

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ИВАНОВСКАЯ ПОЖАРНО-  
СПАСАТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ  
СЛУЖБЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ  
ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И  
ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»**



**Методические рекомендации  
для самостоятельной работы  
обучающихся по дисциплине  
«Материаловедение и технология  
материалов»**

**(специальность 20.05.01 «Пожарная безопасность»)**

**Иваново**

**Пучков П.В., Топоров А.В.**

Материаловедение и технология материалов. Методические рекомендации для самостоятельной работы по дисциплине для курсантов и студентов, обучающихся по специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность». – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. - 57 с.

В методических рекомендациях представлен теоретический материал по курсу «Материаловедение и технология материалов» и список рекомендуемой литературы.

Методические рекомендации предназначены для курсантов и студентов очной формы обучения, обучающихся специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность».

## Содержание

№ темы	Наименование темы	Стр.
<b>Тема №1</b>	<b>Введение. Общие сведения о металлах, сплавах и неметаллических материалах.</b>	
	Вопрос 1. Несовершенства кристаллического строения.....	4
	Вопрос 2. Влияние несовершенств кристаллического строения на механические свойства материалов.....	6
<b>Тема №2</b>	<b>Физико-механические свойства материалов и методы их определения.</b>	
	Вопрос 1. Физические свойства материалов.....	6
	Вопрос 2. Влияние температуры на изменение механических свойств материалов.....	9
	Вопрос 3. Неразрушающие методы исследования механических свойств металлов и сплавов.....	9
<b>Тема №3</b>	<b>Основы теории сплавов</b>	
	Вопрос 1. Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов.....	12
	Вопрос 2. Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов. Структуры железоуглеродистых сплавов.....	14
<b>Тема №4</b>	<b>Железоуглеродистые сплавы</b>	
	Вопрос 1. Легированные стали, их классификация, маркировка и область применения.....	15
	Вопрос 2. Способы получения чугунов различных типов и их маркировка. Процесс графитизации. Факторы, способствующие графитизации.....	17
<b>Тема №5</b>	<b>Основы технологии термической и химико-термической обработки материалов</b>	
	Вопрос 1. Структурно-фазовые превращения в стали в результате термической обработки.....	18
	Вопрос 2. Диффузионная металлизация как вид ХТО, её виды, режимы и назначение.....	20
	Вопрос 3. Поверхностная закалка, лазерная термическая и химико-термическая обработка.....	21
<b>Тема №6</b>	<b>Цветные металлы и их сплавы. Неметаллические материалы</b>	
	Вопрос 1. Композиционные материалы.....	24
	Вопрос 2. Пластмассы, их общая характеристика, классификация, и назначение.....	25
	Вопрос 3. Резины, их общая характеристика, классификация и назначение.....	29
<b>Тема №7</b>	<b>Поведение материалов в особых условиях. Коррозия металлических материалов и её виды. Защита металлов и сплавов от коррозии.</b>	
	Вопрос 1. Поведение материалов в особых условиях.....	30
	Вопрос 2. Стали и сплавы с особыми физико-механическими свойствами.....	33
<b>Тема №8</b>	<b>Основы технологии литейного производства и обработки материалов давлением.</b>	
	Вопрос 1. Технология изготовления отливок в песчано-глинистых формах.....	35
	Вопрос 2. Производство чугуна.....	39
	Вопрос 3. Производство стали.....	40
	Вопрос 4. Производство меди.....	46

Тема №9	Вопрос 5. Основы порошковой металлургии.....	47
	<b>Основы технологии получения неразъёмных соединений.</b>	
	Вопрос 1. Пайка металлов, её общая характеристика и физическая сущность.....	49
	Вопрос 2. Газокислородная резка металлов, её общая характеристика, физическая сущность.....	50
	Вопрос 3. Процесс обработки материалов резанием: общая характеристика, виды, область применения.....	52
	Литература.....	57

## **Тема №1 Введение. Общие сведения о металлах, сплавах и неметаллических материалах**

### **Вопрос 1. Несовершенства кристаллического строения**

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, то есть, имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы называются зёрнами. Они имеют неправильную форму и различно ориентированы в пространстве. Каждое зерно имеет свою ориентировку кристаллической решётки, отличную от ориентировки соседних зёрен, вследствие чего свойства реальных металлов (как кристаллических тел) усредняются, и явления анизотропии не наблюдается.

В кристаллической решётке реальных металлов имеются различные дефекты (несовершенства, нарушения строгого расположения атомов), которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов.

**По геометрическим признакам различают следующие структурные несовершенства (дефекты) кристаллического строения:**

- 1) *точечные* — малые во всех трёх измерениях;
- 2) *линейные* — малые в двух измерениях и сколь угодно протяжённые в третьем;
- 3) *поверхностные* — малые в одном измерении.

#### **Точечные дефекты**

Точечные дефекты являются одними из наиболее распространённых несовершенств кристаллического строения металлов. К точечным дефектам относятся: вакансии, межузельные (дислоцированные) атомы, наличие в узлах кристаллической решётки атомов примесей (рис. 1).

*Вакансия* — это отсутствие атомов в узлах кристаллической решётки, «дырки» (незанятые атомами места в ячейках кристаллической решётки) (рис. 1а).

Образуются вакансии при переходе атомов с поверхности в окружающую среду или из узлов решётки на поверхность (границы зёрен, пустоты, трещины и т. д.), в результате пластической деформации, при бомбардировке тела атомами или частицами высоких энергий (облучение в циклотроне или нейтронное облучение в ядерном реакторе). Число вакансий увеличивается с повышением температуры, при обработке давлением, облучении и других видах воздействия. Скопление многих вакансий может привести к образованию пор и пустот.

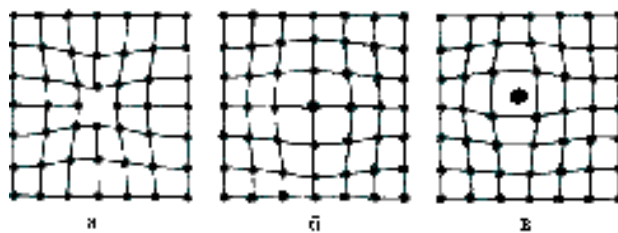


Рис. 1. Точечные дефекты.

*Атомы примесей* (примесные атомы) всегда присутствуют в металле, так как практически невозможно выплавить химически чистый металл. Они располагаются в узлах решётки или междоузлиях и могут иметь размеры больше или меньше размеров основных атомов (рис. 1б, 1в).

*Дислоцированный (межузельный) атом* — это атом, вышедший из узла решётки и занявший место в междоузлии (рис. 1б). Межузельные дефекты образуются в результате перехода атома из узла в междоузлие кристаллической решётки.

Точечные дефекты вызывают внутренние напряжения и незначительные искажения кристаллической решётки, что приводит к изменению физико-механических свойств тела (прочности, электропроводности, магнитных свойств и т. д.).

### Линейные дефекты

Основными линейными дефектами являются дислокации.

*Дислокации* — это линейные дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей (рис. 2). Для дислокаций характерно наличие лишних атомов, находящихся в междоузлиях.

Различают два вида дислокаций — *краевые* и *винтовые* (см. рис. 2).

*Краевая дислокация* представляет собой местное искажение кристаллической решётки, линию, вдоль которой внутри кристалла обрывается край «лишней» полуплоскости (рис. 2.). Неполная плоскость называется *экстраплоскостью* (рис. 2б).

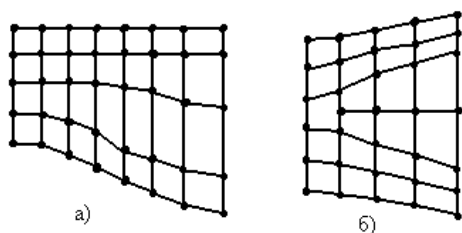


Рис. 2. Дислокации: а- краевая; б- экстраплоскость.

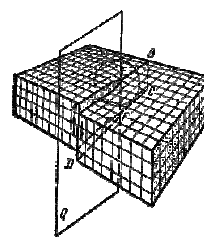


Рис. 3. Механизм образования винтовой дислокации.

*Винтовая дислокация* образуется при помощи частичного сдвига кристалла по плоскости  $Q$  вокруг линии  $EF$  (рис. 3) На поверхности кристалла образуется ступенька, проходящая от точки  $E$  до края кристалла. Такой частичный сдвиг нарушает параллельность атомных слоёв, кристалл превращается в одну атомную плоскость, закрученную по винту в виде полого геликоида вокруг линии  $EF$ , которая представляет границу, отделяющую часть плоскости скольжения, где сдвиг уже произошёл, от части, где сдвиг не начинался.

