$$\frac{Q_{жс}}{Q_m} = \frac{mn}{km}$$

Если обозначить количество всего сплава  $Q$ , то ему будет соответствовать отрезок  $kn$ , и можно найти относительные количества фаз:

$$\frac{Q_{жс}}{Q} = \frac{mn}{km}; \quad \frac{Q_m}{Q} = \frac{km}{kn}$$

Правило отрезков может быть применено для любой двухфазной области диаграммы состояния, т.е. не только для рассмотрения кристаллизации сплава, но и для изучения процессов, происходящих в твердом состоянии. В однофазных областях диаграммы состояния правило отрезков неприменимо. Любая точка внутри однофазной области характеризует концентрацию данной фазы.

**Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом и жидком состоянии (диаграмма состояния II рода).** Эти диаграммы соответствуют сплавам, у которых компоненты и в жидком, и в твердом состоянии образуют раствор. Для таких сплавов возможно образование двух фаз: жидкого сплава и твердого раствора. К таким сплавам относят медь - никель, железо - никель, железо - хром, кобальт - хром и др. Рассмотрим диаграмму состояния сплавов медь - никель (рис. 31). Кривая 1 является кривой охлаждения чистой меди с температурой кристаллизации  $1083^{\circ}\text{C}$ , кривая 5 — кривая охлаждения никеля с температурой кристаллизации  $1452^{\circ}\text{C}$ . Кривая 2 характерна для кристаллизации сплава, содержащего 20 % никеля. Кристаллизация этого сплава начинается в точке  $a$ , при этом образуется кристаллическая решетка меди, в которой имеется 20 % никеля. В точке  $b$  кристаллизация заканчивается. Аналогично кристаллизуются сплавы с содержанием 40% (кривая 3) и 80% никеля (кривая 4), но точки начала ( $a_1$  и  $a_2$ ) и конца ( $b_1$  и  $b_2$ ) кристаллизации у первого сплава ниже, чем у второго. Все точки начала и конца кристаллизации меди, никеля и указанных выше сплавов переносятся на диаграмму (рис. 5, справа). Соединяя эти точки, получим линии ликвидус  $AaB$  и солидус  $AbB$ . Выше линии  $AaB$  сплав меди с никелем находится в жидком состоянии, а ниже линии  $AbB$  — в твердом. В зоне меж-

ду линиями АaВ и AbВ имеются две фазы: жидкий сплав и кристаллы твердого раствора никеля и меди.

Диаграмма II-го рода отличается от диаграммы I-го рода тем, что в первом случае образуется одна кристаллическая решетка, а значит, нет и эвтектического сплава как у сплавов, образующих механическую смесь. Кроме того, у сплавов медь — никель начало и конец кристаллизации сплавов с различным содержанием компонентов протекают при различных температурах.

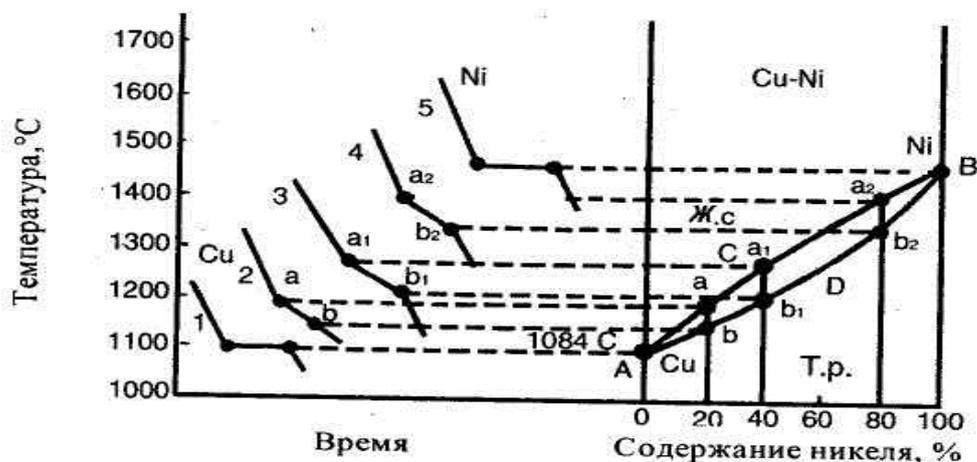
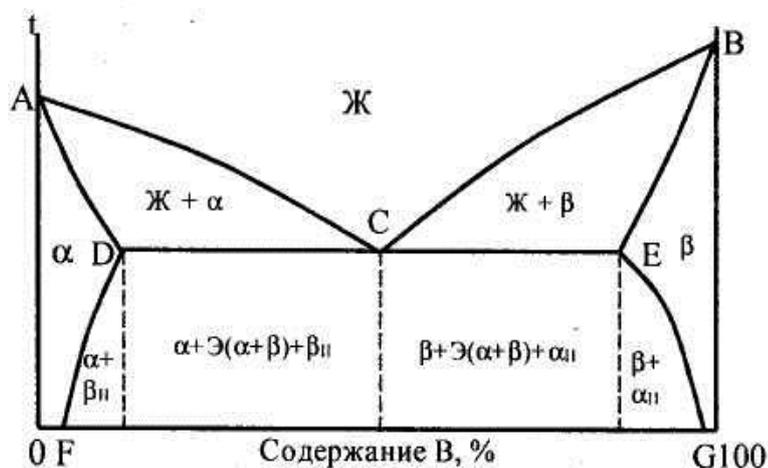


Рисунок 31-. Диаграмма состояния сплавов Cu - Ni

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма состояния III рода). Данная диаграмма характеризует сплавы, у которых компоненты неограниченно растворимы в жидком состоянии, ограничено — в твердом и получающиеся твердые растворы образуют эвтектику. К таким сплавам относятся алюминий-медь, магний-алюминий, магний-цинк и др. Рассмотрим этот тип диаграммы в общем виде (рис. 32). В сплаве могут существовать три фазы: жидкий сплав, твердый раствор  $\alpha$  компонента В в компоненте А и твердый раствор  $\beta$  компонента А в компоненте В. Твердые растворы обозначены здесь строчными греческими буквами, а компоненты - заглавными латинскими буквами. Данная диаграмма содержит в себе элементы двух предыдущих. Линия ACB является линией ликвидус, линия ADCEB - линией солидус. По линии AC начинают выделяться кристаллы твердого раствора  $\alpha$ , по линии CB — твердого раствора  $\beta$ . Левее точки D кристаллиза-

ция заканчивается образованием структуры однородного твердого раствора  $\alpha$ , а правее точки  $E$  - однородного твердого раствора  $\beta$ . Точка  $D$  характеризует предельную растворимость компонента  $B$  в компоненте  $A$ , а точка  $E$  - предельную растворимость компонента  $A$  в компоненте  $B$ . Чаще всего с понижением температуры растворимость компонентов уменьшается. Поэтому по линиям  $FD$  и  $EG$  происходит выделение вторичных кристаллов  $\alpha_{II}$  и  $\beta_{II}$ . Процесс выделения вторичных кристаллов из твердой фазы называется **вторичной кристаллизацией**. Возможен случай, когда растворимость не уменьшается с понижением температуры. Тогда вторичная кристаллизация происходить не будет, а линии  $DF$  и  $EG$  будут вертикальными.



*Рисунок 32 - Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии*

На участке  $DE$  кристаллизация заканчивается с образованием эвтектики. В данном случае эвтектика состоит не из механической смеси двух компонентов, как на диаграмме I рода, а из механической смеси твердых растворов  $\alpha$  и  $\beta$ . Сплав соответствующий точке  $C$  диаграммы называется **эвтектическим**. Все сплавы, расположенные между точками  $D$  и  $C$ , называются **дозэвтектическими**, а между точками  $C$  и  $E$  - **заэвтектическими**. После образования эвтектики в доэвтектическом сплаве также будет происходить вторичная кристаллизация твердого раствора  $\beta_{II}$ , а в заэвтектическом - твердого раствора  $\alpha_{II}$ .

**Диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение (диаграмма состояния IV рода).** Данная диаграмма характеризует сплавы, компоненты которых неограниченно растворимы в жидком состоянии, нерастворимы в твердом и образуют устойчивое химическое соединение. К таким сплавам относятся магний-медь, магний-кальций и др. Диаграмма этого типа в общем виде изображена на рис. 33. Она характеризуется наличием вертикальной линии, соответствующей соотношению компонентов в химическом соединении  $A_mB_n$ . Эта линия делит диаграмму на две части, которые можно рассматривать как самостоятельные диаграммы сплавов, образуемых одним из компонентов с химическим соединением. В случае устойчивого химического соединения каждый из компонентов образует с химическим соединением механическую смесь. Линия **ADCEB** является линией ликвидус данной диаграммы. На участке **AD** начинается кристаллизация компонента **A**, на участке **DCE** - химического соединения  $A_mB_n$ , на участке **EB** - компонента **B**. Точка **C** диаграммы соответствует химическому соединению  $A_mB_n$ . Кристаллизация происходит полностью аналогично кристаллизации сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов. Компонент **A** образует с химическим соединением  $A_mB_n$  эвтектику  $\mathcal{E}_1$ , состав которой соответствует точке **D**. Компонент **B** образует с химическим соединением  $A_mB_n$  эвтектику  $\mathcal{E}_2$ , состав которой соответствует точке **E**.

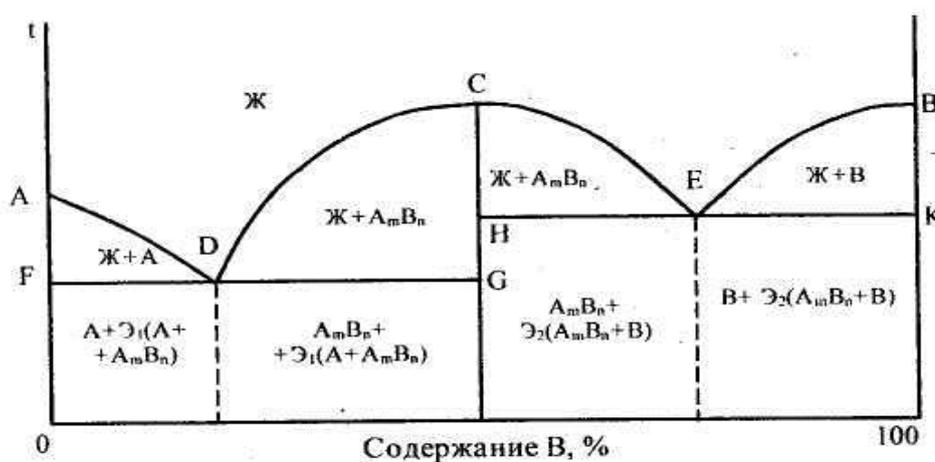


Рисунок 33 - Диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение

В некоторых сплавах могут одновременно находиться все виды соединений: механическая смесь, твердый раствор и химическое соединение. Примером таких сплавов служат сталь и чугун.

**Диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением одного из компонентов.** Большой практический интерес представляют сплавы, у которых один из компонентов или оба имеют полиморфные превращения. В этих сплавах в результате термической обработки можно получать метастабильные состояния структуры с новыми свойствами.

Диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением одного из компонентов представлена на рис. 34. Сплав I после полного затвердевания при температуре точки 2 в твердом состоянии в интервале температур точек 3 и 4 изменяет кристаллическую структуру. Это вызвано полиморфизмом компонента А, который до температуры точки  $A_1$  имеет тип кристаллической решетки  $A_\alpha$ , а при температуре более высокой -  $A_\gamma$ . Причем кристаллическая решетка  $A_\gamma$  такая же, как у компонента В, в результате чего между ними образуется непрерывный ряд твердых растворов.

В сплавах, составы которых лежат между точками  $x_a$  и  $x_b$ , превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  при охлаждении не заканчивается и сплав остается двухфазным ( $\gamma + \alpha$ ). Сплавы, составы которых лежат правее точки  $x_b$ , в твердом состоянии превращений не имеют, структура у них однофазная -  $\gamma$ -твердый раствор.

**Диаграмма состояния сплавов с полиморфными превращениями компонентов и эвтектоидным превращением.** Из анализа диаграммы, представленной на рис. 35, можно заключить, что после кристаллизации всех сплавов данной системы в определенном интервале температур образуется твердый раствор  $\gamma$ , который при понижении температуры ниже  $t_3$  испытывает эвтектоидное превращение  $\gamma_C \rightarrow \alpha_E + \beta_F$

Образовавшуюся смесь двух твердых фаз принято называть **эвтектоидом**. В связи с переменной растворимостью компонентов в твердых растворах  $\alpha$  и  $\beta$  при дальнейшем охлаждении следуют вторичные выделения твердых растворов  $\beta_{II}$

и  $\alpha_{II}$ , которые показаны на структурной схеме сплавов, приведенной под диаграммой (см. рис.9).

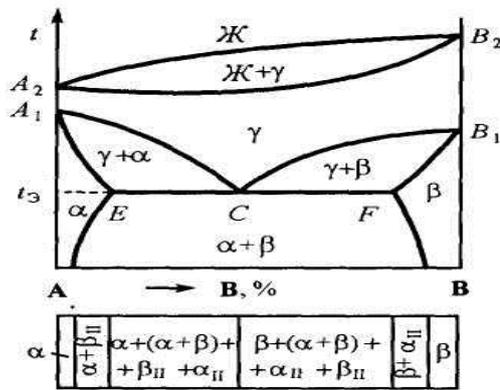
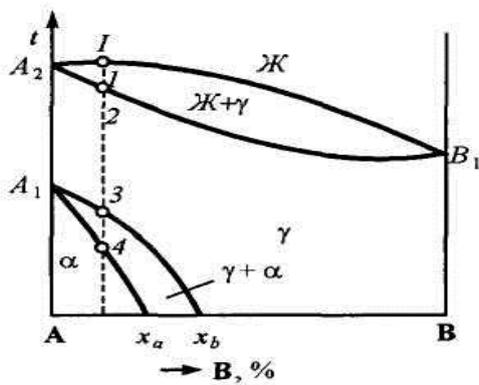


Рисунок 34 - Диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением одного из компонентов

Рисунок 35 - Диаграмма состояния сплавов с полиморфными превращениями компонентов и эвтектическим превращением

## 20 Железо и его сплавы, Диаграмма Fe-C(Fe<sub>3</sub>C)

Железоуглеродистые сплавы - стали и чугуны - важнейшие металлические сплавы современной техники. По объему производство чугуна и стали намного более чем в 10 раз превосходит производство всех других металлов, вместе взятых. Диаграмма состояний железо - углерод, которая будет рассмотрена в этой главе, дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов - сталей и чугунов.

Сталь - это сплав железа с углеродом с содержанием углерода менее 2,14 %, а чугун - сплав железа с углеродом с содержанием углерода более 2,14 % С. Более 80 % всех конструкций и деталей машин изготавливают из сталей и чугунов, поэтому изучение строения, свойств, особенностей режимов технологической и термической обработки этих материалов является актуальной задачей.

Свойства сталей и чугунов определяет диаграмма «железо - углерод», а точнее «железо - цементит», поскольку при содержании углерода более 6,67 % отсутствует металлическая составляющая. Имеются две диаграммы состояния желе-

зоуглеродистых сплавов: метастабильная, характеризующая превращения в системе Fe – Fe<sub>3</sub>C (цементит), и стабильная, характеризующая превращение в системе Fe – C (рис. 48). На то, что система Fe – C является более стабильной, чем система Fe – Fe<sub>3</sub>C, указывает тот факт, что при нагреве до высоких температур цементит распадается на железо и графит, т.е. переходит в более стабильное состояние.

**Компоненты и фазы в сплавах железа с углеродом.** Железо и углерод – элементы полиморфные. Железо с температурой плавления 1539°C имеет две модификации –  $\alpha$  и  $\gamma$ . Модификация Fe <sub>$\alpha$</sub>  существует при температурах до 911°C и от 1392 до 1539°C, имеет ОЦК решетку с периодом 0,286 нм (при 20 – 25°C). Важной особенностью Fe <sub>$\alpha$</sub>  является его ферромагнетизм ниже температуры 768°C, называемой *точкой Кюри*.

Модификация Fe <sub>$\gamma$</sub>  существует в интервале температур от 911 до 1392°C, и имеет ГЦК решетку, период которой при 911°C равен 0,364 нм. ГЦК решетка более компактна, чем ОЦК. В связи с этим при Fe <sub>$\alpha$</sub>  → Fe <sub>$\gamma$</sub>  объем железа уменьшается приблизительно на 1 %. Fe <sub>$\gamma$</sub>  парамагнитно.

Углерод существует в двух модификациях: графита и алмаза. При нормальных условиях стабилен графит, алмаз представляет собой его метастабильную модификацию. При высоких давлениях и температурах стабильным становится алмаз. Это используют при получении синтетических алмазов.

В сплавах железа с углеродом могут существовать 5 фаз: жидкий расплав, феррит, аустенит, цементит и свободный углерод в виде графита.

**Феррит** (обозначают Ф или  $\alpha$ ) — твердый раствор внедрения углерода в Fe <sub>$\alpha$</sub> . Различают низкотемпературный и высокотемпературный феррит. Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите составляет лишь 0,02 %, в высокотемпературном – 0,1 %. Столь низкая растворимость углерода в Fe <sub>$\alpha$</sub>  обусловлена малым размером межатомных пор в ОЦК решетке. Значительная доля атомов углерода вынуждена размещаться в дефектах (вакансиях, дислокациях).

Феррит - мягкая, пластичная фаза со следующими механическими свойствами:  $\sigma_B = 300$  МПа;  $\delta = 40\%$ ;  $\psi = 70\%$ ;  $KCU = 2,5$  МДж/м<sup>2</sup>; твердость - 80- 100 НВ.

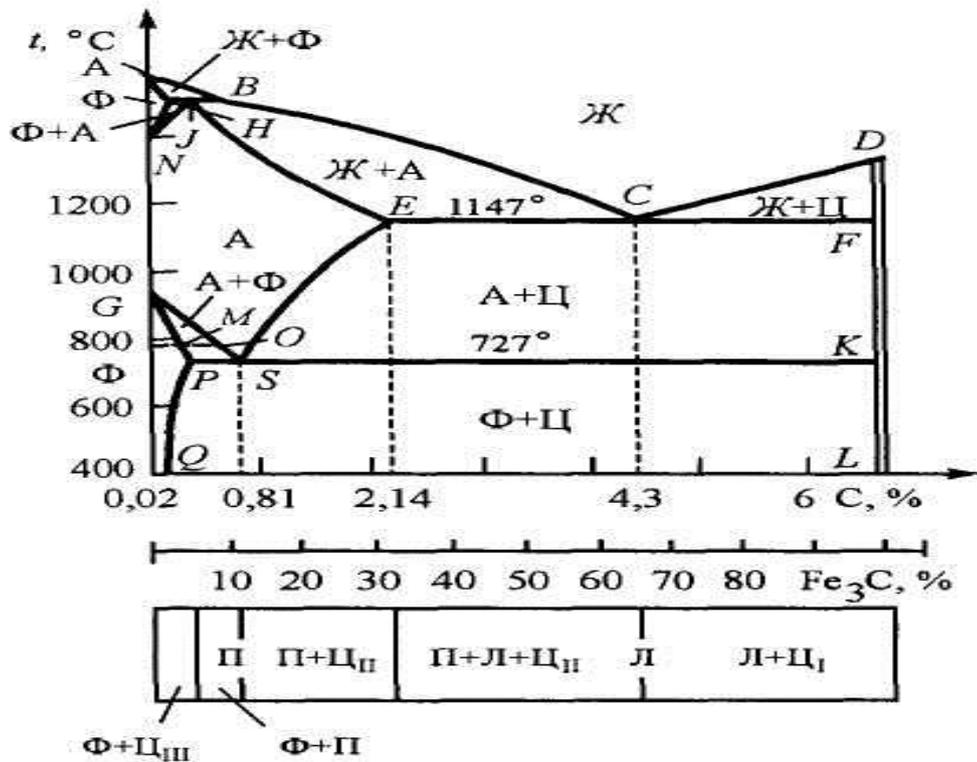


Рисунок 48 - Диаграмма состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C

**Аустенит** (обозначают А или  $\gamma$ ) - твердый раствор внедрения углерода в Fe $_{\gamma}$ . Он имеет ГЦК решетку, межатомные поры в которой больше, чем в ОЦК решетке, поэтому растворимость углерода в Fe $_{\gamma}$  значительно больше и достигает 2,14 %. Аустенит пластичен, но прочнее феррита (160 - 200 НВ) при 20 - 25 °С.

**Цементит** (обозначают Ц) — карбид железа (почти постоянного состава) Fe<sub>3</sub>C, содержит 6,69 % С и имеет сложную ромбическую решетку. При нормальных условиях цементит тверд (800 НВ) и хрупок. Он слабо ферромагнитен и теряет ферромагнетизм при 210 °С. Температуру плавления цементита трудно определить в связи с его распадом при нагреве. При нагреве лазерным лучом она установлена равной 1260 °С.

**Графит** — углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Имеет гексагональную кристаллическую решетку. Графит электропроводен, химически стоек, малопрочен, мягок.

Каждая точка на диаграмме имеет свой физический смысл. Координаты характерных точек диаграммы приведены в табл. 4

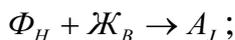
Таблица 4 - Характерные точки диаграммы состояния Fe - Fe<sub>3</sub>C

Обозначение точки	t,°C	C,%	Обозначение точки	t,°C	C,%
A	1539	0	C	1147	4,3
H	1499	0,1	F	1147	6,69
J	1499	0,16	G	911	0
B	1499	0,51	P	727	0,02
N	1392	0	S	727	0,8
D	1260	6,69	K	727	6,69
E	1147	2,14			

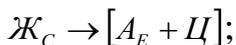
Точка *A* определяет температуру плавления чистого железа, а *D* — температуру плавления цементита. Точки *N* и *G* соответствуют температурам полиморфных превращений железа. Точки *H* и *P* характеризуют предельную концентрацию углерода соответственно в высокотемпературном и низкотемпературном феррите. Точка *E* определяет наибольшую концентрацию углерода в аустените. Значения остальных точек будут ясны после проведенного анализа диаграммы.

Превращения в сплавах системы Fe - Fe<sub>3</sub>C происходят как при затвердевании жидкой фазы, так и в твердом состоянии. Первичная кристаллизация идет в интервале температур, определяемых на линиях ликвидус (*ABCD*) и солидус (*АНJECF*). Вторичная кристаллизация вызвана превращением железа одной модификации в другую и переменной растворимостью углерода в аустените и феррите; при понижении температуры эта растворимость уменьшается. Избыток углерода из твердых растворов выделяется в виде цементита. Линии *ES* и *PQ* характеризуют изменение концентрации углерода в аустените и феррите соответственно, цементит имеет почти неизменный состав (двойная вертикальная линия *DFKQ*). Выделяющийся из жидкости цементит называют первичным, из аустенита - вторичным, из феррита - третичным. Соответственно на диаграмме состояния *CD* - линия первичного цементита, *ES* - линия вторичного цементита; *PQ* - линия

третичного цементита. В системе Fe - Fe<sub>3</sub>C происходят три изотермических превращения: перитектическое превращение на линии *HJB* (1499°C)



эвтектическое превращение на линии *ECF* (1147 °C)



эвтектоидное превращение на линии *PSK* (727 °C)



Эвтектическая смесь аустенита и цементита называется **ледебуритом**, эвтектоидная смесь феррита и цементита - **перлитом**.

**Эвтектоид** - механическую смесь перлита (0,8 %C) и эвтектики (ледебурита с 4,3 %C) рассматривают как самостоятельные структурные составляющие, оказывающие заметное влияние на свойства сплавов. Перлит чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей:  $\sigma_B = 800...900$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 450$  МПа;  $\delta \leq 16\%$ ; твердость - 180 - 220 НВ. При охлаждении ледебурита до температур ниже линии *SK* входящий в него аустенит превращается в перлит, и при 20 - 25°C ледебурит представляет собой смесь цементита и перлита. В этой структурной составляющей цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита. Такое строение ледебурита служит причиной его большой твердости и хрупкости. Присутствие ледебурита в структуре сплавов обуславливает их неспособность к обработке давлением, затрудняет обработку резанием.

Кристаллизация чистого железа протекает изотермически при 1539°C, а сплавов железа с углеродом - в интервале температур. Рассмотрим вначале верхний участок диаграммы состояния (рис. 49), где происходит перитектическое превращение.

Сталь состава I, содержащая около 0,05 % C, не испытывает перитектического превращения. Она кристаллизуется в интервале температур точек 1-2. При этом составы жидкой фазы и феррита изменяются по обычным законам кристаллизации твердых растворов. Образуется зернистая структура, состоящая из кристаллов феррита. В интервале температур точек 3 - 4 происходит перекристаллизация феррита в аустенит, вызванная полиморфизмом железа.

Сталь состава III, содержащая 0,16 % C, при кристаллизации из жидкой фазы в интервале температур точек 8-9 образует кристаллы феррита, которые при температуре точки 9 имеют состав точки H, а оставшаяся жидкость - состав точки B. При 1499°C протекает перитектическая реакция. Кристаллы феррита взаимодействуют с жидкой фазой, и образуются кристаллы аустенита состава точки J. Согласно правилу фаз, перитектический процесс идет изотермически и при постоянной концентрации фаз, так как число степеней свободы при этом процессе равно нулю.

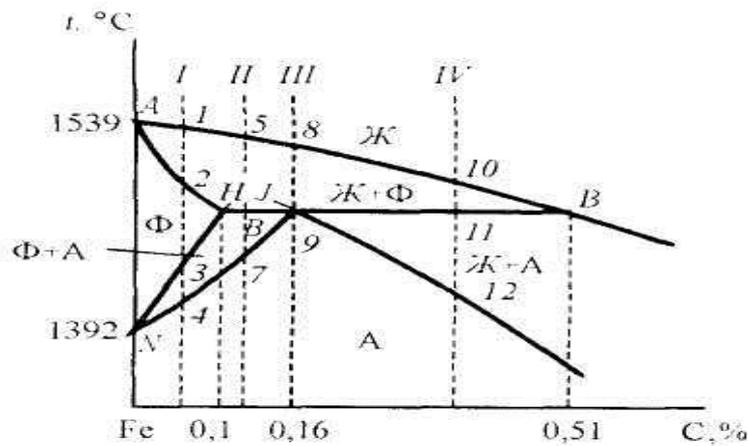
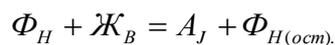


Рисунок 49 - Часть диаграммы состояния Fe - Fe<sub>3</sub>C для сталей, испытывающих перитектическое превращение

Стали состава II имеют содержание углерода от 0,1 до 0,16 % (углеродистые конструкционные стали марок 10 – 15). В интервале температур точек 5 0 в них выделяется феррит. При температуре точки 6 в сплаве II содержится избыточный феррит. В результате перитектический процесс заканчивается образованием новой фазы аустенита при сохранении некоторого количества феррита:



При дальнейшем охлаждении этот остаток феррита перекристаллизуется в аустенит с тем содержанием углерода, которое имеет сплав.

Съали типа IV содержат от 0,16 до 0,51 %C. При температуре точки 11 они имеют избыток жидкой фазы по сравнению со сплавом III. В результате перитект-

тический процесс заканчивается образованием аустенита при сохранении некоторого количества жидкой фазы:

$$\Phi_H + \mathcal{Ж}_B = A_J + \mathcal{Ж}_{B(ост)}.$$

При дальнейшем охлаждении в интервале температур точек *11-12* оставшаяся жидкая фаза затвердевает, образуя аустенит. Концентрация углерода в аустените ниже температуры точки *11* изменяется по линии *JE*.

Таким образом, все рассмотренные стали, лежащие ниже линий *NJ* и *JE*, находятся в твердом состоянии и имеют аустенитную структуру. Рассмотрим превращения, протекающие в сталях при охлаждении из однофазной аустенитной области (рис. 46 а). Именно при этих температурах выполняют большинство технологических операций (термическую обработку, обработку давлением и др.).

Сплавы железа с углеродом, содержащие до 0,02 % С (точка *P* диаграммы), называют техническим железом. Если углерода содержится меньше 0,0002% (сплав I), то при охлаждении от температуры точки *1* до температуры точки *2* происходит перекристаллизация аустенита в феррит. Однофазная ферритная структура сохраняется вплоть до 20 - 25 °С.

При содержании углерода в техническом железе больше 0,0002 % (сплав II на рис. 50 а) после образования феррита, начиная с температуры точки *5*, происходит выделение из феррита кристаллов третичного цементита. Этот процесс вызван уменьшением растворимости углерода в феррите (см. линию *PQ* на рис. 50 а). Конечная структура будет двухфазной: феррит и третичный цементит, причем цементит располагается в виде прослоек по границам ферритных зерен. Третичный цементит ухудшает технологическую пластичность.

При 20 - 25°С третичный цементит имеется во всех железоуглеродистых сплавах, содержащих более 0,0002 % С. Однако роль третичного цементита в формировании свойств невелика, так как его содержание мало по сравнению с цементитом, выделившимся при других фазовых превращениях. Обычно при рассмотрении структуры сплавов с содержанием углерода более 0,02 % о третичном цементите не упоминают.

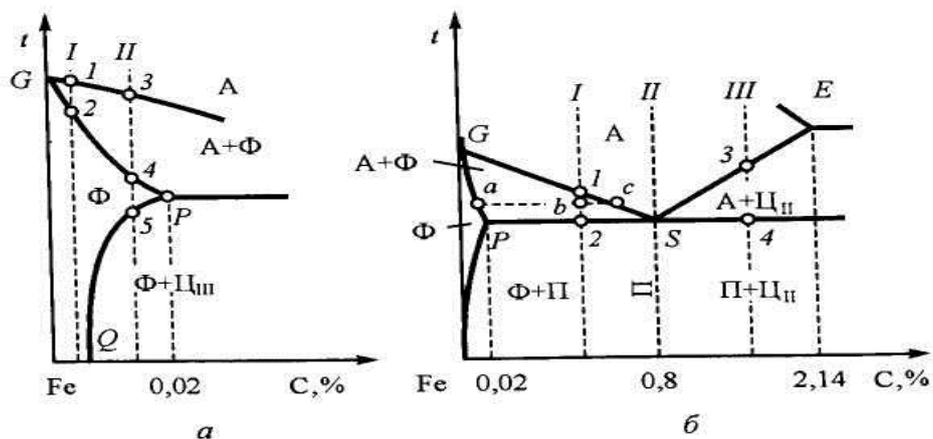


Рисунок 50 - Часть диаграммы состояния  $Fe - Fe_3C$  для сплавов, не испытывающих (а) и испытывающих (б) эвтектоидное превращение

Сплав II (рис. 50 б) с содержанием 0,8 % С называется эвтектоидной сталью. В ней при температуре линии  $PSK$  происходит эвтектоидное превращение, в результате которого из аустенита выделяются феррит с содержанием 0,02% С и цементит. Такую смесь двух фаз называют перлитом. Эвтектоидное превращение идет при постоянных температуре и составе фаз, так как в процессе одновременно участвуют три фазы и число степеней свободы равно нулю.

Сплав I (см. рис. 50 б) с содержанием углерода менее 0,8 % называют доэвтектоидной сталью. Обычно все эти углеродистые стали относятся к классу конструкционных. Эвтектоидному превращению в них предшествует частичное превращение аустенита в феррит в интервале температур точек 1-2. При температуре точки  $b$  фазовый состав сплава  $A_c + \Phi_a$ . Количественное соотношение аустенита и феррита соответственно определяется отношением отрезков  $ab$  и  $bc$ .

При температуре точки 2 сплав имеет фазовый состав  $A_S + \Phi_P$  с количественным соотношением фаз соответственно  $P2$  и  $2S$ . В результате эвтектоидного превращения аустенит переходит в перлит, который вместе с выделившимся ранее ферритом образует конечную структуру стали.

Количественное соотношение между структурными составляющими (феррит и перлит) в доэвтектоидных сталях определяется содержанием углерода. Чем

ближе содержание углерода к эвтектоидной концентрации, тем больше в структуре перлита. Следовательно, зная содержание углерода в доэвтектоидной стали, можно заранее предвидеть ее структуру в стабильном состоянии.

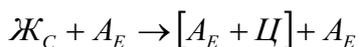
Сплав III (рис. 50 б) — заэвтектоидная сталь ( $C > 0,8 \%$ ). Эвтектоидному превращению в этих сталях в интервале температур точек 3 - 4 предшествует выделение из аустенита вторичного цементита ( $C_{II}$ ). Этот процесс вызван уменьшением растворимости углерода в аустените согласно линии  $ES$  диаграммы. В результате при охлаждении до температуры точки 4 аустенит в стали обедняется углеродом до  $0,8 \%$  и на линии  $PSK$  испытывает эвтектоидное превращение. При медленном охлаждении вторичный цементит выделяется на границах аустенитных зерен, образуя сплошные оболочки, которые на микрофотографиях выглядят светлой сеткой. Максимальное количество структурно свободного цементита ( $\sim 20 \%$ ) будет в сплаве с содержанием углерода  $2,14\%$ . Заэвтектоидные углеродистые стали относятся к классу инструментальных.

**Превращения в чугунах при нагреве и охлаждении.** В сплавах с содержанием углерода более  $2,14 \%$  при кристаллизации происходит эвтектическое превращение. Такие сплавы называют белыми чугунами. Сплав II (рис. 51) - эвтектический белый чугун ( $4,3 \%$  C) кристаллизуется при эвтектической температуре изотермически с одновременным выделением двух фаз: аустенита состава точки  $E$  и цементита. Образующаяся механическая смесь этих фаз, как известно, названа ледебуритом. Фазовый состав ледебурита, как и любой эвтектики, постоянен и определяется отношением отрезков  $\frac{C}{A_E} = \frac{EC}{CF}$ .

При дальнейшем охлаждении концентрация углерода в аустените изменяется по линии  $ES$  вследствие выделения вторичного цементита и к температуре эвтектоидного превращения принимает значение  $0,8 \%$  C. При температуре линии  $PSK$  аустенит в ледебурите претерпевает эвтектоидное превращение в перлит.

В доэвтектических белых чугунах ( $C < 4,3 \%$ ) кристаллизация сплава начинается с выделения аустенита из жидкого раствора. В сплаве I (см. рис. 51) этот

процесс идет в интервале температур точек 1-2. При температуре точки 2 образуется эвтектика (ледебурит) по реакции



При последующем охлаждении из аустенита, структурно свободного и входящего в ледебурит, выделяется вторичный цементит. Обедненный вследствие этого аустенит при 727°C превращается в перлит.

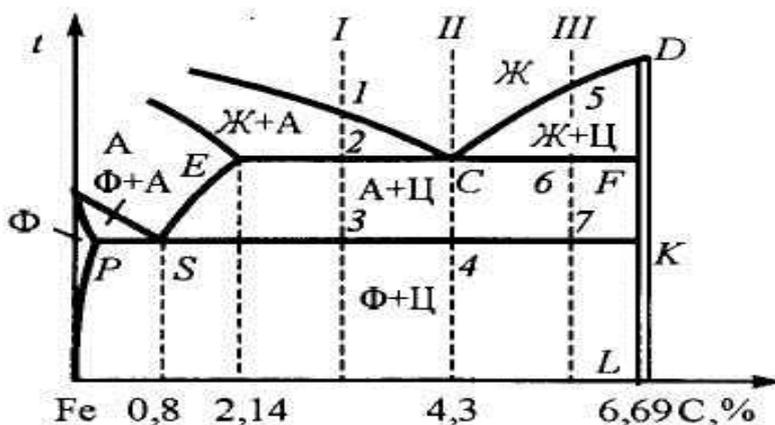


Рисунок 51 - Часть диаграммы состояния Fe - Fe<sub>3</sub>C для высокоуглеродистых сплавов (чугунов)

Сплав III (см. рис. 51) - заэвтектический белый чугун (C > 4,3 %). В заэвтектических чугунах кристаллизация начинается с выделения из жидкого раствора кристаллов первичного цементита в интервале температур точек 5 - 6; при этом состав жидкой фазы изменяется согласно линии DC. Первичная кристаллизация заканчивается эвтектическим превращением, с образованием ледебурита. При дальнейшем охлаждении происходят превращения в твердом состоянии, такие же, как в сплаве II.

### Вопросы для самоконтроля по разделу

1. Какие типы кристаллических решеток Вам известны?
2. Как обозначаются кристаллографические направления в плоскости?
3. Какие дефекты существуют в кристаллических решетках металлов?

4. Перечислите возможные варианты фазового состава у различных двойных сплавов?
5. В чём заключается эффект модифицирования сплавов?
6. Объясните суть и практическое значение правила отрезков?
7. Назовите прочностные и пластические характеристики металлических материалов.
8. Назовите фазы образующиеся в системе Fe – Fe<sub>3</sub>C, сравните их свойства.
9. Чем отличается эвтектическое превращение от перитектического и эвтектоидного? Как называются структуры, образующиеся в системе Fe – Fe<sub>3</sub>C при этих превращениях?
10. Что такое текстура?
11. Назовите виды разрушения материалов, и чем они характеризуются?
12. Что такое порог хладноломкости и критическая температура хрупкости материалов? Как определяется критическая температура хрупкости?

## Раздел пятый

### Практическое материаловедение

#### 23 Элементы теории термической обработки стали

**Термической обработкой (ТО)** называют процессы теплового воздействия по определенным режимам с целью изменения структуры и свойств сплава. Основные факторы воздействия при ТО: – температура  $t$  и время  $\tau$ . Поэтому процесс ТО обычно изображают в виде графика в координатах «температура – время» (рис. 52). Режим термической обработки характеризуют следующие основные параметры: температура нагрева  $t_{max}$ , т. е. максимальная температура, до которой был нагрет сплав при термической обработке; время выдержки сплава при температуре нагрева  $\tau_B$ , скорость нагрева  $U_{нагр}$  и скорость охлаждения  $U_{охл}$ .

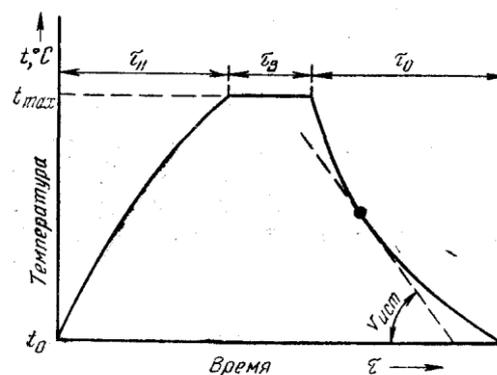


Рисунок 52 – График (режим) простой термической обработки

Графиком «температура – время» может быть охарактеризован любой процесс термической обработки. Результатом ТО должно быть остаточное изменение свойств сплава, обусловленные фазовыми превращениями. Поэтому при выборе режима ТО данного сплава пользуются его диаграммой состояния.