Дислокации образуются при термической и химико-термической обработках, в процессе кристаллизации, пластической деформации и других видах воздействия на структуру металлов и сплавов.

## Вопрос 2. Влияние несовершенств кристаллического строения на механические свойства материалов

Дислокационная структура материала характеризуется *плотностью дислокаций*. Она является характеристикой, непосредственно влияющей на сопротивление материала пластической деформации.

Плотность дислокации в значительной мере определяет такие механические свойства, как пластичность и прочность материала.

Дислокации влияют не только на прочность и пластичность, но и на другие свойства кристаллов. С увеличением плотности дислокаций возрастает внутреннее трение (вязкость), изменяются оптические свойства, **повышается электросопротивление металла**. Дислокации увеличивают среднюю скорость диффузии в кристалле, **ускоряют старение** и другие процессы, уменьшают химическую стойкость, поэтому в результате обработки поверхности кристалла специальными веществами в местах выхода дислокаций образуются ямки.

Дислокации образуются при образовании кристаллов из расплава или газообразной фазы, при срастании блоков с малыми углами разориентировки.

## Тема №2 Физико-механические свойства материалов и методы их определения

### Вопрос 1. Физические свойства материалов

#### Плотность

*Плотность* ( $\rho = m/V$ , г/см<sup>3</sup>) является одной из важнейших характеристик металлов и сплавов, численно равная отношению массы однородного тела к его объёму. По плотности металлы делят на следующие группы:

- лёгкие (плотностью не более 5 г/см<sup>3</sup>) — Mg, Be, Al, Ti и др.;
- тяжёлые (плотностью от 5 до 10 г/см<sup>3</sup>) — Fe, Ni, Cu, Zn, Sn и др. (это наиболее обширная группа);
- очень тяжелые (плотностью более 10 г/см<sup>3</sup>) — Mo, W, Au, Pb и др.

Самый легкий металл — литий Li ( $\rho = 0,53$  г/см<sup>3</sup>), самый тяжёлый — осмий Os ( $\rho = 22,6$  г/см<sup>3</sup>).

Важность плотности как физической характеристики материала обусловлена использованием установок в таких отраслях промышленности, как судостроение, транспортное машиностроение и особенно авиационная и ракетно-космическая техника. Для таких объёмов одним из решающих условий применения является минимизация массы технического объекта.

#### Температура плавления

*Температура плавления*  $T_{пл}$ , °C характеризует переход металла из твёрдого состояния в жидкое.

Температура плавления  $T_{пл}$  и равная ей температура затвердевания — характерный признак конкретного вещества.

Физическая сущность процесса плавления состоит в следующем. При плавлении нарушается порядок в расположении атомов, существующий в твёрдом состоянии, — происходит разрушение пространственной кристаллической решётки. В кристаллическом теле атомы совершают колебательные движения около своих положений равновесия. С повышением температуры амплитуда их колебаний возрастает (происходит повышение внутренней энергии тела) и достигает некоторой критической величины, после чего кристаллическая решётка разрушается. В свою очередь для разрушения кристаллической решётки требуется дополнительная тепловая энергия, поэтому в процессе плавления температура не повышается до тех пор, пока не произойдет разрушения всей кристаллической решётки тела, несмотря на то, что тепло продолжает поступать.

Температура плавления  $T_{\text{пл}}$ , подобно температуре кипения, зависит от давления. Для веществ, у которых увеличивается объём при плавлении, повышение давления снижает температуру плавления  $T_{\text{пл}}$ , и наоборот.

**В зависимости от температуры плавления металлы подразделяются на следующие группы:**

- легкоплавкие (температура плавления не превышает  $600^{\circ}\text{C}$ ) — Zn, Sn, Pb и др.;
- среднеплавкие (от  $600$  до  $1600^{\circ}\text{C}$ ). К ним относится почти половина металлов, в том числе Mg, Al, Fe, Ni, Cu, Au;
- тугоплавкие (более  $1600^{\circ}\text{C}$ ) — W, Mo, Ti, Cr и др.

Самым легкоплавким металлом является ртуть Hg ( $T_{\text{пл}} = -39^{\circ}\text{C}$ ). Цезий Cs и галлий Ga плавятся в руках. Самым тугоплавким металлом является вольфрам W ( $T_{\text{пл}} = 3390^{\circ}\text{C}$ ), поэтому он применяется для изготовления нитевидных спиралей электроламп.

### Удельная теплоёмкость

*Теплоёмкость* — способность материала при нагревании поглощать определённое количество тепла, а при остывании его отдавать.

*Удельная теплоёмкость*  $C_p$ , ( $\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$ ) или ( $\text{Дж/кмоль}\cdot\text{K}$ ) — это количество энергии (теплоты), необходимое для повышения температуры единицы массы тела на один градус

$$C_p = \frac{Q}{m \Delta t},$$

где  $m$  — масса материала, кг;

$\Delta t$  — разность температур материала до и после нагревания, K;

$Q$  — количество теплоты, переданное образцу.

Удельная теплоёмкость  $C_p$  уменьшается с увеличением порядкового номера элемента в таблице Менделеева.

Удельные теплоёмкости разных металлов различны и, как правило, значительно меньше, чем у других веществ, благодаря хорошей теплопроводности. Например, у алюминия Al  $C_p = 880 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ ; у железа Fe  $C_p = 460 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ ; у меди Cu  $C_p = 385 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ ; свинца Pb  $C_p = 130 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ .

Удельная теплоёмкость  $C_p$  слабо растёт с повышением температуры и сильно меняется при фазовых превращениях. Известно также, что при высоких температурах теплоёмкость металлов и других кристаллических тел почти не изменяется и близка к постоянному значению. С понижением температуры теплоёмкость начинает быстро падать. Вблизи абсолютного нуля теплоёмкость всех тел стремится к нулю. При криогенных температурах даже малое количество теплоты существенно изменяют температуру материала.

### Теплопроводность и температуропроводность

*Теплопроводность*  $\lambda$ , ( $\text{кВт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) (или  $\text{Дж/м}\cdot\text{с}\cdot\text{K}$ ) характеризует скорость передачи тепловой энергии от одной части тела к другой (молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры). При этом теплопроводность не сопровождается перемещением составляющих тело частиц. Как ранее было сказано, хорошая теплопроводность металлов обусловлена высокой подвижностью свободных электронов и колебательным движением ионов. Теплопроводность  $\lambda$  является мерой быстроты выравнивания температур различных точек тела, или мерой количества переносимого тепла при заданной разности температур в различных точках тела. Чем больше теплопроводность  $\lambda$ , тем скорее тело приближается к состоянию теплового равновесия. Чем выше теплопроводность  $\lambda$ , тем равномернее распределение температуры по объёму тела.

*Коэффициент теплопроводности*  $\lambda$  характеризует количество тепла, проходящего через материал толщиной 1 м, через площадь поверхности  $1 \text{ м}^2$ , за время 1 с, при разности температур на противоположных поверхностях 1 K

$$\lambda = \frac{Q\tau}{\delta S \Delta t},$$

где  $Q$  — тепло, переданное от обогреваемой поверхности к более холодной;  
 $\delta$  — толщина образца (изделия), мм;  
 $S$  — площадь обогреваемой поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $\Delta t$  — разность температур противоположных поверхностей образца, °C (K);  
 $\tau$  — время, с.

Числовые значения коэффициента теплопроводности зависят от вида материала.

Известен ряд металлов по мере увеличения теплопроводности: Pb, Fe, Sn, Zn, Mg, Al, Au, Cu, Ag.

*Температуропроводность* — способность образца материала (изделия) изменять температуру при нагревании (охлаждении). Температуропроводность характеризуется коэффициентом температуропроводности  $\alpha$  (м<sup>2</sup>/с).

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры материала и может быть определён по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \rho} ;$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала;

$C_p$  — удельная теплоёмкость материала;

$\rho$  — удельный вес материала.

### Электропроводность

*Электропроводность*  $\gamma$  характеризует способность материала проводить электрический ток. Известно, что металлы хорошо проводят электрический ток. Хорошая *электропроводность* металлов объясняется наличием в них свободных электронов, обладающих большой подвижностью, которые под влиянием даже небольшой разности потенциалов способны перемещаться от отрицательного полюса к положительному.