При ТО происходит превращение, протекающее во времени, и невозможно установить, какое изменение вносит время, если неизвестно, каково устойчивое состояние сплава. Диаграмма состояния показывает, каким видам ТО может быть

подвергнут сплав и в каких температурных интервалах следует производить обработку.

При изучении кристаллизации было видно, что этот процесс совершается вследствие того, что при изменившихся условиях одно состояние, например кристаллическое, более устойчиво, чем, например, жидкое. Фазовые превращения, которые совершаются в стали, также вызваны тем, что вследствие изменившихся условий, например температуры, одно состояние оказывается менее устойчивым, чем другое (рис. 53). Этим и вызываются превращения, протекающие в стали.

Рассматривая структурные превращения в стали, прежде всего необходимо указать, что основными являются три структуры, а переход их из одной в другую характеризуют основные превращения. Это аустенит, мартенсит и перлит. При термической обработке стали наблюдаются четыре основных превращения.

1 Превращение перлита в аустенит, протекающее выше точки  $A_1$ , выше температуры стабильного равновесия «аустенит – перлит»; при этих температурах из трех основных структур минимальной свободной энергией обладает аустенит (рис. 54):



2 Превращение аустенита в перлит, протекающее ниже  $A_1$ :



3 Превращение аустенита в мартенсит:



Это превращение наблюдается ниже температуры метастабильного равновесия аустенит – мартенсит ( $T_0$ ). При  $T_0$  более устойчивой фазой является перлит, однако работа, необходимая для образования мартенсита из аустенита, меньше, чем для образования перлита; поэтому ниже  $T_0$  образование перлита (феррито-карбидной смеси) из аустенита может произойти только в результате превращения аустенита в мартенсит, а затем уже мартенсита в перлит.

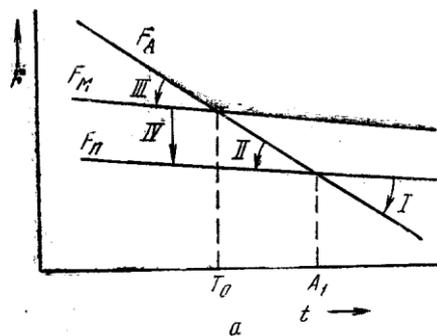


Рисунок 53 – Изменение свободной энергии аустенита ( $F_A$ ), мартенсита ( $F_M$ ) и перлита ( $F_P$ ) с изменением температуры

Таким образом, аустенито-мартенситное превращение в данном случае является промежуточным в процессе перехода аустенита в перлит.

4 Превращение мартенсита в перлит, точнее в феррито-карбидную смесь:



Оно происходит при всех температурах, так как при всех температурах свободная энергия мартенсита больше свободной энергии перлита.

Образование аустенита при нагреве является диффузионным процессом и подчиняется основным положениям теории кристаллизации. По ДС «железо-цементит» при нагреве эвтектоидной стали (0,8 % С) перлит превращается в аустенит  $\Phi + \text{Ц} \rightarrow \text{А}$ . Превращение состоит из двух одновременно протекающих процессов: полиморфного  $\alpha \rightarrow \gamma$  перехода и растворения цементита в аустените.

В доэвтектоидной стали при нагреве выше температуры  $A_{C1}$  (727°C) после превращения перлита в аустенит образуется двухфазная структура: аустенит и феррит. При дальнейшем нагреве в интервале температур  $A_{C1}$ -  $A_{C3}$  феррит постепенно превращается в аустенит: содержание углерода в аустените при этом уменьшается в соответствии с линией GS на диаграмме.

Аналогично протекает превращение в заэвтектоидной стали, за исключением того, что вместо феррита в ней при нагреве присутствует цементит, который и растворяется в аустените при увеличении температуры.

Механизм превращения перлита в аустенит состоит в зарождении и росте зерен. Первоначальные зародыши аустенита при нагреве немного выше критической температуры  $A_{C1}$  образуются сдвиговым путем при сохранении когерентных границ. При этом образуется назоуглеродистый аустенит пластинчатой формы. Зародыш аустенита возникает на межфазной границе раздела феррита и цемента (рис. 54). При росте зародыша когерентность  $\alpha$  и  $\gamma$  решеток нарушается, сдвиговый механизм заменяется нормальным механизмом роста и зерна аустенита приобретают равноосную форму.

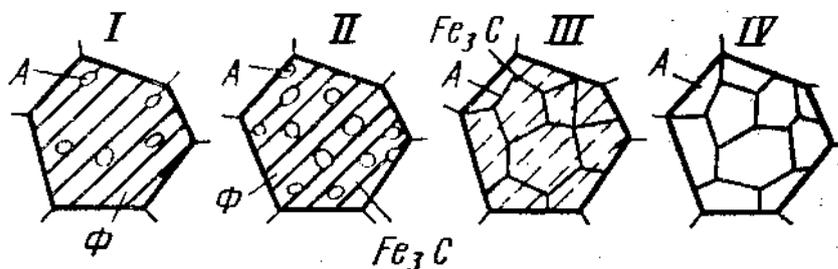


Рисунок 54 – Последовательные стадии превращения стали с ферритно-цементитной структурой при нагреве

**Диаграмма изотермического образования аустенита** - это экспериментально построенные диаграммы «время – температура – степень превращения» (рис. 55). Для построения образцы нагревают быстро до температур выше  $A_{C1}$  и выдерживают различное время, фиксируя начало и конец превращения перлита в аустенит. Рост участков аустенита в результате полиморфного  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения происходит гораздо быстрее, чем растворение цемента, поэтому после превращения феррита в структуре стали сохраняется еще некоторое количество цемента. (III).

Скорость превращения зависит от: 1 – температуры нагрева (с ростом температуры процесс превращения перлита в аустенит резко ускоряется);

2 – от исходного состояния (чем тоньше ферритно-цементитная структура, тем больше зародышей аустенита возникает и меньше пути диффузии, т.е. быстрее протекает превращение, сфероидизация перлита резко замедляет аустенитное превращение);

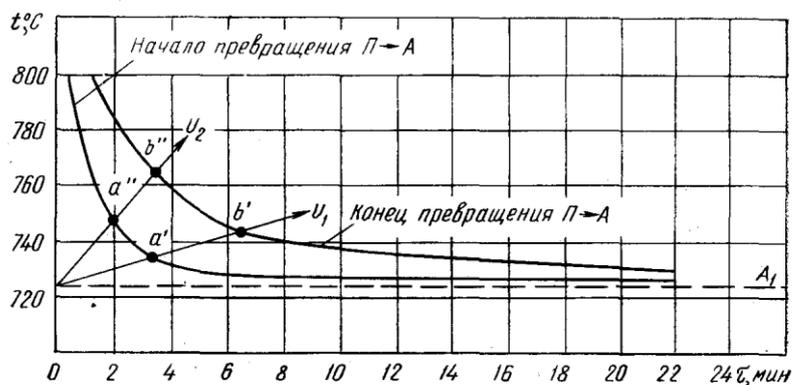


Рисунок 55 – Превращение перлита в аустенит при постоянной температуре

3 – от количества углерода в стали (чем больше углерода, тем больше количество цементита, следовательно, больше поверхность раздела, больше зерен аустенита образуется);

4 – от количества легирующих элементов (хром, ванадий, молибден, вольфрам образуют карбиды, трудно растворяемые в аустените, и тем самым замедляют процесс его образования);

5 – от скорости нагрева (чем выше скорость нагрева, тем при более высокой температуре происходит превращение аустенита).

Если начальное зерно аустенита мелкое, при дальнейшем нагреве или увеличении времени выдержки происходит избирательная рекристаллизация и зерно увеличивается. Чем выше скорость нагрева, тем мельче зерно аустенита. В зависимости от условий выплавки стали различают наследственно мелкозернистую сталь и наследственно крупнозернистую. Под наследственной зернистостью понимают склонность аустенитного зерна к росту.

Стали, раскисленные в процессе выплавки кремнием (феррокремнием) и марганцем (ферромарганцем), обладают склонностью к непрерывному росту зерна и называются наследственно крупнозернистыми. Стали, раскисленные дополнительно алюминием, ванадием или титаном, не обнаруживают роста зерна при нагреве до значительно более высоких температур и называются наследственно мелкозернистыми. Наследственная мелкозернистость обусловлена наличием мелкодисперсных частиц (карбидов, нитридов, окислов), растворяемых при более высоких температурах, тогда зерно аустенита начинает заметно расти.

Чем мельче зерно, тем выше прочность, пластичность и вязкость стали, ниже порог хладноломкости и меньше склонность к хрупкому разрушению. Размер зерна, полученный в стали в результате определенной термообработки, - это действительное зерно. Существует ГОСТ 5639-65 на определение балла зерна аустенита. Стали с номером зерна 1-5 считают крупнозернистыми, 6-15 – мелкозернистыми.

**Перегрев** – это продолжительный нагрев доэвтектоидной или заэвтектоидной стали при температурах, значительно превышающих  $A_{C3}$  или  $A_{cm}$ , в результате образуется крупное действительное зерно, как при высокой, так и при комнатной температуре. Такие стали имеют видманштеттову структуру, излом таких сталей хрупкий. Исправить перегрев можно повторным нагревом стали до температуры выше точки  $A_{C3}$ . **Пережог** – еще более высокий нагрев в окислительной атмосфере, по границам крупных зерен образуются окислы железа. Излом стали камневидный. Пережог неисправимый дефект.

**Термокинетические диаграммы распада аустенита.** Если сталь со структурой аустенита, полученной в результате нагрева до температуры выше  $A_{C3}$  (для доэвтектоидной стали) или выше  $A_{Ct}$  (для эвтектоидной стали) переохладить до температуры ниже  $A_1$ , то аустенит оказывается в метастабильном состоянии и претерпевает превращение. Для более точной оценки превращений, совершающихся при непрерывно меняющейся температуре, пользуются так называемыми термокинетическими или анизотермическими диаграммами превращений аусте-

нита, диаграммами, характеризующими превращение аустенита при различных скоростях охлаждения.

Для изучения изотермического превращения аустенита небольшие образцы стали нагревают до температур, соответствующих существованию стабильного аустенита, а затем быстро охлаждают до температуры ниже  $A_1$  и выдерживают при этих температурах до полного распада аустенита.

Результаты исследования при постоянной температуре характеризует кривая, показывающая количество распавшегося аустенита в зависимости от времени, прошедшего с момента начала распада. Как видно из рис. 56 а, в течение некоторого промежутка времени ( $H_1, H_2, H_3$ ) распад аустенита экспериментально не фиксируется. Этот период называют инкубационным.

По истечении этого периода аустенит начинает распадаться с образованием более стабильных структур. В области повышенных температур распад протекает с образованием структуры из феррита и цементита. Скорость распада сначала быстро увеличивается, а затем постепенно замедляется. Через некоторое время ( $K_1, K_2, K_3$ ) процесс распада полностью заканчивается или приостанавливается. Построение таких кривых после охлаждения до разных температур ( $t_1, t_2, t_3$  и т.д.) позволяет получить диаграмму изотермического превращения аустенита (рис. 57 б). Для этого нужно отрезки времени, соответствующие началу ( $H_1, H_2, H_3$ ) и концу распада аустенита ( $K_1, K_2, K_3$  и т. д.) или какой-то заранее принятой степени превращения для каждой из исследуемых температур ( $t_1, t_2, t_3$ ), перенести на график, на котором по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат – температура, и одноименные точки соединить плавными кривыми. В диаграмме изотермического превращения аустенита (рис. 56 б) кривая 1 характеризует начало распада аустенита, а кривая 2 показывает время, необходимое для полного распада аустенита.

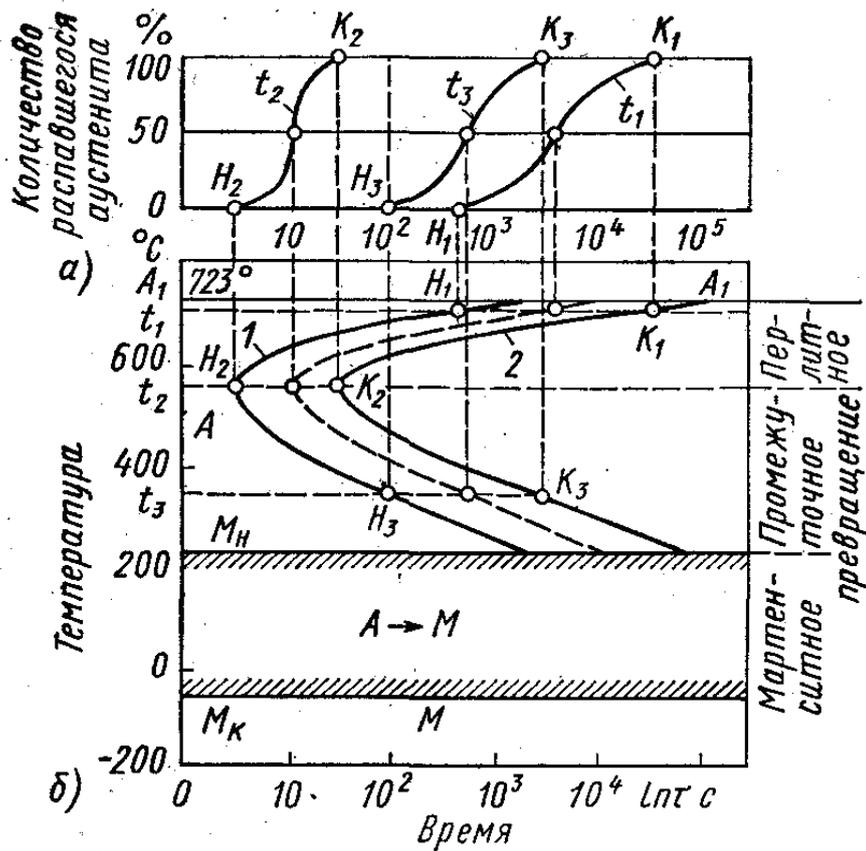


Рисунок 56 – Построение диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита

Область, лежащая левее кривой начала распада аустенита (рис. 57 б), определяет продолжительность инкубационного периода; в интервале температур и времени, соответствующих этой области, существует переохлажденный аустенит, практически не претерпевающий заметного распада. Длительность инкубационного периода характеризует устойчивость переохлажденного аустенита. С увеличением переохлаждения его устойчивость быстро уменьшается, достигая минимума, и далее вновь возрастает.

Чем ниже температура распада аустенита, тем дисперснее феррито-цементитная смесь. Степень дисперсности характеризуют межпластинчатым расстоянием, оно равно усредненной суммой двух соседних толщин ферритной и карбидной пластин. Перлит образуется при распаде аустенита при малых степе-

нях переохлаждения (до температур около  $700^{\circ}\text{C}$ ). Твердость перлита НВ 180-250,  $l_0 = 0,6-1,0$  мкм.

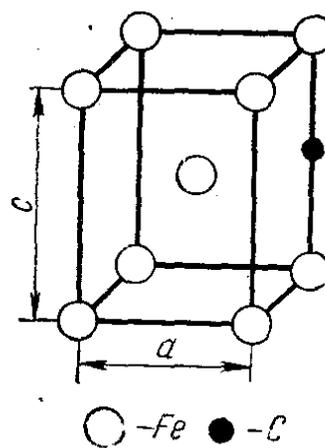
При переохлаждениях до  $650^{\circ}\text{C}$  образуется мелкая феррито-карбидная смесь, которая называется сорбит. Твердость сорбита НВ 250-330,  $l_0 = 0,25-0,3$  мкм. При охлаждении аустенита до  $550^{\circ}\text{C}$  образуется еще более мелкая феррито-карбидная смесь – троостит. Твердость троостита НВ 330-400,  $l_0 = 0,1-0,15$  мкм. Сорбит и троостит называют квазиэвтектоидами, а перлит – эвтектоидом.

Однородный (гомогенный) аустенит всегда превращается в пластинчатый перлит. Следовательно, нагрев до высокой температуры образования гомогенного аустенита позволяет получать пластинчатый перлит. Если температуры нагрева недостаточно высоки, аустенит при них неоднороден, то в процессе его распада образуется зернистый перлит. Вероятно, оставшиеся не растворенными в аустените частицы являются дополнительными центрами кристаллизации и способствуют образованию зернистого цементита.

Твердость и прочность стали с феррито-перлитной смесью прямопропорциональны суммарной поверхности раздела между ферритом и цементитом. Поэтому, чем дисперснее структура стали, тем выше твердость, пределы прочности, текучести и выносливости возрастают. Относительное сужение и удлинение максимальны у сорбита, у троостита они падают.

При высокой скорости охлаждения образуется фаза, называемая мартенсит. **Мартенсит** – это упорядоченный пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. Если в равновесном состоянии растворимость углерода в  $\alpha$ -железе не превышает 0,002 %, то его содержание в мартенсите может достигать 2,14 %, т.е. как в исходном аустените.

Мартенсит имеет тетрагональную решетку, в которой один период “с” больше другого “а”. При увеличении содержания углерода высота тетрагональной призмы “с” увеличивается, а размеры ее основания уменьшаются. Атомы углерода занимают октаэдрические поры вдоль оси [001]. (рис. 57)



*Рисунок 57 – Кристаллическая ячейка мартенсита*

Мартенситное превращение происходит только в том случае, когда быстрым охлаждением аустенит переохлажден до низких температур, при которых диффузионные процессы становятся невозможными. Превращение носит бездиффузионный характер, не сопровождается перераспределением атомов углерода и железа в решетке аустенита.

Мартенситное превращение происходит путем сдвига, т.е. кооперативного направленного смещения атомов в процессе перестройки решетки. Состав твердого раствора при этом не меняется. Часто после мартенситного превращения на поверхности микрошлифа виден характерный микрорельеф. Рост кристалла мартенсита продолжается, пока не нарушена когерентность его решетки и решетки аустенита.

Мартенсит разделяют на пластинчатый и реечный. Пластинчатый (чаще его называют игольчатым) наблюдается в закаленных средне- и высокоуглеродистых сталях. Мартенситный кристалл имеет форму тонкой пластины, обычно на шлифе видно сечение пластин в виде игл. Размер пластин мартенсита зависит от размера зерен аустенита. При очень мелком зерне аустенита игольчатое строение неразлично под микроскопом при увеличениях 500-600 крат, такой мартенсит называют безструктурным.

Количество образовавшегося мартенсита зависит от температуры, до которой охлажден образец ( $M_H$  - температура начала мартенситного превращения). Чтобы мартенситное превращение развивалось, необходимо непрерывно охлаждать образец, в отличие от перлитного превращения, которое может проходить при постоянной температуре (в изотермических условиях). Количество мартенсита возрастает в результате образования все новых и новых кристаллов, а не вследствие роста уже возникших кристаллов. Поэтому у мартенситного превращения есть еще одна точка –  $M_K$  температура окончания мартенситного превращения.

Положение точек  $M_H$  и  $M_K$  не зависит от скорости охлаждения и обусловлено химическим составом аустенита. Чем больше в аустените углерода, тем ниже температура этих точек. Все легирующие элементы, растворенные в аустените, за исключением кобальта и алюминия, понижают точки  $M_H$  и  $M_K$ . В закаленных сталях, имеющих точку  $M_K$  ниже  $20^{\circ}\text{C}$ , а именно в углеродистых сталях, содержащих более 0,4-0,5 % углерода, присутствует остаточный аустенит. Его количество тем больше, чем ниже температуры точек  $M_H$  и  $M_K$ , т.е. чем выше содержание в аустените углерода и легирующих элементов за исключением  $\text{Co}$  и  $\text{Al}$ .

Мартенсит обладает высокой твердостью и прочностью. Причем твердость возрастает с увеличением содержания в нем углерода. Временное сопротивление низкоуглеродистого мартенсита (0,025 %  $\text{C}$ ) составляет 1000 МПа, а при 0,6-0,8 %  $\text{C}$  – достигает 2600-2700 МПа. Однако с повышением в мартенсите содержания углерода, возрастает его склонность к хрупкому разрушению. Мартенсит, содержащий свыше 0,35-0,4 %  $\text{C}$ , обладает пониженным сопротивлением зарождению трещины и особенно низким значением вязкости разрушения  $K_{1C}$ .

Повышенная твердость и прочность мартенсита обусловлена пересыщением твердого раствора на основе  $\alpha\text{-Fe}$  углеродом, повышенной плотностью дислокаций ( $10^{10}$ - $10^{12}\text{см}^{-2}$ ), наличием атмосфер из атомов углерода на дислокациях, большому числу различного рода границ и субграниц, затрудняющих движение дислокаций. Мартенсит по сравнению с другими структурными составляющими ста-

ли и, особенно, аустенитом имеет наибольший удельный объем – при 0,2-1,4 % С составляет 0,12227-0,12528 см<sup>3</sup>/г. Увеличение удельного объема при образовании мартенсита является одной из основных причин возникновения при закалке больших внутренних напряжений, вызывающих деформацию изделий и образование трещин.

При изотермической выдержке в интервале температур от изгиба С-кривой (550<sup>0</sup>С) до точки M<sub>H</sub> образуется бейнит, а превращение называется бейнитным или промежуточным. **Бейнит** представляет собой структуру, состоящую из α-твердого раствора, претерпевшего мартенситное превращение и несколько пересыщенного углеродом, и частиц карбидов. Различают структуру верхнего и нижнего бейнита. Верхний бейнит образуется в области температур 550-350<sup>0</sup>С, имеет «перистый» вид (типа резаной соломы). Частицы карбидов выделяются не в виде пластинок, как в перлите, а в виде изолированных узких частиц. Нижний бейнит образуется при температурах ниже 350<sup>0</sup>С и имеет игольчатое (пластинчатое) строение. Карбиды в нижнем бейните располагаются в пластинках α-фазы.

Механизм бейнитного превращения – сочетает элементы перлитного и мартенситного превращений, диффузионное перераспределение углерода в аустените и мартенситное бездиффузионное превращение. При температурах бейнитного превращения самодиффузия железа и легирующих элементов практически невозможна, а диффузия углерода еще достаточно высока. Вначале бейнитного превращения происходит диффузионное перераспределение углерод выделение частиц карбидов, а в обедненных областях – мартенситное превращение. Бейнитное превращение также имеет точки начала и конца превращения. Нераспавшийся при изотермической выдержке аустенит может претерпеть мартенситное превращение или сохраниться.

Для легированных сталей изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита имеет два минимума устойчивости аустенита: один соответствует диффузионному перлитному превращению, другой – промежуточному бейнитному. (рис. 58)

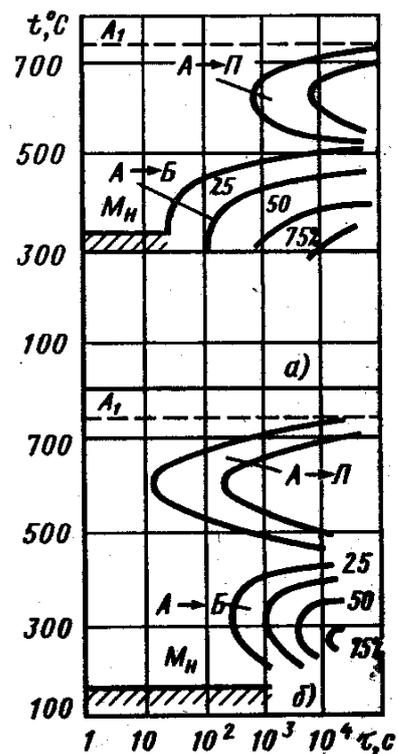


Рисунок 58 – Диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита в легированной стали

В состав аустенита кроме углерода входят карбидообразующие элементы. Перлитное превращение в них сводится к полиморфному  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращению и диффузионному перераспределению углерода и легирующих элементов, в результате которого происходит образование легированного феррита и легированного цементита, т.е. перлита. Особенность промежуточного бейнитного превращения в легированных сталях – оно не идет до конца. Часть аустенита, обогащенного углеродом, при изотермической выдержке не распадается и при последующем охлаждении лишь частично превращается в мартенсит или вообще не претерпевает этого превращения.

Все легирующие элементы (за исключением кобальта) увеличивают устойчивость переохлажденного аустенита в области перлитного и бейнитного превращений и сдвигают вправо в сторону большего времени выдержки кривые начала и конца распада.

Чем больше скорость охлаждения и ниже температура распада аустенита, тем дисперснее образующаяся ферритно-цементитная структура (рис. 59). При небольшой скорости охлаждения  $V_1$  образуется перлит, при большей  $V_2$  – сорбит, при  $V_3$  – троостит. Бейнит при непрерывном охлаждении углеродистой стали обычно не образуется. При достаточно больших скоростях охлаждения  $V_4$  образуется троостит и мартенсит, либо как при  $V_5$  диффузионный распад аустенита совсем становится невозможным, происходит мартенситное

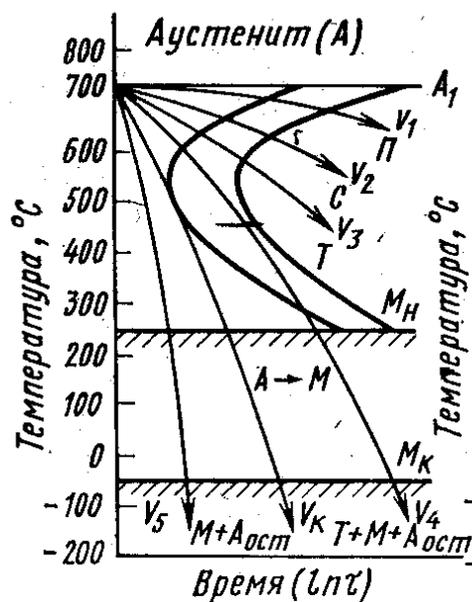


Рисунок 59 – Наложение кривых охлаждения на диаграмму изотермического распада аустенита

превращение. При непрерывном охлаждении всегда в структуре стали наряду с мартенситом присутствует остаточный аустенит.

Минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до точки  $M_N$  и превращается в мартенсит, называется критической скоростью закалки. Критическая скорость закалки неодинакова для разных сталей и зависит от устойчивости аустенита, определяемой его составом. Чем больше устойчивость, тем меньше критическая скорость закалки. Наименьшей критической скоростью закалки обладает эвтектоидная сталь. Чем крупнее зерно аустенита и чем больше его однородность, тем выше устойчивость переохлажденного аустенита и меньше критическая скорость закалки. Легирующие элементы повышают устойчивость аустенита и уменьшают критическую скорость закалки. Особенно заметно уменьшают критическую скорость закалки марганец и никель. Только кобальт повышает критическую скорость закалки.

Термическая обработка, заключающаяся в нагреве закаленной стали до температуры ниже точки  $A_{C1}$ , называют **отпуском**. Структура закаленной стали –

мартенсит и остаточный аустенит – является неравновесной. Переход в равновесное состояние при отпуске происходит путем распада мартенсита и остаточного аустенита. Распад идет по диффузионному механизму, поэтому скорость процесса обусловлена в основном температурой нагрева. В первую очередь начинает **распадаться мартенсит – первое превращение при отпуске**. При этом образуется отпущенный мартенсит с меньшим содержанием углерода по сравнению с мартенситом после закалки и очень мелкие частицы  $\epsilon$ -карбида.

**Второе превращение при отпуске** – превращение остаточного аустенита. Механизм распада близок механизму бейнитного превращения переохлажденного аустенита. В результате образуются обедненный углеродом мартенсит и карбиды. Большинство легирующих элементов увеличивает количество остаточного аустенита и повышает температурный интервал его распада при отпуске. В некоторых высоколегированных сталях (быстрорежущих) распад остаточного аустенита происходит после отпуска при температуре 500-600<sup>0</sup>С.

**Третье превращение при отпуске** – снятие внутренних напряжений и карбидное превращение. Происходит при температуре 350-400<sup>0</sup>С. При этом превращении образуется цементит  $Fe_2C \rightarrow Fe_3C$ . Изменяются размеры и форма частиц карбидов – они приближаются к сферической, растут в размерах. После отпуска при 350-400<sup>0</sup>С образуется структура – троостит отпуска.

Повышение температуры отпуска до 500<sup>0</sup>С и выше в углеродистых и во многих низко- и среднелегированных сталях не вызывает изменения фазового состава. Меняется микроструктура: происходит коагуляция и сфероидизация карбидов. Отличие от структуры сорбита и троостита, образовавшихся при распаде аустенита – зернистое строение частиц карбидов отпуска. Образование зернистых структур улучшает многие свойства – прочность и пластичность повышаются при одинаковых значениях твердости. Легирующие элементы замедляют процесс коагуляции карбидов. Выделение из твердого раствора специальных карбидов называется дисперсионным упрочнением.

Распад мартенсита при отпуске влияет на все свойства стали. Некоторые легированные стали после отпуска при 250-400 и 500-550<sup>0</sup>С склонны к отпускной хрупкости – резкое снижение ударной вязкости. **Отпускная хрупкость** после отпуска при 25—400<sup>0</sup>С называется необратимой или I рода, присуща практически всем сталям. Повторный отпуск при той же температуре не улучшает вязкости. Устранить хрупкость этого вида удастся нагревом до температуры свыше 400<sup>0</sup>С. При этом снижается твердость. Последующий нагрев при 250-400<sup>0</sup>С не снижает ударную вязкость. Излом стали в состоянии необратимой отпускной хрупкости – блестящий межкристаллитный.

**Обратимая отпускная хрупкость** или хрупкость II рода наблюдается после медленного охлаждения в печи или на воздухе от температур отпуска 500-550<sup>0</sup>С. Это явление характерно только для сталей легированных хромом, никелем, марганцем, фосфором, кремнием. Такая хрупкость связана с диффузией растворенных атомов фосфора и кремния к границе зерна, при этом избыточные фазы не выделяются, снижается работа образования межзеренных трещин, что приводит к развитию отпускной хрупкости. Хром, никель и марганец способствуют диффузионному перераспределению фосфора и кремния к границам зерен, а молибден и вольфрам, наоборот, снижают. Поэтому для уменьшения склонности стали к отпускной хрупкости II рода следует дополнительно легировать ее молибденом и вольфрамом. Обратимая отпускная хрупкость не наблюдается при быстром охлаждении от температуры отпуска. Поэтому она может быть устранена повторным нагревом до температур 600-650<sup>0</sup>С и быстрым охлаждением. При повторном отпуске при 500-550<sup>0</sup>С она может быть вызвана вновь. Отсюда и ее название – обратимая.

**Термическое старение углеродистой стали** - изменение свойств стали, протекающее во времени без заметного изменения микроструктуры, характерно, главным образом, для малоуглеродистых сталей. Протекает в результате изменения растворимости углерода и азота в феррите в зависимости от температуры. После ускоренного охлаждения от 650-700<sup>0</sup>С (например при сварке, охлаждении

тонкого листа после прокатки и т.д.) в низкоуглеродистой стали задерживается выделение третичного цементита и при нормальной температуре фиксируется пересыщенный  $\alpha$ -твердый раствор (феррит). При последующей выдержке стали при комнатной температуре (естественное старение) или при небольшом нагреве (до 50-150<sup>0</sup>С – искусственное старение) происходит образование атмосфер атомов углерода и азота или распад твердого раствора с выделением третичного цементита в виде дисперсных частиц. Из твердого раствора при старении могут выделяться частички нитрида  $Fe_{16}N_2$  или  $Fe_4N$ . В сталях с более высоким содержанием углерода не происходит образование третичного цементита.

**Деформационное (механическое) старение** – процесс, протекающий после пластической деформации, если она проходит при температуре ниже температуры рекристаллизации, особенно при комнатной температуре (20<sup>0</sup>С). При комнатной температуре оно может развиваться в течение нескольких суток, а при температурах 200-350<sup>0</sup>С в течение нескольких минут. Основное упрочнение связано с образованием атмосфер из атомов углерода и азота вокруг скопления дислокаций, что затрудняет движение дислокаций. При нагреве такой деформированной стали возможно образование частиц карбидов и метастабильной нитридной фазы  $Fe_{16}N_2$  или стабильного нитрида  $Fe_4N$ .

В сталях возможно одновременное протекание термического и деформационного старения (термодеформационное). Старение отрицательно сказывается на эксплуатационной долговечности деталей и конструкций: в строительных и мостовых сталях при гибке, монтаже и сварке, при низких атмосферных температурах и т.п.

## 24 Технология термической обработки стали

Все виды термической обработки можно разделить на четыре основные группы (по А. А. Бочвару). **Первая группа** - термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла, который в результате какой-то предшествующей обработки по-

лучил неустойчивое состояние, и приводящая его в более устойчивое состояние - **отжиг I рода**.

**Вторая группа** - нагрев выше температур фазового превращения и охлаждение с малой скоростью, приводит сплав к структурному равновесию - **отжиг II рода**. В отличие от отжига первой группы можно назвать его **фазовой перекристаллизацией**. Отжиг II рода применяют, если в сплавах при нагреве происходит фазовое превращение (аллотропическое превращение, растворение второй фазы и т. д.), тогда нагрев выше некоторой критической температуры вызывает изменение в строении сплава. При последующем охлаждении произойдет обратное превращение. Если охлаждение достаточно медленное, то превращение будет полное и фазовый состав будет соответствовать равновесному состоянию.

**Третья группа**. Если в сплаве при нагреве происходят фазовые изменения, то полнота обратного (при охлаждении) превращения зависит от скорости охлаждения. Теоретически можно себе представить такие условия охлаждения, при которых обратное превращение вовсе не произойдет, и при комнатной температуре в результате быстрого охлаждения зафиксировано состояние сплава, характерное для высоких температур. Такая операция называется **закалкой**. Во многих случаях закалка не фиксирует совсем (или фиксирует не полностью) состояние сплава, устойчивое при высоких температурах. Поэтому предельный случай закалки, когда состояние сплава, характерное для высоких температур, фиксируется, называется **истинной закалкой**, в отличие от закалки в более широком смысле, когда фиксируется не состояние сплава при высокой температуре, а некоторая его стадия структурного превращения (распад), при которой в сплаве не достигнуто еще равновесное состояние.

**Четвертая группа**. Состояние закаленного сплава характеризуется неустойчивостью. Даже без всякого температурного воздействия в сплаве могут происходить процессы, приближающие его к равновесному состоянию. Нагрев сплава, увеличивающий подвижность атомов, способствует этим превращениям. При повышении температуры закаленный сплав все больше приближается к равновес-

ному состоянию. Такая обработка, т. е. нагрев закаленного сплава ниже температуры равновесных фазовых превращений, называется **отпуском**. Отпуск, если он происходит при комнатной температуре или при невысоком нагреве, называют **старением**. При отпуске, как и при отжиге первого рода, сплав приближается к структурному равновесию. В обоих случаях начальную стадию характеризует неустойчивое состояние, только для отжига первого рода оно было результатом предварительной обработки, при которой, однако, не было фазовых превращений, а для отпуска – предшествовавшей закалке. Таким образом, отпуск – вторичная операция, осуществляемая всегда после закалки.

На рис. 60 показаны температурные интервалы разных видов термической обработки для сталей с разным содержанием углерода.

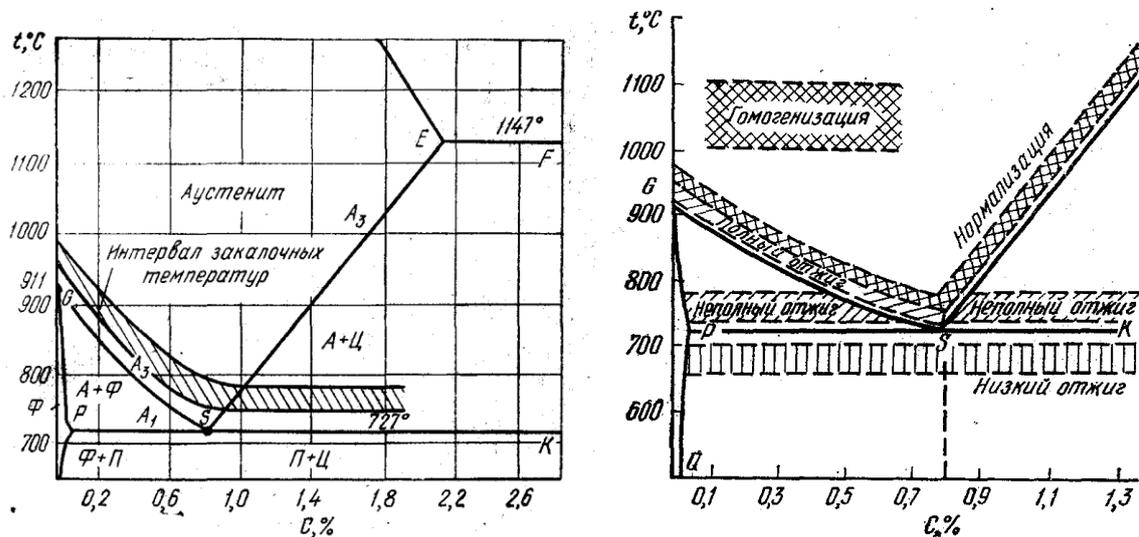


Рисунок 60 – Выбор температуры для разных видов термической обработки

Разновидностью отжига II рода является **нормализация** – нагрев доэвтектоидной стали до температуры, превышающей точку A<sub>с3</sub> на 40-50<sup>0</sup>С, заэвтектоидной стали – выше точки A<sub>ст</sub> на 40-50<sup>0</sup>С, непродолжительная выдержка при этой температуре для прогрева садки и завершения фазовых превращений и охлаждение на воздухе. Происходит полная фазовая перерекристаллизация стали, устраняется крупнозернистая структура после литья или прокатки,ковки,штамповки. Охлаждение на воздухе (можно считать его ускоренным) приводит к распаду

аустенита при более низких температурах с образованием дисперсной ферритно-цементитной структуры.

Существуют специальные виды термической обработки, разработанные для определённых сталей. Например, **патентирование** – применяют для пружинной (канатной) проволоки, после изотермического отжига и полной аустенизации пропускают через расплавленную соль температурой 450-550<sup>0</sup>С; в результате распада аустенита образуется тонкопластинчатый троостит или сорбит, на такой структуре возможны большие обжатия без обрывов при холодном волочении и прочность  $\sigma_B = 2000-2250$  Мпа.

Кроме этих основных видов термической обработки, имеются еще два принципиально отличных способа, представляющих сочетание термической обработки с металлургией или механической технологией.

**Химико-термическая обработка** – нагрев сплава в соответствующих химических реагентах для изменения состава и структуры поверхностных слоев. **Термомеханическая** (термопластическая) **обработка** – деформация и последующая термическая обработка, сохраняющая в той или иной форме результаты наклепа.