На электропроводность металлов оказывает влияние температура. С повышением температуры усиливаются колебания ионов и атомов металлов, что затрудняет перемещение электронов по проводнику (металлу) и тем самым приводит к снижению электропроводности. При низких температурах колебательное движение ионов и атомов кристаллической решётки проводника, наоборот, сильно уменьшается и электропроводность резко возрастает. Уже вблизи абсолютного нуля (–273,15°K) сопротивление металлов практически отсутствует.

Лучшим проводником электрического тока является серебро (Ag), за которым следуют медь (Cu), золото (Au), алюминий (Al), железо (Fe). Наряду с медными изготавливаются и алюминиевые электрические провода (кабели).

### Тепловое расширение материалов

Тепловое расширение твёрдых материалов характеризуется коэффициентами линейного и объёмного теплового расширения.

*Коэффициент теплового линейного расширения*  $\alpha$ , град<sup>-1</sup> — величина, характеризующая изменение размеров образца длиной 1 м при нагревании на 1°С. Он может быть определён по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t} ,$$

где  $\Delta l$  — разность длин образца материала до и после нагрева, м;

$l_0$  — начальная длина образца, м;

$\Delta t$  — разность температур, К.

*Коэффициент объёмного теплового расширения*  $\beta$  — относительное изменение объёма образца материала при изменении его температуры на 1 К

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t} ,$$



где  $\Delta V$  — разность объёмов образца до и после нагрева, м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  — разность температур, К;

$V_0$  — начальный объём образца, м<sup>3</sup>.

Причиной расширения твёрдых тел при нагревании является возрастание амплитуды тепловых колебаний атомов кристаллической решётки около положений равновесия.

Термическое расширение является одним из наиболее важных свойств конструкционных материалов, применяемых в криогенной технике. Показателями термического расширения материалов являются температурные коэффициенты объёмного и линейного расширения.

Знание коэффициентов теплового расширения конструкционных материалов позволяет при проектировании избежать типичные ошибки. Так, различные значения коэффициентов теплового расширения сопряжённых деталей могут привести к возникновению внутренних напряжений, в результате чего может произойти разрушение всей конструкции.

### Отражательная способность

*Отражательная способность* — это способность металла отражать световые волны определенной длины, которая воспринимается человеческим глазом как цвет. Цвет металлов: Mg — бело-серый, Al — серовато-белый, Fe — голубовато-белый, Au — жёлтый, Ag — белый и т. д.

Характерный металлический блеск металлов обусловлен взаимодействием электромагнитных световых волн со свободными электронами металлов.

## Вопрос 2. Влияние температуры на изменение механических свойств материалов

Повышенные температуры оказывают существенное влияние на такие механические характеристики конструкционных материалов, как ползучесть и длительная прочность. *Ползучестью* называют медленное непрерывное возрастание пластической (остаточной) деформации под воздействием постоянных нагрузок. *Длительной прочностью* называется зависимость разрушающих напряжений (временного сопротивления) от длительности эксплуатации. Свойства ползучести и длительной прочности проявляются у углеродистых сталей при  $T > 300^\circ\text{C}$ , для легированных сталей при  $T > 350^\circ\text{C}$ , для алюминиевых сплавов при  $T > 100^\circ\text{C}$ . Некоторые материалы проявляют эти свойства и при обычных температурах.

Мерой оценки ползучести материала является *предел ползучести* — напряжение, при котором пластическая деформация за определенный промежуток времени достигает заданной величины. В некоторых случаях сопротивление ползучести оценивается величиной скорости деформации по прошествии заданного времени. При обозначении предела ползучести указывается величина деформации, время и температура испытаний. Например, для жаропрочного сплава ХН77ТЮР при температуре  $700^\circ\text{C}$  за время 100 часов и деформации ползучести 0,2% предел ползучести составляет 400 МПа:

$$\sigma_{0,2\text{лп}}(700) = 400 \text{ МПа}$$

Прочность материала при повышенных температурах оценивается *пределом длительной прочности* — напряжением, при котором материал разрушается не ранее заданного времени. При обозначении предела длительной прочности указывается продолжительность нагружения и температура испытания. Так, для сплава ХН77ТЮР при температуре  $700^\circ\text{C}$  и времени 1000 часов предел длительной прочности составляет  $\sigma_{\text{длп}}(700) = 330 \text{ МПа}$ .

## Вопрос 3. Неразрушающие методы исследования механических свойств металлов и сплавов.

### Определение твёрдости материалов

*Твёрдость* — это механическое свойство материала, показывающее его способность сопротивляться проникновению в него другого, более твёрдого материала (тела). Более

твёрдое тело является стандартным и называется *индентором*. Индентор не деформируется при испытании.

Твёрдость материала отражает его прочность и пластичность. Испытание на твёрдость считается самым доступным и распространённым видом механических испытаний. Наибольшее применение получили статические методы испытания на твёрдость при вдавливании индентора: метод Бринелля, метод Виккерса и метод Роквелла. Схемы испытания материалов на твёрдость по данным методам представлены на рис. 1.

Широкое распространение эти методы испытаний получили в силу того, что для этого не требуются специальные образцы. Это неразрушающие методы контроля, основные методы оценки качества проведённой термической обработки изделий, контактной прочности и износостойкости поверхностей деталей машин. О твёрдости судят либо по диаметру отпечатка от вдавливания шарика (метод Бринелля, рис. 1а), либо по глубине вдавливания в материал алмазного конуса (метод Роквелла, рис. 1б), или по диагонали отпечатка алмазной пирамиды (метод Виккерса, рис. 1в). Количественной оценкой твёрдости является число твёрдости, равное отношению прикладываемой нагрузки  $P$  (Н, кГ) к площади поверхности отпечатка  $F$  (мм<sup>2</sup>).

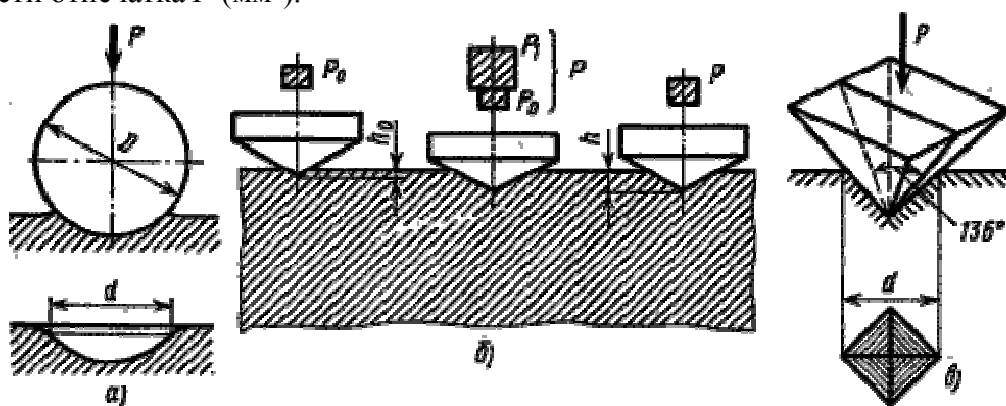


Рис. 1. Схемы определения твёрдости:

а — по Бринеллю; б — по Роквеллу; в — по Виккерсу

Во всех случаях испытания происходит пластическое деформирование материала. Соответственно, чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем выше его твёрдость.

### Определение твёрдости материалов по методу Бринелля

Испытание материалов на твёрдость проводят на твердомере Бринелля. Твёрдость материала определяется путём вдавливания в материал образца стального закалённого или твёрдосплавного шарика, служащего в качестве индентора — более твёрдого тела (рис. 1а).

Твёрдость по Бринеллю  $HB$  (в Н/мм<sup>2</sup> или в кГ/мм<sup>2</sup>) определяется как отношение приложенной нагрузки  $P$  к площади сферической поверхности отпечатка  $F$  шарика:

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad [H/мм^2]$$

где  $d$  — диаметр сферического отпечатка, измеренный после снятия нагрузки, мм;  $D$  — диаметр шарика (индентора), мм.

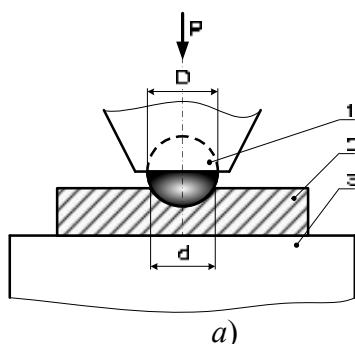


Рис. 2. Схема испытаний материалов на твердость по методу Бринелля:  
1 — индентор; 2 — образец из испытываемого материала; 3 — опорный столик пресса Бринелля.

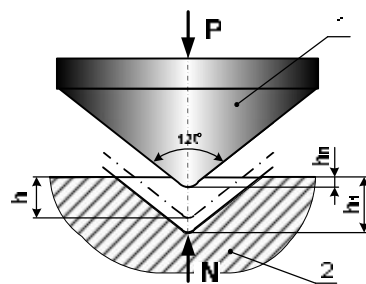


Рис. 3. Схема определения твердости по методу Роквелла при вдавливании в испытываемый образец алмазного конуса:  $h_0$  — углубление конуса под действием предварительной нагрузки  $P_0 = 100$  Н;  $h_1$  — углубление конуса под действием общей нагрузки  $P = P_0 + P_1$ ;  $h$  — глубина остаточного вдавливания индентора после снятия нагрузки  $P$ ;  $N$  — сила реакции опоры от действия прикладываемой нагрузки  $P$ ; 1 — индентор (конус); 2 — испытываемый образец.

Чем тверже материал, тем выше число твердости *HB* (*Hardness Brinelle*).

Диаметр шарика  $D$  может быть различным, в зависимости от толщины испытываемого образца. Для определения твердости металлических материалов рекомендуется применять стальные шарики следующих диаметров — 2,5; 5 и 10 мм для испытания на твердость образцов толщиной соответственно до 3; 6 и более 6 мм. Для шариков разного диаметра выбирают определенную нагрузку вдавливания  $P$  и время выдержки  $\tau$  под этой нагрузкой.

### Определение твердости материалов по методу Роквелла

При определении числа твердости по методу Роквелла в поверхность материала испытываемого образца вдавливают наконечник (индентор) под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок — предварительной 100 Н и основной (предварительная + основная = общая 600, 1000 или 1500 Н). Согласно этому методу, за условную меру твердости принимается глубина отпечатка.

В качестве наконечников для твердых материалов применяют алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$ ; для мягких материалов (до *HB* 230) — стальной закаленный шарик диаметром 1/16" ( $\varnothing 1,588$  мм). Последовательность испытаний при разных инденторах одна и та же.

Нагружение осуществляется в два этапа. Сначала прикладывается предварительная нагрузка  $P_0 = 100$  Н (10 кгс) для плотного соприкосновения наконечника с испытываемым образцом. Под действием этой нагрузки ( $P_0$ ) индентор вдавливается на глубину  $h_0$  (рис. 3). Затем прикладывается основная нагрузка  $P_1$ , и в течение некоторого времени действует общая (окончательная) рабочая нагрузка  $P = P_0 + P_1$ . Под действием общей нагрузки  $P$  индентор вдавливается на глубину  $h_1$  (рис. 3). После снятия основной нагрузки  $P_1$  оставляют предварительную нагрузку  $P_0$ . При этом под действием упругой деформации индентор поднимается вверх до уровня  $h$ , но не достигает уровня  $h_0$ . Разность глубин  $(h - h_0)$  зависит от твердости материала; чем тверже материал, тем меньше эта разность.

Значение твердости определяют по глубине остаточного вдавливания наконечника  $h$  под нагрузкой  $P$  (рис. 3). Глубину отпечатка измеряют индикатором часового типа, установленного на приборе с ценой деления 0,002 мм.

Число твёрдости, определённое методом Роквелла, обозначается символом  $HR$ . Однако в зависимости от формы индентора, значений нагрузок вдавливания и природы испытуемого материала символу добавляется буква  $A$ , или  $C$ , или  $B$ , обозначающая соответствующую шкалу измерения.

### Определение твёрдости материалов по методу Виккерса

Как и в случае измерения твёрдости по Бринеллю твёрдость здесь также определяется по величине отпечатка.

В качестве индентора при испытании в материал вдавливается алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине  $136^\circ$ . При этом применяют нагрузки  $P$  от 50 до 1200 Н (5...120 кгс). После снятия нагрузки на образце остается отпечаток от внедрённой пирамиды (рис. 1,4). После снятия нагрузки вдавливания измеряется диагональ отпечатка  $d_1$  (рис. 4).

Твёрдость по Виккерсу  $HV$  представляет собой нагрузку, приходящуюся на единицу поверхности отпечатка, и определяется как отношение приложенной нагрузки  $P$  к площади поверхности пирамидального отпечатка  $F$ :

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d_1^2} = 1,8544 \frac{P}{d_1^2},$$

где  $P$  — нагрузка (составляет 5...120 кгс);  $d_1$  — диагональ отпечатка (измеряется при помощи микроскопа, установленного на приборе);  $\alpha = 136^\circ$  — угол при вершине пирамиды.

Число твёрдости по Виккерсу обозначается  $HV$  с указанием нагрузки  $P$  и времени выдержки под нагрузкой. Размерность числа твёрдости (кгс/мм<sup>2</sup>) не ставится. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для сталей 10 – 15 с, а для цветных металлов — 30 с. Например,  $450 HV_{10/15}$  означает, что число твёрдости по Виккерсу 450 получено при  $P = 10$  кгс (98,1 Н), приложенной к алмазной пирамиде в течение 15 с.

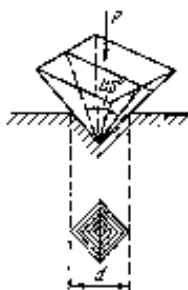


Рис. 4. Схема испытаний на твёрдость по Виккерсу.

## Тема №3. Основы теории сплавов

### Вопрос 1. Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо (Fe), углерод (C) и цементит (Fe<sub>3</sub>C).

**Железо (Fe)** — металл серебристо-светлого цвета. Имеет высокую температуру плавления —  $1539^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ .

В твёрдом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения происходят при температурах  $911^\circ\text{C}$  и  $1392^\circ\text{C}$ . При температуре ниже  $911^\circ\text{C}$  существует  $\alpha$ -железо (Fe <sub>$\alpha$</sub> ), обладающее объёмно-центрированной кубической решёткой. В интервале температур  $911 \div 1392^\circ\text{C}$  устойчивым является  $\gamma$ -железо (Fe <sub>$\gamma$</sub> ), обладающее гранцентрированной кубической решёткой. Выше  $1392^\circ\text{C}$  железо имеет объёмно-центрированную кубическую решётку и называется  $\delta$ -железо (Fe <sub>$\delta$</sub> ) или высокотемпературное  $\alpha$ -железо (Fe <sub>$\alpha$</sub> ).

При температуре ниже 768°C железо ферромагнитно, а выше — парамагнитно. Точка Кюри железа — температура изменения магнитных свойств железа, соответствует 768°C и обозначается  $A_2$ .

Железо технической чистоты обладает невысокой твёрдостью (80HB) и прочностью (предел прочности  $\sigma_b$  — 250 МПа, предел текучести  $\sigma_t$  — 120 МПа) и высокими характеристиками пластичности (относительное удлинение  $\delta = 50\%$ , а относительное сужение  $\psi = 80\%$ ). Свойства могут изменяться в некоторых пределах в зависимости от величины зерна.

Железо (Fe) характеризуется высоким модулем упругости  $E$ , которым характеризуются и сплавы на его основе, благодаря чему обеспечивается высокая жёсткость и прочность деталей из этих сплавов.

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами — твёрдые растворы замещения, с углеродом (C), азотом (N) и водородом (H) — твёрдые растворы внедрения.

**Углерод (C)** относится к неметаллам. Он обладает явлением полиморфизма. В зависимости от условий образования углерод (C) может существовать в форме графита с гексагональной слоистой кристаллической решёткой (температура плавления — 3500°C, плотность —  $\rho = 2,25 \text{ г/см}^3$ ) или в форме алмаза со сложной кубической решёткой (температура плавления — 5000°C). Графит является мягким материалом и обладает низкой прочностью. Однако с увеличением температуры прочность графита аномально растёт: при 20°C  $\sigma_b = 20 \text{ МПа}$ , а при 2500°C  $\sigma_b = 40 \text{ МПа}$ . При 2500°C графит прочнее всех тугоплавких металлов.

В сплавах с железом углерод образует либо твёрдые растворы внедрения, либо химическое соединение — цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Также углерод (C) может находиться в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

В системе «железо (Fe) – углерод (C)» существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит ( $\Phi$ ), аустенит ( $A$ ), цементит ( $\Pi$ ), графит (C).