## **25 Технология химико-термической обработки**

**Химико-термической обработкой (ХТО)** называют обработку, заключающуюся в сочетании термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя детали в необходимом направлении. При этом происходит поверхностное насыщение металлического материала соответствующим элементом (С, N, В, Al, Cr, Si, Ti и др.) путем его диффузии в атомарном состоянии из внешней среды (твердой, газовой, паровой, жидкой) при высокой температуре.

Химико-термическая обработка по сравнению с поверхностной закалкой, например, высокочастотной, обладает некоторыми особенностями и преимуществами (уступая поверхностной закалке в производительности).

1. Независимость от внешней формы изделия. С одинаковым успехом можно обрабатывать и сложные, и простые по форме изделия, получая по всей поверхности упрочненный слой одинаковой толщины.

2. Большее различие между свойствами сердцевины и поверхности, чем при поверхностной закалке. При химико-термической обработке разница в свойствах определяется различием в строении в составе, а при поверхностной закалке – только различием в строении.

3. Последствия перегрева поверхности могут быть устранены последующей термической обработкой, тогда как при поверхностной закалке перегрев не может быть устранен, так как она является последней операцией.

При ХТО одновременно протекают несколько процессов:

1 – диссоциация – образование в окружающей среде (или в отдельном реакционном объеме) диффундирующего элемента в атомарном (ионизированном) состоянии; концентрация его в насыщающей среде должна быть достаточно высока для протекания химических реакций;

2 – адсорбция атомов (ионов) на поверхность металла с образованием химических связей между ионами насыщающего элемента и основного металла (хемосорбция); может проходить только в том случае, если диффундирующий элемент образует с основным металлом стали или сплава твердый раствор или химическое соединение;

3 – диффузия адсорбированных атомов от поверхности в глубь обрабатываемого металла (изделия). В результате образуется диффузионный слой, на поверхности которого концентрация диффундирующего элемента наибольшая; по мере удаления от поверхности концентрация падает, глубина проникновения ( $y$  на рис. 61) будет представлять собой толщину слоя.

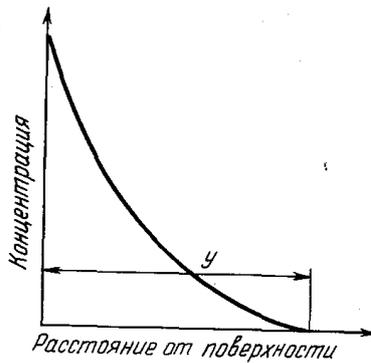


Рисунок 61 – Изменение концентрации диффундирующего элемента по глубине

Если насыщающий элемент В образует с металлом А систему сплавов с ограниченной растворимостью и с химическими соединениями (рис. 62 а), то строение слоя будет определяться изотермическим разрезом диаграммы состояния этой системы при температуре диффузионного насыщения. В этом случае образуется многослойный диффузионный слой, причем на границе раздела слоев концентрация изменяется скачкообразно. Толщина диффузионного слоя зависит от температуры и продолжительности насыщения. (рис. 63).

Толщина диффузионного слоя  $x$  в зависимости от продолжительности процесса  $\tau$  при данной температуре обычно выражается параболической зависимостью. Следовательно, с течением времени скорость увеличения толщины слоя непрерывно уменьшается (рис. 63, а). толщина диффузионного слоя, при прочих равных условиях, тем больше, чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности металла (рис. 63, в).

Концентрация диффундирующего элемента на поверхности зависит от активности окружающей среды, обеспечивающей приток атомов этого элемента к поверхности, скорости диффузионных процессов, приводящих к переходу этих атомов в глубь металла, состава обрабатываемого металла, состава и структуры образующих фаз. Повышение температуры увеличивает скорость процесса диффузии, поэтому толщина диффузионного слоя, образующегося за данный отрезок времени, сильно возрастает с повышением температуры процесса (рис. 63, в).

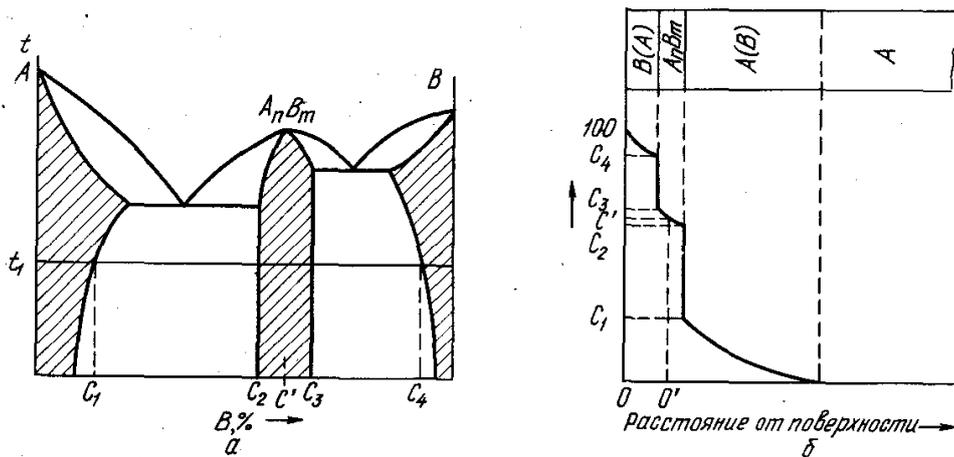


Рисунок 62 – Система сплавов с ограниченной растворимостью и химическими соединениями: а – диаграмма состояния (заштрихованы однофазные области); б – распределение концентрации диффундирующего элемента и строение диффузионного слоя

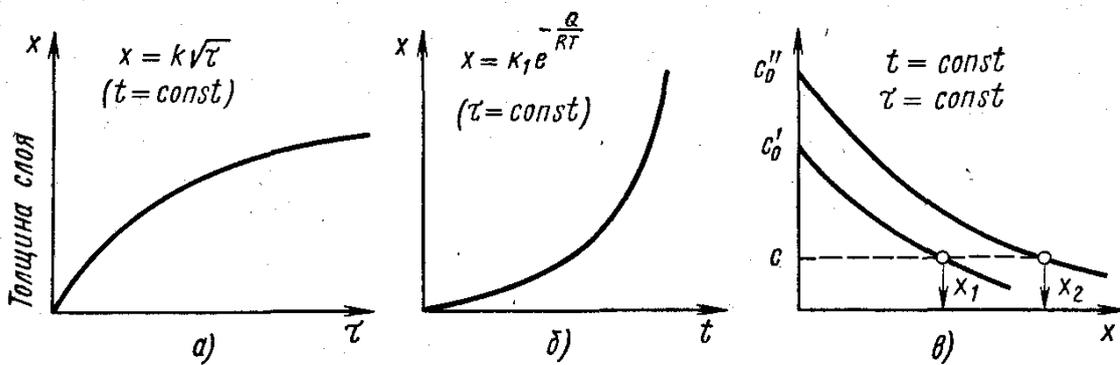


Рисунок 63 – Зависимость толщины диффузионного слоя от продолжительности насыщения (а), температуры (б) и изменение концентрации по толщине диффузионного слоя (в)

Толщина диффузионного слоя зависит также от концентрации диффундирующего элемента (активности насыщающей среды) и типа образующегося твердого раствора или химического соединения. Чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности сплава, тем больше толщина диффузионного слоя при данной температуре и длительности ХТО.

Диффузия элементов легче протекает в ОЦК решетке, чем в ГЦК, т.е. при насыщении  $\alpha$ -железа образуются слои большей толщины, чем при ХТО  $\gamma$ -железа при одинаковых режимах ХТО. Скорость диффузии атомов при образовании твердых растворов внедрения значительно выше, чем при образовании твердых растворов замещения. Поэтому при одной температуре и длительности выдержки толщина диффузионного слоя в случае образования твердого раствора внедрения будет больше (цементация и азотирование), чем в случае образования твердых растворов замещения (хромирование, алитирование, силицирование).

В промышленности применяют множество способов химико-термической обработки, различающихся диффундирующими элементами, типом и составом внешней среды, химизмом процессов в ней, техникой исполнения и другими признаками. В зависимости от агрегатного состояния внешней среды, в которую помещают обрабатываемое изделие, различают химико-термическую обработку в твердой, жидкой и газовой средах.

При химико-термической обработке в жидкой среде атомы элемента, диффундирующего в изделие, образуются в результате химических реакций в расплавленной соли (например, в NaCN при цианировании стали) или поступают непосредственно из расплавленного металла (например, из расплава алюминия при диффузионном алюминировании стали).

При химико-термической обработке в газовой среде диффундирующий элемент образуется в результате реакций диссоциации ( $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ ), диспропорционирования ( $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ ), обмена ( $\text{CrCl}_2 + \text{Fe} \rightarrow \text{Cr} + \text{FeCl}_2$ ) и восстановления ( $\text{VC1}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{V} + 2\text{HC1}$ ).

Газовая среда и активная газовая фаза, образующаяся при нагреве изделий в твердой среде, в промышленных процессах служат самыми распространенными поставщиками атомов элементов, которыми обогащаются поверхностные слои изделия.

Для химико-термической обработки наиболее удобна чисто газовая среда: ее состав легко регулировать, она быстро прогревается до заданной температуры,

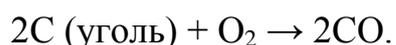
позволяет полностью механизировать и автоматизировать процесс химико-термической обработки и сразу проводить закалку (без повторного нагрева).

По характеру изменения химического состава обрабатываемого изделия все разновидности химико-термической обработки можно разделить на три группы: диффузионное насыщение неметаллами, диффузионное насыщение металлами и диффузионное удаление элементов. Эти группы включают разнообразные промышленные процессы химико-термической обработки (табл. 5).

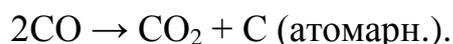
**Цементация** - насыщение поверхности стали углеродом. Цементации подвергают изделия из сталей с низким содержанием углерода (обычно до 0,25%).

При цементации происходит поверхностное насыщение стали углеродом, в результате чего получается высокоуглеродистый поверхностный слой. Так как для цементации берут низкоуглеродистую сталь, то сердцевина остается мягкой и вязкой, несмотря на то что после цементации сталь подвергается закалке.

Различают два вида цементации: твердую и газовую. При цементации в твердом карбюризаторе изделия укладывают в ящики, куда засыпают древесный уголь, смешанный с 20 – 25%  $\text{BaCO}_3$ . При нагреве углерод древесного угля, соединяясь с кислородом воздуха, находящегося в цементационном ящике между частицами карбюризатора, образует окись углерода:



В контакте с железом окись углерода дает атомарный углерод:



Атомарный (активный) углерод поглощается аустенитом и диффундирует в глубь изделия. Добавка  $\text{BaCO}_3$  сильно интенсифицирует процесс цементации, поставляя дополнительное количество окиси углерода и соответственно активного углерода:



Для газовой цементации в качестве карбюризатора используют природный газ (состоит в основном из  $\text{CH}_4$ ), контролируемые атмосферы, получаемые в специальных генераторах, а также жидкие углеводороды (керосин, бензол и др.),

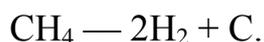
каплями подаваемые в герметичное рабочее пространство печи, где они образуют активную газовую фазу.

Таблица 5 – Разновидности химико-термической обработки

Диффузионное насыщение неметаллами	Диффузионное насыщение металлами	Диффузионное удаление элементов
Науглероживание (цементация) Азотирование Цианирование Нитроцементация Борирование Силицирование Сульфидирование Сульфоцианирование Насыщение кислородом * Внутреннее окисление *	Алитирование Хромирование диффузионное Хромоалитирование Цинкование диффузионное Меднение диффузионное Титанирование Бериллизация Ванадирование	Обезводороживание Обескислороживание Обезуглероживание Комплексное удаление примесей

\*Насыщение кислородом – поверхностное, а внутреннее окисление – это насыщение всего объема изделия кислородом с целью образования дисперсных окислов.

Основной поставщик углерода в газообразных карбюризаторах – метан:



В искусственно полученной контролируемой атмосфере таким поставщиком является окись углерода.

В зависимости от состава газовой смеси и состава стали атмосфера в печи может быть науглероживающей, обезуглероживающей и нейтральной. В последнем случае концентрация углерода в стали является равновесной для данного со-

става газовой смеси, и такую концентрацию (а более строго – соответствующую термодинамическую активность углерода) называют *углеродным потенциалом* данной атмосферы. Если концентрация углерода в стали ниже той, которая соответствует равновесию с атмосферой, то будет происходить науглероживание.

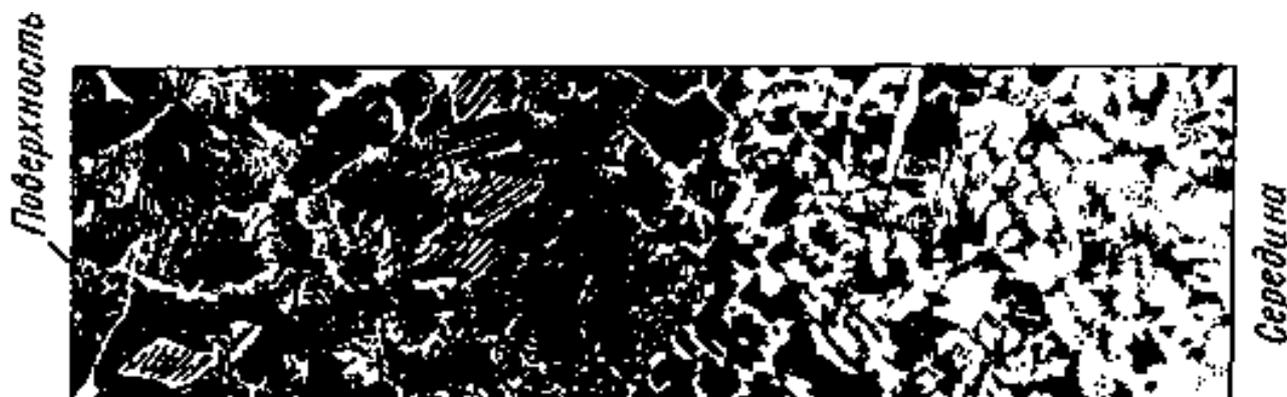
Газовая цементация – основной процесс при массовом производстве, а цементацию в твердом карбюризаторе используют в мелкосерийном производстве. Глубина цементации в зависимости от назначения изделия и состава стали обычно находится в пределах 0,5–2,0 мм. Цементацию проводят при 910–930°C, а иногда для ускорения – при 1000–1050°C. С повышением температуры уменьшается время достижения заданной глубины цементации. Так, при газовой цементации науглероженный слой толщиной 1,0–1,3 мм получают при 920°C за 15 ч, а при 1000°C – за 8 ч. Чтобы предотвратить сильный перегрев (рост аустенитного зерна), высокотемпературной цементации подвергают наследственно мелкозернистые стали.

Концентрация углерода в поверхностном слое изделия обычно составляет 0,8–1,0% и не достигает предела растворимости при температуре цементации. Следовательно, сетка Fe<sub>3</sub>C при температуре цементации не образуется, и поверхностный слой, как и сердцевина, находится в аустенитном состоянии. После медленного охлаждения цементованный слой с переменной концентрацией углерода состоит из феррита и цементита и характеризуется гаммой структур, типичных для заэвтектоидной, эвтектоидной и доэвтектоидной стали (рис. 64).

Цементация является промежуточной операцией, цель которой – обогащение поверхностного слоя углеродом. Требуемое упрочнение поверхностного слоя изделия достигается закалкой после цементации. Закалка должна не только упрочнить поверхностный слой, но и исправить структуру перегрева, возникающую из-за многочасовой выдержки стали при температуре цементации.

После цементации в твердом карбюризаторе ответственные изделия подвергают двойной закалке (рис. 65), так как содержание углерода в сердцевине и на

поверхности изделия разное, а оптимальная температура нагрева под закалку зависит от содержания углерода в стали.



Цементит + перлит

Перлит

Перлит + феррит

Рисунок 64 – Микроструктура цементированного поверхностного слоя малоуглеродистой конструкционной стали

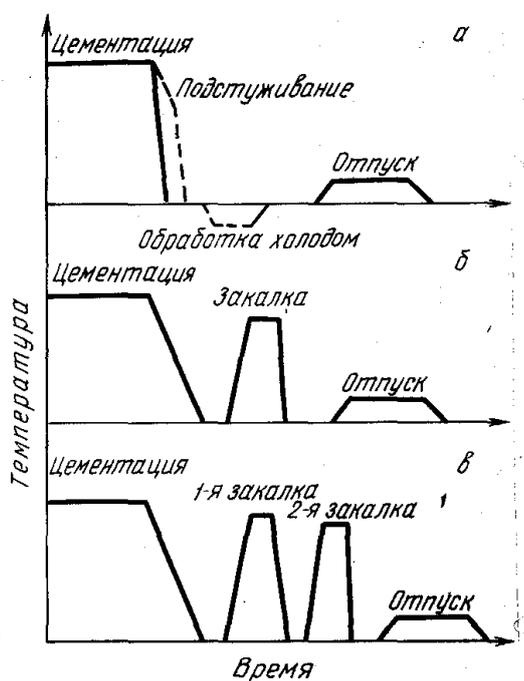


Рисунок 65 – Режимы термической обработки цементированных деталей

Первую закалку проводят с нагревом до 850–900°C (выше точки  $A_3$  сердцевины изделия), чтобы произошла полная перекристаллизация с измельчением

аустенитного зерна в доэвтектоидной стали. В углеродистой стали из-за малой глубины прокаливаемости сердцевина изделия после первой закалки состоит из феррита и перлита. Вместо первой закалки к углеродистой стали можно применять нормализацию. В прокаливающейся насквозь легированной стали сердцевина изделия состоит из низкоуглеродистого мартенсита. Такая структура обеспечивает повышенную прочность и достаточную вязкость сердцевины.

После первой закалки цементованный слой оказывается перегретым и содержащим повышенное количество остаточного аустенита. Поэтому применяют вторую закалку с температуры 760–780°C, оптимальной для заэвтектоидных сталей. После второй закалки поверхностный слой состоит из мелкоигльчатого высокоуглеродистого мартенсита и глобулярных включений вторичного карбида.

При газовой цементации чаще всего применяют одну закалку с цементационного нагрева после подстуживания изделия до температуры 840–860°C. После закалки цементованные изделия всегда нагревают до 160–180°C для уменьшения закалочных напряжений.

Цементацию широко применяют в машиностроении для повышения твердости и износостойкости изделий с сохранением высокой вязкости их сердцевины. Удельный объем закаленного науглероженного слоя больше, чем сердцевины, и поэтому в нем возникают значительные сжимающие напряжения. Остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое, достигающие 40–50 кгс/мм<sup>2</sup>, повышают предел выносливости изделия. Низкое содержание углерода (0,08–0,25%) обеспечивает высокую вязкость сердцевины. Цементации подвергают качественные стали 08, 10, 15 и 20 и легированные стали 12ХНЗА, 18ХГТ и др. Основное назначение легирования здесь – повышение прокаливаемости и соответственно механических свойств сердцевины изделий из цементуемой стали.

**Азотированием** называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при нагреве ее в аммиаке. Азотирование повышает твердость поверхностного слоя, его износостойкость, предел выносливости и сопротивление коррозии в таких средах, как атмосфера, вода, пар и т.д. Твердость азо-

тированного слоя заметно выше, чем цементованной стали, и сохраняется при нагреве до высоких температур (550–600°C); тогда как твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до 200–225°C.