**Жидкая фаза.** В жидком состоянии железо (Fe) хорошо растворяет углерод (C) в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

**Феррит ( $\Phi$ )** — твёрдый раствор внедрения углерода (C) в  $\alpha$ -железе ( $\text{Fe}_\alpha$ ).

Феррит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную — 0,006% при комнатной температуре (точка  $Q$ ), максимальную — 0,02% при температуре 727°C (точка  $P$ ). Углерод (C) располагается в дефектах кристаллической решётки железа (Fe).

При температуре выше 1392°C существует высокотемпературный феррит с предельной растворимостью углерода (C) в  $\delta$ -железе ( $\text{Fe}_\delta$ ) — 0,1% при температуре 1499°C (точка  $H$ ).

Свойства феррита близки к свойствам железа (Fe). Он мягок (твёрдость — 130 HB, предел прочности —  $\sigma_b = 300 \text{ МПа}$ ) и пластичен (относительное удлинение —  $\delta = 30\%$ ), обладает магнитными свойствами до температуры 768°C.

**Аустенит ( $A$ )** — твёрдый раствор внедрения углерода (C) в  $\gamma$ -железе ( $\text{Fe}_\gamma$ ).

В аустените углерод (C) занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки. Аустенит имеет переменную предельную растворимость углерода (C): минимальную — 0,8% при температуре 727°C (точка  $S$ ), максимальную — 2,14% при температуре 1147°C (точка  $E$ ).

Аустенит имеет твёрдость 200...250HB, пластичен (относительное удлинение его составляет  $\delta = 40...50\%$ ), обладает парамагнитными свойствами.

И в феррите и в аустените могут растворяться многие легирующие элементы, образуя твёрдые растворы замещения и резко изменяя их свойства. Кроме того, легирование может значительно изменять температурные границы существования фаз.

**Цементит ( $\Pi$ )** — химическое соединение железа (Fe) с углеродом (C) (карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )), содержащее 6,67% углерода (C).

Цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) не испытывает полиморфных превращений при изменении температуры. Кристаллическая решётка цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу.

Температура плавления цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) точно не установлена (по разным данным она составляет  $1250^\circ\text{C}$  или  $1600^\circ\text{C}$ ). При низких температурах цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) слабо ферромагнитен. Магнитные свойства он теряет при температуре около  $217^\circ\text{C}$ .

Цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) имеет высокую твёрдость (более 800 НВ, легко царапает стекло), но очень низкую, практически нулевую, пластичность. Такие свойства являются следствием сложного строения кристаллической решётки цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). С химическими элементами цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) способен образовывать твёрдые растворы замещения. Атомы углерода (С) могут замещаться атомами неметаллов: азотом (N), кислородом (O); атомы железа (Fe) — металлами: марганцем (Mn), хромом (Cr), вольфрамом (W) и др. Такой твёрдый раствор на базе решётки цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) получил название *легированный цементит*.

Цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) — соединение неустойчивое и при нагреве распадается с образованием свободного углерода (С) в виде графита. Этот процесс имеет важное практическое значение при структурообразовании чугунов.

В железоуглеродистых сплавах выделяют три вида цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) в зависимости от температуры образования: цементит первичный ( $\text{C}_I$ ), цементит вторичный ( $\text{C}_{II}$ ), цементит третичный ( $\text{C}_{III}$ ).

**Ледебурит (Л)** — механическая эвтектическая смесь (эвтектика) кристаллов аустенита *A* и цементита *C* в интервале температур  $727 - 1147^\circ\text{C}$ , и перлита *П* (см. и цементита *C* при температурах ниже  $727^\circ\text{C}$ , содержащая 4,3% углерода (С)).

## Вопрос 2. Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов. Структуры железоуглеродистых сплавов

Преобразование аустенита в перлитные структуры происходит при медленном охлаждении, связано с диффузией углерода (С), сопровождается полиморфным превращением  $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$ , выделением углерода (С) из аустенита, образованием химического соединения — цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) и его распределением по объёму материала. Условно данное превращение можно записать следующим образом:



**Перлит** образуется при переохлаждении аустенита до температуры  $T = 727 \dots 650^\circ\text{C}$  при скорости охлаждения  $V_{\text{охл.}} = 30 \dots 50^\circ\text{C}/\text{с}$ . Его образование возможно при малых степенях переохлаждения  $\Delta T$  ниже линии *PSK* диаграммы «Fe-Fe<sub>3</sub>C» в области температур  $727 - 650^\circ\text{C}$ . Структура характеризуется твёрдостью порядка  $180 \dots 250 \text{HB}$  и степенью дисперсности пластинок цементита —  $\Delta_0 \approx (0,5 \dots 0,7) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

**Сорбит** образуется при переохлаждении аустенита до температуры  $T = 650 \dots 600^\circ\text{C}$  при скорости охлаждения  $V_{\text{охл.}} = 50 \dots 60^\circ\text{C}/\text{с}$ . Структура характеризуется твёрдостью порядка  $250 \dots 350 \text{HB}$ , степенью дисперсности пластинок цементита —  $\Delta_0 \approx (0,1 \dots 0,5) \cdot 10^{-8} \text{ м}$ , высоким пределом упругости, достаточной вязкостью и прочностью. Стали со структурой сорбита имеют наибольшую пластичность. Структура названа в честь учёного Г. Сорби.

**Троостит** образуется при переохлаждении аустенита до температуры  $T = 600 \dots 550^\circ\text{C}$  при скорости охлаждения  $V_{\text{охл.}} = 60 \dots 100^\circ\text{C}/\text{с}$ . Твёрдость структуры составляет порядка  $350 \dots 450 \text{HB}$ , степень дисперсности пластинок цементита —  $\Delta_0 \approx 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . Структура характеризуется высоким пределом упругости, малой вязкостью и пластичностью. Структура названа в честь учёного Труста.

**Мартенсит** — пересыщенный метастабильный твёрдый раствор внедрения углерода (С) в  $\alpha$ -железе ( $\text{Fe}_\alpha$ ). Характеризуется искажённой кристаллической решёткой, что вызвано избыточным количеством внедрённых атомов углерода, большой плотностью дислокаций, и высокой твёрдостью ( $\text{HRC}60 - 65$ ). Образуется мартенсит при скорости охлаждения  $150 - 200^\circ\text{C}/\text{с}$ . Скорость роста кристаллов мартенсита очень велика и достигает  $1000 \text{ м/с}$ . Мартенсит имеет наибольший удельный объём по сравнению с другими структурными составляющими сталей, особенно с аустенитом, и обладает магнитными

свойствами. Он является основной структурной составляющей закалённых сталей и определяет их свойства. Структура мартенсита названа в честь немецкого учёного-металлурга А. Мартенса (1850 – 1914 гг.).

## **Тема №4 Железоуглеродистые сплавы**

### **Вопрос 1. Легированные стали, их классификация, маркировка и область применения**

Легированные стали классифицируются по структуре в равновесном состоянии, по структуре после охлаждения на воздухе, по количеству легирующих элементов и по назначению.

**По равновесной структуре легированные стали разделяют на:**

- 1) доэвтектоидные (содержат избыточное количество феррита в структуре);
- 2) эвтектоидные (имеют перлитную структуру);
- 3) заэвтектоидные (с избыточными карбидами в структуре);
- 4) ледебуритные стали (в структуре присутствуют первичные карбиды, выделившиеся из жидкой фазы).

**По структуре после охлаждения на воздухе (нормализации) различают следующие легированные стали:**

- 1) перлитные стали (характеризуются невысокой устойчивостью переохлаждённого аустенита);
- 2) мартенситные стали (характеризуются высокой устойчивостью аустенита);
- 3) аустенитные стали (сохраняют аустенитную структуру при комнатной температуре).

**По количеству легирующих элементов различают стали:**

- 1) низколегированные (содержат до 2,5% легирующих элементов);
- 2) среднелегированные (содержат 2,5 – 10% легирующих элементов);
- 3) высоколегированные (содержат более 10% легирующих элементов).

**По назначению различают три группы легированных сталей:**

- 1) конструкционные (машиностроительные и строительные);
- 2) инструментальные (штамповые, для режущего и измерительного инструмента);
- 3) стали с особыми физическими и химическими свойствами (коррозионностойкие, жаропрочные, электротехнические, магнитные и др.).

### **Маркировка легированных сталей**

В нашей стране принята буквенно-цифровая система маркировки легированных сталей. Каждая марка стали содержит определённое сочетание букв и цифр.