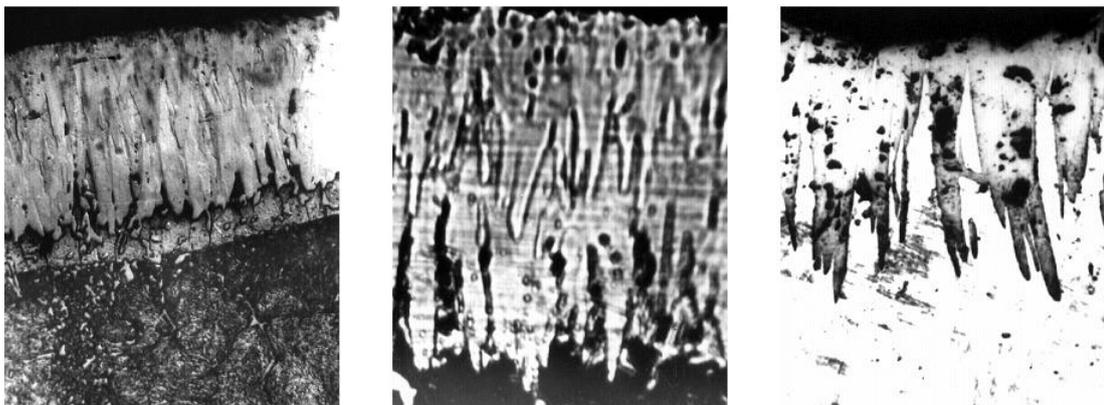
Азотирование с целью повысить твердость и износостойкость применяют к деталям из сталей типа 38ХМЮА. Перед азотированием изделие подвергают закалке и высокому отпуску для повышения прочности и вязкости сердцевины. Азотирование проводят при 500–520°C. Из-за низкой температуры и, следовательно, низкой подвижности атомов азота процесс длительный (24–90 ч). Толщина азотированного слоя составляет 0,3–0,6 мм. Можно сократить продолжительность азотирования, повышая температуру, но при этом сильно падает твердость из-за коагуляции нитридов легирующих элементов. Длительный процесс азотирования для повышения твердости и износостойкости целесообразно применять только к изделиям ответственного назначения.

Для повышения коррозионной стойкости азотируют детали из разных сталей (главным образом, из углеродистых). Так как большая твердость здесь не требуется, то температуру процесса выбирают высокой (600–700°C); продолжительность такого процесса 15 мин – 10 ч. Некоторое применение нашло азотирование деталей из высокопрочных чугунов и титановых сплавов.

Азотирование титановых сплавов – один из немногих примеров промышленного использования химико-термической обработки сплавов цветных металлов. После азотирования повышается износостойкость и уменьшается схватывание деталей при работе в условиях трения.

**Борирование** – насыщение поверхности металлов и сплавов бором с целью повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости. Борированию подвергают стали перлитного, ферритного и аустенитного классов, тугоплавкие металлы и никелевые сплавы. При борировании железа упрочненный слой состоит из ромбического борида FeB и тетрагонального борида Fe<sub>2</sub>B, образующих столбчатые кристаллы. Под слоем боридов располагается переходный слой из

твердого раствора бора в  $\alpha$ -железе. При нагреве бориды устойчивы:  $\text{FeB}$  – до  $800^\circ\text{C}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$  – до  $1000^\circ\text{C}$  (рис. 66).

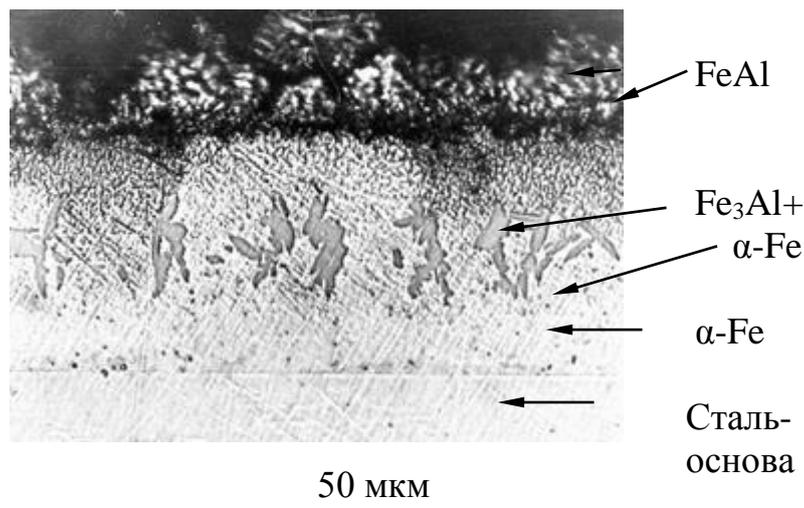


*Рисунок 66 – Микроструктура боридных покрытий при насыщении в порошковых смесях на основе карбида бора (а), алюмотермических (б) и магнийтермических (в) смесей*

Борированные стали обладают высокой коррозионной стойкостью в водных растворах соляной, серной и фосфорной кислот, причем при одинаковой толщине слоя однофазные боридные слои имеют большую кислотостойкость, чем двухфазные. В азотной кислоте боридные слои неустойчивы, однако скорость разрушения борированных сталей в 1,5–5 раз ниже, чем неборированных. Борированные слои на углеродистых сталях устойчивы к воздействию кипящих водных растворов  $\text{NaOH}$  и  $\text{KOH}$ , а также расплавов цинка, свинца, олова, кадмия. Применяется, в основном, для гибочных и формовочных штампов, деталей пресс-форм и машин для литья под давлением.

**Алитирование** – процесс диффузионного насыщения поверхности изделий алюминием с целью повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости. При алитировании железа и сталей наблюдается плавное падение концентрации алюминия по толщине слоя. В зависимости от метода и режима насыщения она может достигать до 58% (по массе) на поверхности и соответствовать образованию фазового слоя  $\text{FeAl}_3$  (рис. 67). В результате алитирования сталь

приобретает высокую окалинстойкость (до 850–900°C), так как в процессе нагрева поверхности алитированных изделий образуется плотная пленка оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), предохраняющая металл от окисления. Алитированный слой обладает также хорошим сопротивлением коррозии в атмосфере и морской воде. Толщина алитированного слоя достигает 0,2—1,0 мм, твердость (на поверхности) – до HV 500, износостойкость низкая. Алитированию подвергают различные изделия, работающие при высоких температурах.



*Рисунок 67 - Микроструктура алюминидного покрытия на конструкционной стали 15Х*

Алитируют также литые лопатки газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов. Наибольшее распространение получило алитирование стальных изделий в порошках с насыщением из газовой фазы. Порошкообразная смесь состоит из ферроалюминия, хлористого аммония и окиси алюминия. В присутствии  $NH_4Cl$  образуется газообразный хлорид алюминия  $AlCl_3$ , являющийся поставщиком активных атомов алюминия. Окись алюминия предотвращает спекание частиц ферроалюминия. Алитирование проводят при 950–1050°C в течение 3–12 ч.

## 26 Классификация и маркировка сталей

В основу классификации сталей заложены их химический состав, структура, назначение, технологическая обрабатываемость, качество. По химическому составу стали подразделяют на углеродистые и легированные. Классификация по структуре - доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные, феррито-перлитная, аустенитная, мартенситная. По назначению - конструкционные, машиностроительные и инструментальные.

**Углеродистые стали.** По составу углеродистые стали в зависимости от содержания углерода делятся на три группы: 1) *низкоуглеродистые*— с содержанием углерода до 0,3 %; 2) *среднеуглеродистые* — до 0,7% углерода; 3) *высокоуглеродистые*— больше 0,7 % углерода.

По качеству стали классифицируют на *обыкновенные, качественные и высококачественные*, в зависимости от содержания примесей.

Если содержание серы находится в пределах 0,04— 0,06 %, а фосфора от 0,04 до 0,08 %, то стали относят к **обыкновенному качеству и маркируются буквами Ст**. Если же содержание серы и фосфора меньше и находится в пределах 0,03—0,04 %, то такие стали относят к **качественным**. Углеродистые качественные конструкционные стали маркируются двумя цифрами, которые указывают содержание кислорода в сотых долях процента.

При содержании примесей в пределах, как правило, меньших 0,03 %, полагают, что стали обладают **высоким качеством**. Для обозначения их высокого качества используют букву *A* при маркировке углеродистых и большинства легированных сталей, ее ставят в конце обозначения марки. Под качеством стали понимают совокупность свойств, зависящих от способа ее производства. В зависимости от требований, предъявляемых к составу и свойствам стали, углеродистые стали делятся на ряд групп.

Сталь обыкновенного качества поставляется потребителям в соответствии с ГОСТ 380—71 и ее подразделяют на три группы: к группе А — относят стали с

гарантируемыми механическими свойствами (поставляемая сталь не подвергается термической обработке); к группе *Б* - стали гарантированного состава (они подвергаются горячей обработке у потребителя); к группе *В*— стали с гарантированными составами и механическими свойствами (для сварных конструкций).

Для сталей группы *А* (Ст1 - Ст6) требования к механическим свойствам изменяются в определенном интервале ( $\sigma_{0,2}$  от 200 до 300 МПа;  $\sigma_B$  —от 310—410 до 500—600 МПа, а  $\delta$  от 22 до 14 %, соответственно). Прочность стали тем выше, а пластичность стали тем ниже, чем больше номер ее подгруппы. Так сталь Ст6 прочнее стали Ст3. Аналогичные цифры указываются и для сталей группы *Б* и *В* (например БСт3). Но букву *А* в маркировке стали обыкновенного качества не указывают, так как ее используют для маркировки так называемых автоматных сталей, обрабатываемых на станках автоматах.

По характеру раскисления стали делят на **спокойные, полуспокойные и кипящие**. Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают без газовыделения (спокойно). Кипящие стали раскисляют только марганцем, содержание кислорода в них повышенное. Взаимодействуя с углеродом, кислород образует пузыри СО, которые при выделении в процессе кристаллизации создают впечатление кипения. Полуспокойные стали раскисляют марганцем и кремнием, по своему поведению они занимают промежуточное положение между кипящими и спокойными.

Для облегчения понимания правил маркировки углеродистых сталей приведем конкретные примеры. Сталь марки **ВСтЗпс** означает, что эта конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества, третьей категории, поставляемая по химическому составу и свойствам, полуспокойная. Маркировка же **08кп** означает, что это - качественная конструкционная углеродистая сталь, содержащая 0,08 % С, кипящая. Марка **40А**, означает, что сталь содержит около 0,40 % С и относится к сталям высокого качества.

**Углеродистые инструментальные стали** содержат 0,7 – 2,3 % углерода. Они маркируются буквой **У** и цифрой, показывающих содержание углерода в де-

сятых долях процента ( У7, У8, У9,....У13). Буква *A* в конце марки показывает, что сталь высококачественная (У7А, У8А,....У13А). Твердость качественных и высококачественных сталей одинакова, но высококачественные стали менее хрупки, лучше противостоят ударным нагрузкам, дают при закалке меньше брака. Высококачественная сталь выплавляется в электрических печах, а качественная – в мартеновских и кислородных конвертерах.

Предварительная термообработка углеродистых инструментальных сталей - отжиг на зернистый перлит, окончательная - закалка в воде или растворе соли и низкий отпуск. После этого структура стали представляет собой мартенсит с включениями зернистого цементита. Твердость после термообработки в зависимости от марки лежит в интервале HRC 56-64.

Для углеродистых инструментальных сталей характерны низкая теплостойкость (до 200 °С) и низкая прокаливаемость (до 10-12 мм). Однако вязкая незакаленная сердцевина повышает устойчивость инструмента против поломок при вибрациях и ударах. Кроме того, эти стали достаточно дешевы и в незакаленном состоянии сами хорошо обрабатываются.

**Области применения инструментальных углеродистых сталей различных марок.** Стали У7, У7А — для инструментов и изделий, подвергающихся толчкам и ударам и требующих высокой вязкости при умеренной твердости (зубила, слесарные и кузнечные молотки, штампы, клейма, масштабные линейки, инструменты по дереву, центры токарных станков и т. д.).

Стали У8, У8А - для инструментов и изделий, требующих повышенной твердости и достаточной вязкости (зубила, кернеры, матрицы, пуансоны, ножницы по металлу, отвертки, столярный инструмент, буры средней твердости).

Стали У9, У9А - для инструментов, требующих высокой твердости при наличии некоторой вязкости (кернеры, штемпели, зубила по каменным породам и столярный инструмент).

Стали У10, У10А - для инструментов, не подвергающихся сильным толчкам и ударам, требующих высокой твердости при незначительной вязкости (строгаль-

ные резцы, фрезы, метчики, развертки, плашки, буры по каменным породам, ножовочные полотна, зубила для насечки напильников, волочильные кольца, калибры, напильники, гребенки).

Стали У11, УНА, У12, У12А — для инструментов, требующих высокой твердости (напильники, фрезы, сверла, бритвы, плашки, часовой инструмент, хирургический инструмент, пилы по металлу, метчики).

Стали У13, У13А - для инструментов, которые должны иметь исключительно высокую твердость (бритвы, шаберы, волочильный инструмент, сверла, зубила для насечки напильников).

Стали У8 - У12 применяются также для измерительного инструмента.

**При маркировке легированных сталей используют буквы русского алфавита для обозначения легирующего элемента:**

А – азот	П – фосфор	Б – ниобий
Р – бор	В – вольфрам	Т – титан
Г – марганец	У – углерод	Д – медь
Ф – ванадий	Е – селен	Х – хром
К – кобальт	Ц – цирконий	М – молибден
Ю – алюминий		

Цифры с левой стороны букв обозначают среднее содержание углерода: если две цифры, то в сотых долях процента, если одна, то в десятых. Если цифра отсутствует, то это значит, содержание углерода в стали составляет около 1%.

Цифры после букв (справа) обозначают содержание легирующего элемента, выраженное в целых процентах. Если содержание легирующего элемента 1-1,5 % и менее, то цифра после буквы не ставится. Например, 60С2 содержит 0,6 % С и 2,0 % кремния, 7Х3 содержит 0,7 % С и 3 % хрома.

Буква «А» в конце обозначения марки – высококачественная сталь. Пример Все инструментальные легированные и с особыми свойствами стали всегда высококачественные, и буква А в их маркировке не ставится. «Ш» в конце – особовысококачественная сталь, 30ХГСА-Ш.

Буква «А», обозначающая легирование азотом, всегда стоит в середине маркировки. 16Г2АФ – 0,015 – 0,025 % азота.

В маркировке сталей **в начале** иногда ставят буквы, указывающие на их применение:

**А** – автоматные стали (А20 содержит 0,15-0,20 % С)

**АС** – автоматная легированная свинцом (АС35Г2 содержит 0,35 % С, 2 % марганца и свинец менее 1%)

**Р** – быстрорежущие стали (Р18 содержит 17,5-19 % вольфрама)

**Ш** – шарикоподшипниковые стали (ШХ15 содержит 1,3-1,65 % хрома)

**Э** – электротехнические стали (Э11 содержит 0,8-1,8 % кремния).

Нестандартные стали часто маркируют условно. Например стали, выплавленные на заводе «Электросталь» обозначают буквой Э, рядом ставят букву **И** – исследовательская или **П** – пробная. После буквы ставят порядковый номер (ЭИ69 или ЭИ868, ЭП590). Стали, выплавленные на Златоустовском металлургическом заводе, обозначают **ЗИ**, на заводе «Днепроспецсталь» - **ДИ**.

**Машиностроительные цементируемые и азотируемые стали.** Цементацию (азотирование) широко применяют для упрочнения средне размерных зубчатых колес, валов коробки передач автомобилей, валов быстроходных станков, шпинделей и др. Для деталей обычно используют низкоуглеродистые (0,15--0,25 % С) стали. Содержание легирующих элементов в этих сталях не должно быть слишком высоким, но должно обеспечивать требуемую прокаливаемость поверхностного слоя и сердцевины. После цементации, закалки и низкого отпуска цементованный слой должен иметь твердость 58-62 HRC, а сердцевина 30-42 HRC. Сердцевина должна обладать высокими механическими свойствами, особенно повышенным пределом текучести, должна быть наследственно мелкозернистой. Для измельчения размера зерна цементируемые стали микролегируют ванадием, титаном, ниобием, цирконием, алюминием и азотом, образующими мелкодисперсные нитриды и карбонитриды, или карбиды, задерживающие рост зерна аустенита.

Цементируемые стали - 20Х, 18ХГТ, 20ХГР, 25ХГМ, 12ХНЗА и др.

**Машиностроительные улучшаемые стали** называются улучшаемыми потому, что подвергаются термической обработке, заключающейся в закалке и отпуске при высоких температурах – **улучшению**. Это среднеуглеродистые стали (0,3-0,5 % С). Они должны иметь высокую прочность, пластичность, высокий предел выносливости, малую чувствительность к отпускной хрупкости, должны хорошо прокаливаться. Применяются для изготовления коленчатых валов, валы, оси, штоки, шатуны, ответственные детали турбин и компрессорных машин.

Марки – 35, 45, 40Х, 45Х, 40ХР, 40ХН, 40ХН2МА и др.

**Рессорно-пружинные стали** – марки 70, 65Г, 60С2, 50ХГ, 50ХФА, 65С2Н2А, 70С2ХА и др. Эти стали относятся к классу конструкционных.

Эти стали должны иметь особые свойства в связи с условиями работы пружин и рессор, которые служат для смягчения толчков и ударов. Основное требование – высокий предел упругости и выносливости. Этим условиям удовлетворяют углеродистые стали и стали, легированные элементами, повышающими предел упругости (кремний, марганец, хром, ванадий и вольфрам). Особенностью термической обработки рессорных листов и пружин является проведение после закалки отпуска при температуре 400-500<sup>0</sup>С. Такая обработка позволяет получать наиболее высокий предел упругости.

**Шарикоподшипниковые стали** – ШХ15 (0,95 –1,05 % С и 1,3-1,65 % хрома). Заэвтектоидное содержание углерода и хром обеспечивают получение после закалки высокой равномерной твердости, устойчивой после истирания, необходимой прокаливаемости и достаточной вязкости. Термическая обработка включает отжиг, закалку и отпуск. Отжиг снижает твердость и позволяет получать мелкозернистый перлит. Закалка проводится при 830-860<sup>0</sup>С, охлаждение в масле, отпуск 150-160<sup>0</sup>С. Твердость HRC 62-65, структура – бесструктурный мартенсит с равномерно распределенными мелкими карбидами.

Для изготовления деталей крупногабаритных подшипников (диаметром более 400 мм), работающих в тяжелых условиях при больших ударных нагрузках,

применяют цементуемую сталь 20Х2Н4А (температура цементации 930-950<sup>0</sup>С в течение 50-170 ч, толщина слоя 5-10 мм).

**Износоустойчивые стали** – 110Г13Л (0,9-1,3 % С, 11,5-14,5 % марганца). Литая аустенитная сталь, после литья состоит из аустенита и избыточных карбидов (Fe,Mn)<sub>3</sub>С, выделяющихся по границам зерен, что снижает прочность и вязкость стали. Поэтому литые изделия закаливают от 1100<sup>0</sup>С в воде. При этом карбиды растворяются и структура становится стабильной аустенитной. Сталь имеет высокую прочность и сравнительно малую твердость. В процессе работы при ударных нагрузках происходит упрочнение (наклеп) поверхности стали при пластической деформации, в результате в поверхностном слое образуется мартенсит. Именно он обеспечивает высокую износостойкость. По мере износа внешнего слоя, мартенсит образуется в следующих слоях. Применяют для трамвайных стрелок, щек камнедробилок, козырьков ковшей, черпаков и т.д.

При циклическом контактно-ударном нагружении и ударно-абразивном изнашивании применяют сталь 60Х5Г10Л, претерпевающую при эксплуатации мартенситное превращение.

Лопастей гидротурбин и гидронасосов, судовых гребневых винтов, работающих в условиях изнашивания при кавитационной эрозии, изготавливают из сталей с нестабильным аустенитом 30Х10Г10 и 0Х14АГ12, испытывающих при эксплуатации частичное мартенситное превращение.

**Коррозионно-стойкие (нержавеющие), жаростойкие (окалиностойкие) и жаропрочные стали.** Коррозией называется разрушение металлов и сплавов под действием окружающей среды. В результате механические свойства сталей резко ухудшаются. Различают химическую и электрохимическую коррозию. Химическая развивается при воздействии газов (газовая коррозия) и не электролитов (нефть и ее производные). Электрохимическая вызывается действием электролитов (кислот, щелочей и солей, атмосферная и почвенная коррозия).

Сталь, устойчивую к газовой коррозии при высоких температурах (выше 550<sup>0</sup>С), называют **окалиностойкой или жаростойкой**.

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали – это стали, устойчивые к электрохимической, химической (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной, солевой) коррозии. Повышенная стойкость к коррозии достигается введением в сталь элементов, образующих на поверхности защитные пленки, прочно связанные с поверхностью и повышающие электрохимический потенциал стали в разных агрессивных средах.

**Жаростойкость (окалиностойкость)** сталей повышают путем легирования хромом, алюминием или кремнием, т.е. элементов, находящихся в твердом растворе и образующих в процессе нагрева защитные пленки окислов  $(Cr,Fe)_2O_3$ ,  $(Al,Fe)_2O_3$ . Окалиностойкость зависит от химического состава, а не от структуры.

Жаростойкие ферритные стали: 12X17, 15X25Т Х15Ю5.

Жаростойкие аустенитные: 20X23Н13, 12X25Н16Г7АР и др.

**Нержавеющие стали** получают легированием хромом или хромом и никелем в зависимости от среды эксплуатации. Два основных класса: хромистые (ферритные, мартенситно-ферритные, в которых феррита не более 10 % и мартенситные) и хромоникелевые (аустенитные, аустенитно-мартенситные или аустенитно-ферритные).

Марки 12X13, 20X13 –используют для предметов домашнего обихода, клапанов гидравлических прессов.30X13 и 40X13 используют для хирургических инструментов. Марки: 12X18Н9 и 17X18Н9 – для изготовления труб, деталей, свариваемых точечной сваркой, 04X18Н10 –для изготовления химической аппаратуры.

**Стали и сплавы для режущего инструмента.** Инструментальными называют углеродистые и легированные стали, обладающие высокой твердостью (60-65 HRC), прочностью и износостойкостью и применяемые для изготовления различного инструмента. Обычно это заэвтектоидные или ледебуритные стали, структура которых после закалки и низкого отпуска мартенсит и избыточные карбиды. Содержание углерода в таких сталях должно быть делнн 0,6 ма. % для легированных и более 0,8 мас. % для углеродистых.

Одной из главных характеристик инструментальных сталей является **теплостойкость** – способность сохранять высокую твердость при нагреве (устойчивость против отпуска при нагреве инструмента в процессе работы).

Все инструментальные стали разделяют на три группы:

-не обладающие теплостойкостью (углеродистые и легированные стали, содержащие до 3-4 % легирующих элементов);

полутеплостойкие до 400-500<sup>0</sup>С (высоколегированные стали, содержащие свыше 0,6-0,7 % С и 4-18 % Cr);

теплостойкие до 550-650<sup>0</sup>С (высоколегированные стали, содержащие Cr, W, V, Mo, Co, ледебуритного класса), получившие название быстрорежущих.

Другой важной характеристикой инструментальных сталей является **прокаливаемость** (способность стали закаливаться на различную глубину). Высоколегированные теплостойкие и полутеплостойкие стали обладают высокой прокаливаемостью (т.е. глубина закалённого слоя большая). Инструментальные стали, не обладающие теплостойкостью, делят на стали небольшой прокаливаемости (углеродистые) и повышенной прокаливаемости (легированные).

О маркировке углеродистых инструментальных сталей говорилось в начале главы. Легированные инструментальные стали X, 9X, 9XC, 6XBG и т.д. маркируют цифрой, показывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента, если его содержание меньше 1 %. Если углерода примерно 1 %, то цифра чаще отсутствует. Буквы означают легирующие элементы, а следующие за ними цифры – содержание в целых процентах соответствующего элемента.

Буквой **P** маркируют быстрорежущие стали. Следующая за ней цифра указывает среднее содержание главного легирующего элемента быстрорежущей стали – вольфрама - в процентах. Среднее содержание молибдена в процентах *обозначают цифрой после буквы M*, кобальта – *после K*, ванадия – *после Ф* и т.д. Среднее содержание хрома в большинстве быстрорежущих сталей составляет 4 % и поэтому в обозначении марки стали не указывается. Содержание углерода в них около 1 мас. %.

**Стали для измерительного инструмента.** Эти стали должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, сохранять постоянство размеров и хорошо шлифоваться. Обычно применяют высокоуглеродистые хромистые стали X и 12X1. Измерительный инструмент обычно подвергают закалке в масле от возможно низких температур 850-870<sup>0</sup>С с целью получения минимального количества остаточного аустенита. Непосредственно после закалки измерительный инструмент подвергают обработке холодом при – 70<sup>0</sup>С и отпуску при 120 - 140<sup>0</sup>С в течение 20 - 50 ч. Нередко обработку холодом проводят многократно. Твердость после такой обработки составляет 63-64 HRC.

Плоские и длинные измерительные линейки изготавливают из листовых сталей 15,15X. Для получения рабочих поверхностей с высокой твердостью и износостойкостью инструменты подвергают цементации и закалке.

**Стали для штампов холодного деформирования.** Штампы холодного деформирования работают в условиях высоких переменных нагрузок, выходят из строя вследствие хрупкого разрушения, малоциклового усталости и изменения формы и размеров за счет смятия (пластической деформации) и износа. Поэтому стали, используемого для изготовления штампов холодного деформирования, должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и прочностью, сочетающейся с достаточной вязкостью. Стали должны обладать также высокой теплоустойкостью, поскольку в процессе деформирования штампы разогреваются до температур 200-350<sup>0</sup>С.

Хромистые стали X12Ф1 и X12М используют для штампов сложной формы, поскольку они мало деформируются при закалке в масле; молибден и ванадийсодержащие стали X12Ф1 и X12М с хорошей прокаливаемостью (обладают высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, молибден и ванадий способствуют сохранению мелкого зерна). Недостатки этих марок сталей – плохо обрабатываются резанием в отожженном состоянии, резко выражена карбидная неоднородность, которая приводит к снижению механических свойств.

**Стали для штампов горячего деформирования.** Такие штампы работают в очень жестких условиях. Они разрушаются вследствие пластической деформации (смятия), хрупкого разрушения, образования сетки разгара (трещин) и износа рабочей поверхности. Поэтому стали для штампов горячего деформирования должны иметь высокие механические свойства (прочность и вязкость) при повышенных температурах и обладать износостойкостью, окалиностойкостью и разгаростойкостью, высокой теплопроводностью для лучшего отвода теплоты, передаваемой обрабатываемой заготовкой.

**Разгаростойкость** – это способность выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования разгарных трещин. Штампы больших размеров должны обладать хорошей прокаливаемостью. Важно, чтобы сталь не была склонна к обратимой отпускной хрупкости, так как быстрым охлаждением крупных штампов ее устранить нельзя. Полутеплостойкие стали 5ХНМ и 5ХГМ, которые обладают повышенной вязкостью и упрочняются в результате мартенситного превращения, применяют для изготовления крупных ковочных штампов, а также инструмента ковочных машин и прессов, нагреваемых до температуры не выше 500-550<sup>0</sup>С при умеренных нагрузках.

Средненагруженных инструмент, работающий с разогревом поверхности до 600<sup>0</sup>С изготавливают из сталей 4Х5ВФС и 4Х5МФ1С. Эти стали упрочняются за счет мартенситного превращения и дисперсионного упрочнения при отпуске за счет выделения специальных карбидов  $M_{23}C_6$  и  $M_6C$ . Превращения в этих сталях при термообработке сходны с превращениями в быстрорежущих сталях. Штамповые стали часто подвергают азотированию, борированию, реже – хромированию.

**Твердые сплавы.** Твердыми называют сплавы, изготавливаемые методом порошковой металлургии и состоящие из карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC), соединенные кобальтовой связкой. Различают 3 группы твердых сплавов:

- 1 – вольфрамовые (ВК3, ВК6, ВК10);
- 2 – титановольфрамовые (Т30К4, Т15К8, Т5К12);

3 – титанотанталовольфрамовые (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б).

В марках первые буквы обозначают группу, к которой относится сплав: **ВК** – вольфрамовая, **Т** – титановольфрамовая, **ТТ** – титанотанталовольфрамовая. Цифры в вольфрамовой группе – количество кобальта, в титановольфрамовой первые цифры – количество карбида титана, а вторые цифры – количество кобальта; в титанотанталовольфрамовой группе первые цифры – количество карбидов титана и тантала, вторые – количество кобальта. Если в конце через черточку стоит буква М (ВК6-М), то сплавы изготовлены из мелких порошков, если буква В (ВК4-В) – из крупнозернистого карбида вольфрама. Буквы «ОМ» в конце через черточку – сплавы изготовлены из особо мелких порошков, а «ВК» – из особо крупного карбида вольфрама.

Разработаны твердые сплавы, не содержащие дефицитный вольфрам, - на основе  $TiC + Ni + Mo$  (сплав ТН-20, цифра указывает суммарное содержание Ni и Mo) и на основе карбонитрида титана  $Ti(NC) + Ni + Mo$  (КНТ-16).

Часто на рабочие поверхности многогранных неперетачиваемых пластин из твердых сплавов (режущие части инструмента) наносят карбидные или нитридные покрытия.

## **27 Классификация и маркировка цветных сплавов**

Алюминиевые, магниевые и титановые сплавы широко применяются в авиационной промышленности. Изделия из легких сплавов используют в строительстве, транспортном машиностроении, приборостроении, судостроении и других отраслях промышленности. Медь обладает высокой электрической проводимостью и широко применяется в электротехнике; она является также основой многих важных промышленных сплавов (например, латуней, бронз и др.). Основой многих жаростойких, жаропрочных и электротехнических сплавов является никель. Одновременно он часто используется как легирующий элемент в специальных сталях. В качестве конструкционных материалов для новой техники ши-

роко используют тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден, ниобий, хром и др.), а также сплавы на их основе.

Медь – химический элемент I группы Периодической системы, порядковый номер 29, атомная масса 63,54. Медь – металл красного цвета, в изломе розового цвета, температура плавления 1083°C, обладает ценными техническими и технологическими свойствами: высокими электро- и теплопроводностью, достаточной коррозионной стойкостью, хорошо обрабатывается давлением, сваривается всеми видами сварки, легко поддается пайке, прекрасно полируется. У чистой меди небольшая прочность и высокая пластичность.

По характеру взаимодействия с медью легирующие элементы и примеси разделяют на три группы:

1 Элементы (Ag, Al, As, Au, Cd, Fe, Ni, Pt, P, Sb, Sn, Zn), взаимодействующие с медью с образованием твердых растворов. Они повышают ее прочность, но при этом существенно уменьшаются значения (в первую очередь, из-за присутствия сурьмы и мышьяка) тепло- и электропроводности.

2 Элементы (Bi, Pb), практически нерастворимые в меди в твердом состоянии и образующие с ней легкоплавкие эвтектики. Возникновение эвтектик по границам зерен приводит к разрушению слитков меди в процессе их горячей прокатки (явление красноломкости). Повышенное (более 0,005%) содержание висмута вызывает хладноломкость меди.

3. Элементы (Se, S, O, Te и др.), образующие с медью хрупкие химические соединения (например,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ). Увеличение содержания серы в меди, с одной стороны, обеспечивает повышение качества ее механической обработки (резанием), с другой стороны, вызывает хладноломкость меди. Присутствие кислорода в меди является причиной ее «водородной болезни», проявляющейся в образовании микротрещин и разрушении при отжиге ( $t > 400^\circ\text{C}$ ) в водородсодержащей среде. В данном случае водород, активно диффундирующий в металл, отнимает кислород у закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  с образованием паров воды. В металле возникают области с высоким давлением, вызывающим разрушение материала.

Различают две основные группы медных сплавов: 1) **латуни** – сплавы меди с цинком; 2) **бронзы** – сплавы меди с другими элементами, в числе которых, но только наряду с другими, может быть и цинк. Медные сплавы обладают высокими механическими и технологическими свойствами, хорошо сопротивляются износу и коррозии.

Латуни обозначают буквой **Л** и цифрой, указывающей массовое содержание меди в сплаве в процентах (например, Л96, Л63). Если латунь легирована наряду с цинком другими элементами, то после буквы **Л** ставят условное обозначение этих элементов: **С** – свинец; **О** – олово; **Ж** – железо; **А** – алюминий; **К** – кремний, **Мц** – марганец; **Н** – никель. Числа после букв показывают массовое содержание меди и последующих (согласно буквам) легирующих элементов, кроме цинка (например, ЛАН59-3-2 содержит – 59% Cu, 3% Al, 2% Ni, Zn – остальное).

Маркировка литейных латуней начинается также с буквы **Л**. После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего (как в сталях) ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. По сравнению с медью латуни обладают большей прочностью, твердостью, коррозионной стойкостью и жидкотекучестью.

Бронзы маркируют буквами **Бр**; затем буквами последовательно указывают легирующие элементы и в конце их содержание в сплаве. Обозначение элементов в бронзах то же, что и при маркировке латуней. Кроме того, фосфор обозначают буквой **Ф**, цинк – **Ц**, хром – **Х**, бериллий – **Б**, цирконий – **Цр**.

**Оловянные бронзы** по структуре бывают однофазными ( $\alpha$ -твердый раствор олова в меди) и двухфазными, состоящими из  $\alpha$ - и  $\delta$ (Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub>)-фаз. Обычно  $\delta$ -фаза выделяется при содержании олова, большем 7–9%. Она повышает твердость и хрупкость бронз.

**Деформируемые оловянные бронзы** (БрОФ6,5-0,4, БрОЦ4-3, БрОЦС4-4-2,5) имеют однофазную структуру ( $\alpha$ -твердый раствор), поскольку содержат до 7% Sn. Их дополнительно легируют фосфором (до 0,4%), цинком (до 4%) и свинцом (до 2,5%). Полуфабрикаты (лента, проволока, прутки) поставляются как в

нагартованном, так и отожженном виде. Из них изготавливают упругие элементы (пружины, мембраны и др.). По усталостным характеристикам они уступают лишь бериллиевой бронзе.

**Литейные оловянные бронзы** (БрОЗЦ12С5, БрОЗЦ7С5Н1, БрО5Ц5С5, БрО5С25, БрО10Ф1) имеют двухфазную структуру ( $\alpha$  и  $\delta$ ). По сравнению с деформируемыми литейные бронзы содержат большее количество легирующих элементов (цинка, свинца, фосфора). Оловянные бронзы склонны к образованию усадочной пористости, что вызвано широким интервалом (150–200°С) кристаллизации сплавов. Для них характерна невысокая жидкотекучесть, но в то же время малая линейная усадка. Оловянные бронзы коррозионностойки и обладают высокими антифрикционными свойствами.

**Алюминиевые бронзы** могут быть как двойными (например, ВрА5), так и дополнительно легированными никелем, марганцем, железом и др. Содержащие до 4–5% Al бронзы характеризуются высокой пластичностью. Алюминиевые бронзы бывают деформируемыми и литейными.

**Кремнистые бронзы** (БрКМц3-1) характеризуются хорошей прочностью и пластичностью. Они немагнитны, морозостойки. Никель и марганец повышают механические и коррозионные свойства кремнистых бронз. Сплавы свариваются, подвергаются пайке.

**Бериллиевые бронзы** обладают высокими механическими (в частности, упругими) свойствами, стойкостью против коррозии и удовлетворительной электро- и теплопроводностью, хорошо свариваются. Широко известны бронзы, содержащие 1,6–2,6% Be, 0,2–0,5% Ni, 0,1–0,25% Ti/

**Хромовые бронзы** (БрХО 0,5) обладают высокими механическими свойствами, хорошей электро- и теплопроводностью, повышенной температурой рекристаллизации (450–500°С). Бронзы содержат 0,4–1% Cr, 0,2% Ag. Серебро повышает механические свойства и температуру рекристаллизации бронз. Бронзы упрочняются закалкой (~950°С) в воде и последующим старением (400 °С, 6 ч).

**Циркониевые бронзы** сочетают в себе высокую тепло- и электропроводность, близкую к меди, и жаропрочность (в частности, сопротивление ползучести), Бронзы содержат 0,1–0,8% Zr (БрЦр0,2–БрЦр0,7). Упрочняются они комплексной обработкой: закалкой (~920°C), последующей холодной пластической деформацией (степень деформации до 75%) и старением (~450°C, 1 ч). При старении из  $\alpha$ -твердого раствора выделяется упрочняющая фаза ( $\text{Cu}_3\text{Zr}$ ).

**Области применения** меди и ее сплавов весьма разнообразны. Чистая медь широко используется в электротехнике, в различного рода теплообменниках. Из высокотехнологичных латуней получают изделия глубокой вытяжкой (радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны, гибкие шланги). Латунни, содержащие свинец, используют при работе в условиях трения (в часовом производстве, в типографских машинах).

Оловянные бронзы применяют для литья художественных изделий. При дополнительном легировании фосфором их используют для изготовления деталей, работающих на трение в коррозионной среде: подпятники, подшипники, уплотняющие втулки, пояски поршневых колец, клапаны. Алюминиевые бронзы прежде всего используются в качестве заменителей оловянных. Высокопрочные алюминиевые бронзы идут на изготовление шестерен, втулок, подшипников, пружин, деталей электрооборудования. Из бериллиевой бронзы делают детали точного приборостроения, упругие элементы электронных приборов и устройств, мембраны. Для менее ответственных деталей используют кремнистые бронзы. Хромовые и циркониевые бронзы применяют в двигателестроении.

**Алюминий** отличают низкая плотность, высокие тепло- и электропроводность, хорошая коррозионная стойкость во многих средах за счет образования на поверхности металла плотной оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Алюминий высокопластичен и легко обрабатывается давлением, однако при обработке резанием возникают осложнения, одной из причин которых является налипание металла на инструмент.

**Основные легирующие элементы в алюминиевых сплавах** - Cu, Zn, Mg, Ni, Fe, Mn. Они формируют упрочняющие зоны и фазы. Марганец одновременно повышает коррозионную стойкость. Кремний является основным легирующим элементом в ряде литейных алюминиевых сплавов (силуминов), поскольку он участвует в образовании эвтектики. Ni, Ti, Cr, Fe повышают жаропрочность сплавов, затормаживая процессы диффузии и образуя стабильные сложнолегированные упрочняющие фазы. Литий в сплавах способствует возрастанию их модуля упругости. Вместе с тем магний и марганец снижают тепло- и электропроводность алюминия, а железо – его коррозионную стойкость.