В маркировке легированных сталей приняты следующие буквенные обозначения легирующих элементов:

А — азот (N); Т — титан (Ti); С — кремний (Si); Ф — ванадий (V); Х — хром (Cr); К — кобальт (Co); Д — медь (Cu); П — фосфор (P); В — вольфрам (W); Н — никель (Ni); Ю — алюминий (Al); Е — селен (Se); Ц — цирконий (Zr); М — молибден (Mo); Г — марганец (Mn); Р — бор (B), Б — ниобий (Nb). Эти буквы в сочетании с цифрами образуют марку стали и дают её характеристику.

Для марок конструкционных легированных сталей первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента. Начальную цифру опускают, если содержание углерода С около 1% и более. Если содержание легирующего элемента больше 1%, то после буквы, указывающей химический элемент, указывается его среднее значение в целых процентах. Если содержание легирующего элемента меньше или около 1%, то после соответствующей буквы цифра не ставится. Буква А в конце маркировки обозначает, что данная сталь высококачественная, содержащая меньше вредных примесей (серы S и фосфора P). Например, 12Х2Н4А — это легированная сталь, высококачественная, с содержанием 0,12% С, 2% Cr, 4% Ni; сталь Г13 — легированная сталь с содержанием 1% С и более, 13% Mn. Для групп специальных сталей, обозначенных в начале маркировки одной буквой Р, Ш, Е, Э принятые правила маркировки не подходят. О них будет рассказано ниже.

## Распределение легирующих элементов и их влияние на свойства сталей

Легированные стали, благодаря наличию легирующих элементов, обладают ценнейшими свойствами, которых нет у углеродистых сталей, и не имеют их недостатков. Применение легированной стали экономит материал, повышает долговечность изделий, снижает массу, увеличивает производительность. В прогрессивной технике легированные стали имеют решающее значение.

Легирующие элементы оказывают следующее разностороннее влияние на свойства стали.

**Хром (Cr)** — содержится в сталях в количестве 0,8...1,2% и является основным легирующим элементом. Хром повышает прокаливаемость, способствует получению высокой и равномерной твёрдости стали, повышает твёрдость и коррозионную стойкость. Порог хладноломкости хромистых сталей — 0...–100°C;

**Никель (Ni)** — придаёт высокую прочность, пластичность и коррозионную стойкость сталям. Введение в хромистые стали никеля значительно повышает прочность и прокаливаемость, снижает порог хладноломкости, но при этом повышает склонность к отпускной хрупкости (этот недостаток компенсируется введением в сталь молибдена (Mo)). Хромоникелевые стали, обладают наилучшим комплексом свойств. Однако никель является дефицитным металлом, и применение таких сталей ограничено. Значительное количество никеля в сталях можно заменить медью (Cu), однако это не приводит к снижению их ударной вязкости;

**Вольфрам (W)** — увеличивает твёрдость и красностойкость (термостойкость);

**Ванадий (V)** — повышает плотность, прочность, сопротивление ударным нагрузкам и механическому износу. Ванадий, введённый в состав хромистых сталей в количестве 0,1...0,3% способствует измельчению зерна, повышает прочность и ударную вязкость;

**Кобальт (Co)** — повышает жаропрочность и магнитную проницаемость;

**Молибден (Mo)** — увеличивает красностойкость, механическую прочность, сопротивление окислению при высоких температурах; Введение молибдена в небольших количествах (0,15...0,46%) в хромистые стали увеличивает их прокаливаемость, снижает порог хладноломкости до –20...–120°C. Молибден способствует увеличению статической, динамической и усталостной прочности сталей, устраняет их склонность к внутреннему окислению. Кроме того, он снижает склонность к отпускной хрупкости сталей, содержащих никель (Ni).

**Магний (Mg)** — при содержании свыше 1% увеличивает твёрдость, износостойкость, сопротивление ударным нагрузкам;

**Марганец (Mn)** — увеличивает прокаливаемость стали, однако содействует росту зерна, и повышает порог хладноломкости до +40...–60°C;

**Титан (Ti)** — вводится в сталь в небольших количествах (~0,1%), способствует повышению прочности и коррозионной стойкости; в хромомарганцевые стали вводится для измельчения зерна;

**Алюминий (Al)** — повышает окалиностойкость;

**Бор (B)** — вводится в сталь в небольших количествах, увеличивает прокаливаемость стали, повышает порог хладноломкости +20...–60°C;

**Ниобий Nb** — повышает кислотостойкость;

**Медь (Cu)** — уменьшает коррозию;

**Кремний (Si)** — повышает ударную вязкость сталей и температурный запас вязкости. При легировании хромомарганцевых сталей кремнием получают, стали – хромансиль (20ХГС, 30ХГСА) (см. ниже). Эти стали обладают хорошим сочетанием прочности и вязкости, хорошо свариваются, штампуются и обрабатываются резанием.



## Область применения некоторых легированных сталей

Область применения конструкционной легированной стали очень велика. Наибольшее распространение получили следующие стали.

*Хромистые стали*, обладающие хорошей твёрдостью, прочностью, сравнительно недорогие. К ним относятся стали марок 15Х, 20Х, 30Х, 45Х, борсодержащие 40ХР, с цирконием 40ХЦ.

*Марганцевые стали*, например 15Г, 20Г, 40Г, 45Г2, отличающиеся износоустойчивостью. Особенно износоустойчива сталь марки Г13, которую применяют для гусениц тракторов, железнодорожных стрелок.

*Кремнистые и хромокремнистые стали* (33ХС, 55ХС), обладающие высокой твёрдостью и упругостью; применяются для пружин, рессор.

*Хромованадиевые стали* (45ХФ, 40ХФА) особо прочные, плотные, хорошо противостоящие истиранию, применяемые для автомобильных деталей, осей, валов.

*Хромомолибденовые стали* (20ХМА, 30ХМА) очень прочные, хорошо сваривающиеся, штампуемые, используемые для осей, роторов.

*Хромомарганцевокремнистые стали* — хромансиль (25ХГСА, 30ХГСА), которые заменяют хромомолибденовую сталь и значительно дешевле её.

*Хромоникелевые стали* (12Х2Н4А, 20ХН3А), очень прочные и пластичные; применяются для изготовления коленчатых валов, поршней, деталей турбин.

*Легированные инструментальные стали* (сталь 9ХС, сталь ХВГ) применяется для изготовления режущего, измерительного и ударно-штампового инструмента. Они твёрже и прочнее углеродистой стали, хорошо противостоят ударным нагрузкам.

Из легированных инструментальных сталей изготавливают:

1) режущий и измерительный инструмент — фрезы, свёрла, метчики, развёртки, лекала (основное применение для этого нашли стали марок 9ХС, ХГС, 9Х5ВФ, 85Х6НФТ);

2) штампы горячей штамповки, пресс-формы, формы для литья под давлением (основное применение для этого нашли стали марок 7Х3, 5ХНМ, 55ХГСЛ14Х8В2);

3) штампы холодной штамповки (основное применение для этого нашли стали марок Х6НФ, Х12ВМ, Х12Ф, 7Х12ВМ).

## Вопрос 2. Способы получения чугунов различных типов и их маркировка. Процесс графитизации. Факторы, способствующие графитизации

*Чугунами* называются сплавы железа (Fe) с углеродом (C), с содержанием углерода (C) от 2,14% до 6,67% (масс.).

По сравнению со сталями чугуны обладают пониженной температурой плавления и хорошими литейными свойствами. За счёт этого из чугунов можно делать отливки значительно более сложной формы, чем из сталей.

Выплавляют чугуны в доменных печах и вагранках. В литейном чугуне обычно содержится не более 4,0% углерода (C). Кроме углерода обязательно присутствуют примеси S, P, Mn, Si, причём в значительно большем количестве, чем в углеродистой стали. В отличие от сталей чугуны заканчивают кристаллизацию образованием эвтектики (ледебурита), определяющей их технологические свойства (хорошую жидкотекучесть), и обладают низкой способностью к пластической деформации. В обычных условиях чугуны не поддаются ковке.