**Маркировка алюминиевых сплавов.** В настоящее время одновременно «сосуществуют» две маркировки сплавов: старая буквенно-цифровая (табл. 6) и новая цифровая (рис. 68). Наряду с этим имеется буквенно-цифровая маркировка технологической обработки полуфабрикатов и изделий, качественно отражающая механические, химические и другие свойства сплава (табл. 7).

**Классификация алюминиевых сплавов.** Алюминиевые сплавы в основном подразделяются на деформируемые и литейные, поскольку в производстве порошковых (в том числе и гранулируемых) сплавов и композиционных материалов в той или иной мере используются процессы пластической деформации и литья.

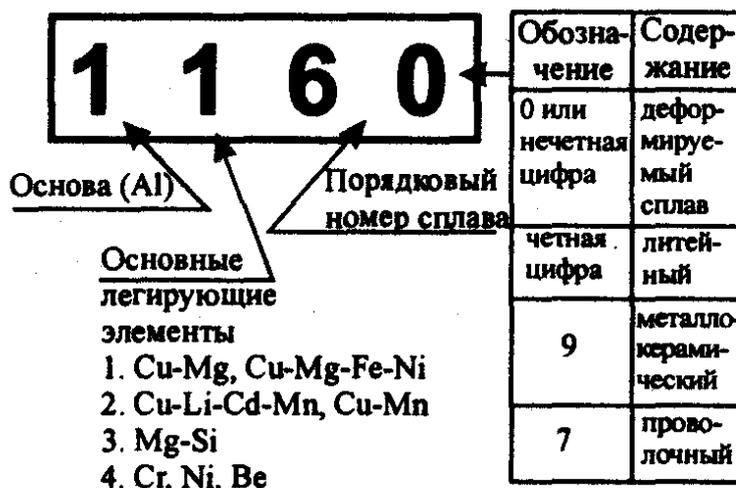


Рисунок 68 – Принципы цифровой маркировки алюминиевых сплавов

Таблица 6 – Буквенно-цифровая маркировка алюминиевых сплавов

Принцип классификации	Сплав	
	Название	Обозначение
По химическому составу	–	АМг, АМц
По названию сплава	Дуралюмин	Д1, Д6
По технологическому назначению	Ковочный	АК6, АК8
По свойствам	Высокопрочный	В95, В96
По методу получения полуфабрикатов и изделий	Спеченный	САП, САС,
	литейный	АЛ2
По виду полуфабрикатов	Проволочный	АМг5П

Таблица 7 – Буквенно-цифровая маркировка технологической обработки деформируемых и литейных сплавов

Обозначение	Вид обработки, характеристика свойств материала	
	Деформируемые сплавы	Литейные сплавы
М	Мягкий, отожженный	Модифицированный
Т	Закаленный и естественно состаренный	–
T1	Закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность	Состаренный
T2	Закаленный и искусственно состаренный по смягчающему режиму для повышения вязкости разрушения	Отожженный
T3	Закаленный и искусственно состаренный по смягчающему режиму для повышения сопротивления коррозии под напряжением	–
T4	–	Закаленный
T5	–	Закаленный и частично состаренный
T6	–	Закаленный и полностью состаренный на максимальную твердость
T7	–	Закаленный с последующим стабилизирующим отпуском
T8	–	–

Н		Закаленный с последующим смягчающим отпуском
П	Нагартованный (5–7%)	
НН	Полунагартованный	
ТН	Усиленно нагартованный (20%)	–
	Закаленный, естественно состаренный и нагартованный	–
Т1Н	Закаленный, нагартованный и искусственно состаренный	–
ТПП	Закаленный и естественно состаренный, повышенной прочности	–
ГК	Горячекатаные (листы, плиты)	–
А	Нормальная плакировка	–
У	Утолщенная плакировка (8% на сторону)	–

**Титан** и сплавы на его основе обладают высокой коррозионной стойкостью (сопротивлением межкристаллитной, щелевой и другим видам коррозии), удельной прочностью. Недостатками титана являются его активное взаимодействие с атмосферными газами, склонность к водородной хрупкости. Азот, углерод, кислород и водород, упрочняя титан, снижают его пластичность, сопротивление коррозии, свариваемость. Титан плохо обрабатывается резанием, удовлетворительно – давлением, сваривается в защитной атмосфере; широко распространено вакуумное литье, в частности вакуумно-дуговой переплав с расходуемым электродом. Легирующие элементы подразделяют в зависимости от их влияния на температуру полиморфного превращения титана (882,5°С) на две основные группы:  $\alpha$ -стабилизаторы (элементы, расширяющие область существования  $\alpha$ -фазы и повышающие температуру превращения – Al, Ga, Ge, La, C, O, N) и  $\beta$ -стабилизаторы (элементы, суживающие  $\alpha$ -область и снижающие температуру полиморфного превращения, – V, Nb, Ta, Zr, W, Mo, Cr, Mn, Fe, Co, Si, Ag и др.). В то же время легирующие элементы (как  $\alpha$ -, так и  $\beta$ -стабилизаторы) можно разделить на две основные группы: элементы с большой (в пределе – неограниченной) и ограни-

ченной растворимостью в титане. Последние могут образовывать с титаном интерметаллиды, силициды и фазы внедрения.

**Классификация титановых сплавов.** Структура промышленных сплавов титана это твердые растворы легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификациях титана. Поскольку легирующие элементы влияют на стабилизацию той или иной аллотропической модификации титана, то сплавы титана в зависимости от их стабильной структуры (после отжига) при комнатной температуре подразделяют на три основные группы:  $\alpha$ -сплавы,  $(\alpha+\beta)$ -сплавы (двухфазные) и  $\beta$ -сплавы.

Титановые сплавы классифицируют также по технологии производства (деформируемые, литейные, порошковые), по физико-химическим, в том числе механическим, свойствам (высокопрочные, обычной прочности, высокопластичные, жаропрочные, коррозионностойкие).

**Деформируемые титановые сплавы.** Большинство титановых сплавов легировано алюминием, повышающим жесткость, прочность, жаропрочность и жаростойкость материала, а также снижающим его плотность.

$\alpha$ -Титановые сплавы (с чисто  $\alpha$ -структурой) термической обработкой не упрочняются; их упрочнение достигается посредством легирования твердого раствора и пластической деформацией

$(\alpha+\beta)$ -Титановые сплавы характеризуются смешанной структурой ( $\alpha$ - и  $\beta$ -твердые растворы) и упрочняются термической обработкой, состоящей из закалки и старения. Они хуже свариваются, чем  $\alpha$ -сплавы.

Псевдо- $\beta$ -титановые сплавы характеризуются высоким содержанием  $\beta$ -стабилизаторов и вызванным этим отсутствием мартенситного превращения. Сплавы характеризуются высокой пластичностью в заявленном состоянии и высокой прочностью – в состаренном они удовлетворительно свариваются аргонодуговой сваркой.

**Литейные титановые сплавы.** По сравнению с деформируемыми литейные сплавы имеют меньшую прочность, пластичность и выносливость, но более дешевы. Сложность литья титановых сплавов обусловлена активным взаимодей-

ствием титана с газами и формовочными материалами. Литейные сплавы ВТ5Л, ВТ14Л и ВТ3-1Л по составу в основном совпадают с аналогичными деформируемыми сплавами (в то же время сплав ВТ14Л дополнительно содержит Fe и Cr).

**Порошковые сплавы титана.** Применение методов порошковой металлургии для производства титановых сплавов позволяет при тех же эксплуатационных свойствах, что и у литого или деформируемого материала, добиться снижения до 50% стоимости и времени изготовления изделий. Титановый порошковый сплав ВТ6, полученный горячим изостатическим прессованием (ТИП), обладает теми же механическими свойствами, что и деформируемый сплав после отжига ( $\sigma_B = 970$  МПа,  $\delta = 16\%$ ). Заявленному и состаренному деформируемому сплаву ВТ6 порошковый сплав уступает в прочности, но превосходит в пластичности.

Из сплавов титана изготавливают: обшивку самолетов, морских судов, подводных лодок; корпуса ракет и двигателей; диски и лопатки стационарных турбин и компрессоров авиационных двигателей; гребные винты; баллоны для сжиженных газов; емкости для агрессивных химических сред и др.

**Магний** является химически активным металлом: образующаяся на воздухе оксидная пленка MgO в силу более высокой плотности, чем у самого магния, растрескивается и не обладает защитными свойствами; магний в виде порошка, стружки или пыли легко воспламеняется при контакте расплавленного или горячего магния с водой происходит взрыв. Магний и его сплавы плохо сопротивляются коррозии, обладают пониженной жидкотекучестью при литье, пластически деформируются лишь при повышенных температурах (225°C и более). В то же время магниевые сплавы характеризуются высокой удельной прочностью, хорошо поглощают вибрации, не взаимодействуют с ураном. Они хорошо обрабатываются резанием и удовлетворительно свариваются аргонодуговой и контактной сваркой. Основными легирующими элементами в магниевых сплавах являются Mn, Al и Zn. Марганец повышает коррозионную стойкость и свариваемость сплавов магния. Алюминий и цинк оказывают большое влияние на прочность и пластичность магниевых сплавов.

По технологии изготовления изделий магниевые сплавы разделяют на литейные (маркировка «МЛ») и деформируемые («МА»).

**Литейные сплавы магния.** Механические свойства литого магния следующие:  $\sigma_B = 115$  МПа,  $\delta = 8\%$ , 30 НВ (кгс/мм<sup>2</sup>). В литых магниевых сплавах повышения механических свойств добиваются измельчением зерна посредством перегрева расплава или его модифицирования добавками мела или магнезита. Среди литейных магниевых сплавов широкое применение нашли сплавы МЛ5 и МЛ6, отличающиеся повышенными литейными и механическими свойствами.

**Деформируемые сплавы магния.** Деформированный (прессованный) магниевый обладает более высоким комплексом механических свойств, чем литой:  $\sigma_B = 200$  МПа,  $\delta = 11,5\%$ , 40 НВ. Деформируемые сплавы производят в виде поковок, штамповых заготовок, горячекатаных полос, прутков и профилей. Хорошей коррозионной стойкостью, свариваемостью и технологической пластичностью отличается сплав МА1, относящийся к группе сплавов низкой прочности. Сплав МА2-1 сочетает в себе оптимальный комплекс механических и технологических свойств (хорошо сваривается, штампуется), но подвержен коррозии под напряжением.

Из сплавов магния изготавливают корпуса ракет, насосов, приборов, топливные и кислородные баки, рамы двигателя, кожухи. Так, сплавы МЛ5 и МЛ6 используются для литья тормозных барабанов, штурвалов, коробок передач, МЛ10 – деталей приборов высокой герметичности. Деформируемые сплавы МА1 применяют для изготовления арматуры, бензо- и маслосистем, а также сварных деталей, МА14 – для высоконагруженных деталей. Для обеспечения коррозионной стойкости деталей из магниевых сплавов их поверхности оксидируют с последующим нанесением лакокрасочных покрытий.

### **Вопросы для самоконтроля по разделу:**

1. Какие параметры характеризуют режим термической обработки?
2. Каково назначение термической обработки сталей?

3. Дайте определение перегреву и пережогу и чем они отличаются.
4. В чём состоит отличие отжига, отпуска и закалки?
5. Дайте определение мартенсита.
6. Что такое отпускная хрупкость?
7. В чём заключается процесс химико-термической обработки?
8. Для чего предназначено борирование стали?
9. Процесс азотирования проводится до или после окончательной термической обработки стали?
10. Расшифруйте марки следующих сталей: АСт0кп, У9А, 5Х2НМ, Р9.
11. Чем отличаются латуни, бронзы и мельхиоры?
12. Расшифровать марки сплавов ЛС59-1, ЛМцАЖКС
13. Чем отличаются алюминиевые сплавы Д6 и В96?
14. Каковы отличительные особенности строения титановых сплавов?
15. Каковы отличительные особенности и области применения магниевых сплавов?

### **Заключение**

Изложенный в пособии материал позволит лучше освоить курсантам, слушателям заочного факультета и экстернам основополагающую общетехническую дисциплину в подготовке инженеров по специальности 280104.65 – Пожарная безопасность. Знания особенностей технологии получения и свойств конструкционных материалов помогут в выполнении профессиональной деятельности, поскольку только на их основе можно правильно выделить наиболее ответственные и опасные с точки зрения угрозы для жизни и здоровья работающего персонала, а также безопасности окружающей среды участка производства и обеспечить общую пожаробезопасность предприятия.

## Список литературы

1. Сапунов, С. В. *Материаловедение [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов [Гриф УМО] / С. В. Сапунов. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 201 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/56171/>*
2. Барон, Ю. М. *Технология конструкционных материалов [Текст : Электронный ресурс] : учебник для вузов [Гриф УМО] / [Ю. М. Барон и др.] ; под ред. Ю. М. Барона. – Санкт-Петербург : Питер, 2015. – 511 с. – Режим доступа: <http://ibooks.ru/reading.php?productid=28490>*
3. Афанасьев, А. А. *Технология конструкционных материалов : учебник для вузов [Гриф УМО] / А. А. Афанасьев, А. А. Погонин. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2014. – 655 с.*
4. Мальцева, Л. А. *Материаловедение : учебное пособие / Л.А. Мальцева, В.И. Гроховский, Т.В. Мальцева. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – 200 с.*
5. Галимов, Э. Р. *Материаловедение для транспортного машиностроения : учебное пособие для бакалавров [Гриф УМО] / Э. Р. Галимов [и др.]. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 442 с. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/30195/>*
6. Горохов, В. А. *Материалы и их технологии [Электронный ресурс] : учебник для вузов [Гриф УМО]. В 2 ч. Ч. 1 / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе ; под ред. В. А. Горохова. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2014. – 588 с. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/49450/>*
7. Горохов, В. А. *Материалы и их технологии [Электронный ресурс] : учебник для вузов [Гриф УМО]. В 2 ч. Ч. 2 / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе ; под ред. В. А. Горохова. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2014. – 532 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/49451/>*
8. Худокормова, Р. Н. *Материаловедение. Практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов [Гриф Минобразования Республики Беларусь] / Р. Н. Худокормова, Ф. И. Пантелеенко, Д. А. Худокормов. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2014. – 309 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/64756/>.*

9. *Богодухов, С. И.* Материаловедение : учебник для вузов [Гриф Московского государственного технологического университета "СТАНКИН"] / С. И. Богодухов, Е. С. Козик. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2013. – 534 с.

10. *Колесник, П. А.* Материаловедение на автомобильном транспорте учебник для вузов по направлению подготовки "Транспортные средства" / П. А. Колесник, В. С. Кланица. – Москва : Академия, 2014. – 317 с. [и предыдущие издания]

11. *Турилина, В. Ю.* Материаловедение. Механические свойства металлов. Термическая обработка металлов. Специальные стали и сплавы [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов [Гриф УМО] / В. Ю. Турилина ; под ред. С. А. Никулина. – Москва : МИСиС, 2013. – 153 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/47489/>

12. *Шуваева, Е. А.* Материаловедение. Неметаллические и композиционные материалы [Электронный ресурс] : курс лекций : учебное пособие для вузов [Гриф УМО] / Е. А. Шуваева, А. С. Перминов. – Москва : МИСиС, 2013. – 76 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/47490/>

13. *Готтштайн, Г.* Физико-химические основы материаловедения – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2009. – 400с.

14. *Арзамасов, Б.Н.* Материаловедение: Учеб. для вузов/ Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Т.Ф. Косолапов и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – 7-е изд. испр. и доп. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 646 с.

15. *Мальцева, Л.А.* Материаловедение: Учебное пособие / Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев, А.Б. Кутьин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 339 с.

16. *Колесов С.Н.* Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов/ С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2007. – 539 с.

17. *Дальский А.М.* Технология конструкционных материалов: Учеб. для машиностроительных специальностей вузов /А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, И.Г. Кременский и др.; Под общ. ред. А.М. Дальского. – 6-е изд. испр. и доп. – Москва: Машиностроение, 2005. – 592 с.

18. *Фетисов, Г.П.* Материаловедение и технология металлов: учебник для студентов машиностроит. спец.вузов/ Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин; Под ред. Г.П. Фетисова. – 6-е изд., доп. – Москва : Высшая школа, 2008. – 877 с.

19. *Пейсахов, А.М.* Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебник / А.М. Пейсахов, А.М. Кучер. 2-е издание. – Санкт-Петербург : Изд-во Михайлова В.А., 2004. – 407 с.

20. *Солнцев, Ю.П.* Материаловедение: Учебник для вузов /Ю.П.Солнцев и др. – Москва : Изд-во МИСИС, 1999. – 600 с.

21. *Воскобойников, В.Г.* Общая металлургия: Учеб. для вузов / Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. – Москва: Металлургия, 1998. – 758 с.

22. *Мозберг, Р.К.* Материаловедение: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. – Москва : Высшая школа, 1991. – 448 с.: ил.

23. *Лахтин, Ю.М.* Материаловедение: Учеб. для высших технических учебных заведений / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение. 1990. – 528 с.

24. *Травин, О.В.* Материаловедение: Учеб. для втузов./ О.В. Травин, Н.Т. Травина – Москва : Металлургия, 1989. – 383 с.

25. *Циммерман, Р.* Металлургия и материаловедение: Справ.изд./ Р. Циммерман, К. Гюнтер; Пер. с нем. Б.И. Левина, Г.А. Ашмарина; Под ред. П.И. Полухина, М.Л. Бернштейна. – Москва : Металлургия, 1982. – 479 с.

26. *Гуляев, А.П.* Металловедение / А.П. Гуляев – Москва: Металлургия, 1987. – 647 с.

27. *Кнорозов Б.В.* Технология металлов и материаловедение / Б.В. Кнорозов, Л.Ф.Усова, А.В. Третьяков и др.; Под ред. Л.Ф. Усовой. – 3-е изд. перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1987. – 800 с.

28. *Алаи С.И.* Технология конструкционных материалов: Учеб. для студентов педагогических институтов по спец. № 2120 «Общетехнические дисциплины и труд»/ С.И. Алаи, П.М. Григорьев, А.Н. Ростовцев; Под общ. ред. А.Н. Ростовцева. – Москва: Просвещение, 1986. – 303 с.

29. *Гузанов, Б.Н.* Классификация и правила маркировки металлических материалов : Учеб. пособие / Б.Н. Гузанов, В.В. Бухаленков, Л.И. Анисимова – Екатеринбург: изд-во ГОУ ВПО РГППУ, 2006. – 67 с.

30. *Гузанов, Б.Н.* Технология конструкционных материалов и материаловедение: Крат. слов. терминов педагога профессионального обучения / Сост. Б.Н. Гузанов, Л.И. Анисимова, С.А. Башкова, М.А. Бабицына; под ред. Б.Н. Гузанова. - Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2006. – 92 с.

31. *ГОСТ 5639–82.* Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна . Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 38 с.

32. *ГОСТ 8233–56.* Сталь. Эталоны микроструктуры. Москва : Изд-во стандартов, 2004 (переиздание). – 21 с.

33. *ГОСТ 1497–84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение. Москва : Стандартиформ, 2005. – 24 с.

Краткий курс материаловедения и технологии конструкционных материалов

Учебное пособие

Б. Н. Гузанов, В. В. Бухаленков

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Формат 60×84/16. Бумага для множ. аппаратов.

Печать плоская. Усл. печ. л. \_\_\_\_. Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_. Тираж \_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет».  
Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

---

Ризограф ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет».  
Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.