*Белыми чугунами* называются чугуны, кристаллизующиеся по диаграмме «Fe-Fe<sub>3</sub>C», в которых весь углерод (или большая его часть) находится в химически связанном с железом состоянии в виде цементита (Fe<sub>3</sub>C). Их получают при высокой скорости охлаждения и наличии карбидообразующих элементов — Mn, Cr, S, W. В структуре белых чугунов имеется высокоуглеродистая эвтектика — *ледебурит* (C ≈ 4,3%) — механическая эвтектическая смесь аустенита и первичного цементита (Ц<sub>I</sub>) в интервале температур 1147°C – 727°C, и механическая эвтектическая смесь перлита и цементита при температурах ниже 727°C. Своё

название белые чугуны получил по виду излома, который имеет матово-белый цвет и обладает металлическим блеском. Белые чугуны из-за присутствия в них большого количества цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$  обладают высокой твёрдостью (HB 450 – 550) и хрупкостью, практически не поддаются обработке режущим инструментом. В зависимости от содержания углерода С белые чугуны по равновесной структуре разделяют на доэвтектические, эвтектический и заэвтектические.

Белые чугуны используются в основном как *передельные* — в качестве полуфабриката для производства стали и серого ковкого чугуна.

*Серыми чугунами* называются чугуны, кристаллизующиеся по диаграмме «железо (Fe) – графит (C)», в которых большая часть углерода (C) находится в структурно-свободном состоянии — в виде включений графита (C). Графит (C) является неметаллической фазой, поэтому графитные включения резко понижают прочность (особенно при растяжении) и пластичность чугунов, так как нарушают сплошность металлической основы. Степень понижения механических свойств обуславливается количеством и формой включений графита, а также их размерами и равномерностью распределения.

*Графитизацией* называется процесс выделения графита при кристаллизации или охлаждении сплавов железа (Fe) с углеродом (C). Графит может образовываться как из жидкой фазы при затвердевании чугуна, так и из твёрдой фазы. Образование графита происходит согласно диаграмме «железо (Fe) – графит (C)».

Так как графит содержит 100% углерода (C), а цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) — 6,67%, то жидкая фаза и аустенит по составу более близки к цементиту ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), чем к графиту (C). Следовательно, образование из жидкой фазы цементита и аустенита должно протекать легче, чем графита. Поэтому белые чугуны образуются при быстром охлаждении.

С другой стороны, при нагреве цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) разлагается на железо (Fe) и углерод (C). Следовательно, графит является более стабильной фазой, чем цементит.

#### **Возможны два пути образования графита в чугуне:**

1) Непосредственное образование графита из жидкой фазы. Такое образование возможно при наличии в жидкой фазе центров кристаллизации графита (центров графитизации) и при очень медленном охлаждении расплава.

2) При разложении ранее образовавшегося цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

Влияние скорости охлаждения на процесс графитизации обусловлено тем, что графитизация чугуна является диффузионным процессом и протекает медленно.

**Большая длительность процесса графитизации обусловлена необходимостью протекания следующих стадий:**

1) образования центров графитизации в жидкой фазе или аустените; 2) диффузии атомов углерода (C) к центрам графитизации; 3) роста выделений графита.

Структура чугунов зависит от степени графитизации, т. е. от того, сколько углерода находится в связанном и свободном состоянии.

## **Тема №5 Основы технологии термической и химико-термической обработки материалов**

### **Вопрос 1. Структурно-фазовые превращения в стали в результате термической обработки**

Любой вид термической обработки состоит из комбинации четырёх основных структурно-фазовых превращений, в основе которых лежат стремления системы к минимуму свободной энергии.

**К этим превращениям относятся:**

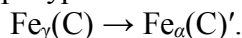
1) Превращение при нагреве перлита в аустенит ( $P \rightarrow A$ ), происходящее при нагреве выше критической температуры  $A_1$  (выше линии  $PSK$ ), при которой минимальной свободной энергией обладает аустенит  $A$



2) Превращение при медленном охлаждении аустенита в перлит ( $A \rightarrow P$ ), происходящее при охлаждении ниже температуры  $A_1$  (ниже линии  $PSK$ ), при которой минимальной свободной энергией обладает перлит:



3) Превращение при быстром охлаждении аустенита в мартенсит ( $A \rightarrow M$ ), происходящее при быстром охлаждении ниже температуры неустойчивого равновесия



4) Превращение мартенсита в перлитные структуры ( $M \rightarrow P$ ), происходящее при любых температурах, т. к. свободная энергия мартенсита больше, чем свободная энергия перлита



### Превращение перлита в аустенит

Согласно левой нижней части диаграммы железоуглеродистых сплавов при нагреве стали превращение перлита в аустенит происходит при температуре  $A_1$  (линия  $PSK$ , температура  $727^\circ C$ ). Превращение перлита в аустенит в точном соответствии с диаграммой состояния «Fe-Fe<sub>3</sub>C» происходит лишь при очень медленном нагреве. Превращение основано на диффузии углерода (C), сопровождается полиморфным превращением железа  $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ , а так же растворением цементита в аустените.

При нагреве доэвтектоидной стали (исходная структура феррит + перлит) и переходе через критическую точку  $A_1$  перлит превращается в аустенит, т. е. образуется структура феррит + аустенит. При дальнейшем повышении температуры феррит постепенно превращается в аустенит, и по достижении температуры, соответствующей критической точке  $A_3$  (линия  $GS$ ), структура стали состоит из однородного аустенита.

На скорость превращения перлита в аустенит влияют многие факторы: температура нагрева, скорость нагрева, дисперсность исходной структуры, пластинчатая или зернистая форма цементита, химический состав стали.

Температура нагрева определяет время превращения, так как с увеличением степени перегрева уменьшается размер критического зародыша аустенита, увеличиваются скорость возникновения зародышей и скорость их роста.

Механизм превращения перлита в аустенит представлен на рис.1.

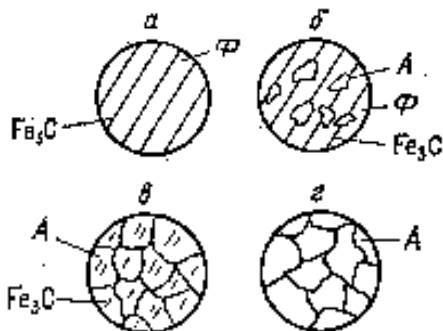


Рис.1. Механизм превращения перлита в аустенит.

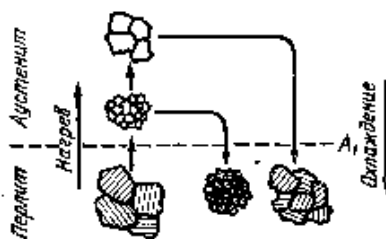


Рис.2. Схема изменения зерна перлита в зависимости от температуры нагрева аустенитного зерна

### Рост зерна аустенита при нагреве

При нагреве стали выше температуры  $A_1$  зёрна аустенита получают мелкими (начальное зерно аустенита). В процессе дополнительного нагрева или длительной выдержки при данной температуре происходит рост зерна аустенита (рис. 2). Схема изменения зерна перлита в зависимости от температуры нагрева аустенитного зерна представлена на рис. 2. Рост величины зёрен аустенита происходит тем в большей степени, чем выше температура нагрева. Движущей силой роста является разность свободных энергий мелкозернистой

(большая свободная энергия) и крупнозернистой (меньшая свободная энергия) структуры аустенита.

*Начальная величина зерна* — величина зерна, определяемая размером зерна в момент окончания перлитно-аустенитного превращения.

При нагреве до достаточно высокой температуры наследственно мелкозернистая сталь может иметь даже более крупное зерно аустенита, чем наследственно крупнозернистая сталь. Поэтому введено понятие действительной величины зерна.

*Действительная величина зерна* — размер зерна при комнатных температурах, полученный после той или иной термической обработки. Она тем больше, чем больше исходное зерно аустенита, т.е. зависит от температуры последнего нагрева и продолжительности выдержки при этой температуре.

Неправильный режим нагрева (нагрев сталей значительно выше линии *GSE* диаграммы «Fe-Fe<sub>3</sub>C») может привести либо к *перегреву*, либо к *пережогу* стали. Следствием этого является образование крупного действительного зерна.

*Перегрев* получается, когда нагрев доэвтектоидной стали значительно выше температуры *A<sub>3</sub>* (линии *GSE* диаграммы «Fe – Fe<sub>3</sub>C») приводит к интенсивному росту зерна аустенита. Такая структура называется *видманштеттова структура* (по имени учёного А. Видманштеттена см. рис.3б) и характеризуется пониженными механическими свойствами. Перегрев можно исправить повторным нагревом до оптимальных температур с последующим медленным охлаждением.



Рис. 3. Микроструктура углеродистой стали 35 в зависимости от температуры нагрева ( $\times 100$ ): *а* — без перегрева; *б* — перегрев; *в* — пережогу

*Пережог* имеет место, когда температура нагрева приближается к температуре плавления и металл в течение длительного времени находился при высокой температуре в окислительной атмосфере печи. При этом наблюдается окисление и частичное оплавление границ зёрен, что резко снижает прочность стали. Излом такой стали камневидный (рис. 3в). Пережог — неисправимый брак, устранить который можно только переплавкой стали.

## Вопрос 2. Диффузионная металлизация как вид ХТО, её виды, режимы и назначение

*Диффузионная металлизация* — химико-термическая обработка, в основе которой положен процесс диффузионного насыщения поверхностных слоёв стальных изделий различными металлами: алюминием (Al), хромом (Cr), цинком (Zn), бором (B), молибденом (Mo) и др., а также кремнием (Si).

Проводится диффузионная металлизация для защиты изделий от коррозии и повышения их жаростойкости, износостойкости и твёрдости. Осуществляется она в твёрдых, жидких и газообразных средах.

Диффузионную металлизацию подразделяется на: *твёрдую диффузионную металлизацию*, *уазовую диффузионную металлизацию* и *жидкую диффузионную металлизацию*.

Среди методов диффузионной металлизации наибольшее применение получили алитирование, хромирование, силицирование, борирование и др. При насыщении поверхностных слоёв деталей хромом (Cr) процесс диффузионной металлизации называют *хромированием*, алюминием (Al) — *алитированием*, кремнием (Si) — *силицированием*, бором (B) — *борированием*. Рассмотрим каждый из этих процессов.

*Аллитирование* — поверхностное насыщение низкоуглеродистой стали алюминием (Al) для повышения её коррозионной стойкости. Аллитированные детали сохраняют жаростойкость до температуры 900°C. При аллитировании алюминий (Al) диффундирует в сталь и образует твёрдый раствор с железом (Fe). Повышение коррозионной стойкости происходит благодаря образованию плотной плёнки окиси алюминия ( $Al_2O_3$ ), предохраняющей металл от окисления. В зависимости от среды, в которой производится процесс, различают аллитирование в твёрдой, жидкой и газообразной среде, а также электролитическое аллитирование.

*Хромирование* — процесс поверхностного насыщения поверхностного слоя стали хромом (Cr) с целью повышения твёрдости, износостойкости и придания ей высоких кислотоупорных, антикоррозионных и жаростойких свойств. При хромировании обеспечивается высокая стойкость против газовой коррозии до 800°C, а также стойкость против коррозии в воде, морской воде и кислотах. Хромированию подвергают низкоуглеродистые и легированные стали при 950 – 1150°C в течение 10 – 15 ч в зависимости от требуемой толщины упрочнённого слоя.

*Силицирование* — процесс поверхностного насыщения стали кремнием (Si), обеспечивающий повышение её кислотоупорности (в соляной, серной и азотной кислотах), жаростойкости (окалиностойкости) и увеличение устойчивости против износа. Силицированию подвергают детали, применяемые в химической, бумажно-целлюлозной, нефтяной и других отраслях промышленности (валики насосов, трубопроводы, детали теплообменников, клапаны, арматура и т. д.). Толщина слоя после силицирования — 0,3 – 1,0 мм.

Силицирование обычно проводят при нагреве в газовой среде, в ретортах, при разложении паров хлорида кремния ( $SiCl_4$ ). Нагрев осуществляется до температур 950 – 1050°C с выдержкой в течение 2 – 5 часов. В результате силицирования получается слой толщиной 0,6 – 1,4 мм с твёрдостью  $HV200$  – 300. Жаростойкость детали до 800 – 850°C.

*Борирование* — процесс насыщения поверхностных слоёв стальных изделий бором (B), благодаря чему обеспечиваются высокая твёрдость, износостойкость и коррозионная стойкость материала детали в различных средах. Наибольшее распространение получило электролитное жидкое и газовое борирование, осуществляемое при 850 – 950°C в течение 6 – 8 ч.

Борированные слои характеризуются исключительно высокой твёрдостью (1800 – 2000  $HV$ ) и высоким сопротивлением износу из-за образования боридов железа ( $FeB$ ,  $FeB_2$ ), однако эти слои очень хрупкие.

Борированная сталь отличается большей теплостойкостью до температуры 900°C и жаростойкостью до температуры 800°C. Недостатком борирования является то, что борированные слои отличаются повышенной хрупкостью. Борированию можно подвергать любые стали.

### **Вопрос 3. Поверхностная закалка, лазерная термическая и химико-термическая обработка**

#### **Поверхностная закалка**

Поверхностная закалка — это процесс термической обработки, который состоит в нагреве поверхностного слоя стального изделия до температуры выше линии  $A_{C3}$  для доэвтектоидной стали и до температуры выше линии  $A_{C1}$  для заэвтектоидной.

Поверхностная закалка предназначена для повышения твёрдости, износостойкости и предела выносливости поверхностного слоя обрабатываемых изделий. В результате такой закалки сердцевина остаётся вязкой, благодаря чему изделие воспринимает ударные нагрузки.

Поверхностная закалка осуществляется очень быстро и поэтому на поверхности детали не образуется окисленного слоя (окалины). Так как при этом нагревается и охлаждается поверхностный слой детали, коробление детали незначительное.

Нагрев под поверхностную закалку производят следующими способами: 1) токами высокой частоты (ТВЧ); 2) в расплавленных металлах или солях; 3) пламенем газовых или кислород-ацетиленовых горелок; 4) лазерным излучением.

Наибольшее распространение получил метод поверхностной закалки при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ).

При нагреве ТВЧ используется явление индукции и поверхностного распределения индуцированного тока в детали. Так, если в переменное электромагнитное поле поместить замкнутый проводник электрического тока, то в проводнике возникают переменные (вихревые) токи. Характерным является распределение тока по сечению проводника. Если постоянный ток при прохождении по проводнику распределяется равномерно по его сечению, то распределение переменного тока по сечению проводника неравномерное. Плотность протекающего переменного тока значительно больше у поверхности, чем во внутренних слоях проводника. Такое неравномерное распределение переменного тока в проводнике называется *поверхностным эффектом*. Вследствие поверхностного эффекта проводник нагревается на определённую глубину от поверхности.

**Различают следующие способы закалки с индукционным нагревом:**

1) одновременный нагрев и охлаждение всей поверхности; этот метод применяется для изделий, имеющих небольшую упрочняемую поверхность (инструменты, валики, пальцы);

2) непрерывно-последовательный нагрев и охлаждение; этот метод применяют для закалки длинных валов, осей и т. д.;

3) последовательный нагрев и охлаждение отдельных участков; данный метод используют при закалке шеек коленчатых валов (последовательный нагрев и закалка одной шейки за другой), кулачков распределительных валов и т. д.

**Преимуществами поверхностной закалки ТВЧ являются:**

- 1) регулируемая глубина закалённого слоя;
- 2) высокая производительность и возможность автоматизации;
- 3) отсутствие на поверхности детали обезуглероживания и окалинообразования;
- 4) минимальное коробление детали;
- 5) по сравнению с обычной закалкой сталь, закалённая при нагреве ТВЧ, имеет следующие преимущества: более мелкозернистая структура; более высокая твёрдость; более высокая износостойкость; более высокая прочность при относительно меньшем понижении вязкости; более высокий предел выносливости (предел усталостной прочности).

**К недостаткам поверхностной закалки ТВЧ следует отнести:**

- 1) высокая стоимость технологического оборудования, в частности индуктора, являющегося индивидуальным для каждой детали;
- 2) малая применимость закалки ТВЧ к условиям единичного производства, что вызвано первым недостатком.

### **Лазерная термическая обработка**

*Лазерная термическая обработка* (ЛТО) также применяется для поверхностного упрочнения деталей. Лазерная технология обеспечивает повышение производительности труда, точности и качества обработки, представляет практически безотходную технологию, удовлетворяющую требованиям по экологической защите окружающей среды.

*Лазеры* — оптические квантовые генераторы (ОКГ), позволяющие получать электромагнитные излучения чрезвычайно высокой концентрации энергии. Длина волн, генерируемых ОКГ, находится в световом диапазоне от ультрафиолетовой области спектра до инфракрасной ( $\alpha = 0,1 - 70$  мкм). Лазерное излучение распространяется очень узким пучком и характеризуется высокой концентрацией энергии. Источниками генерируемой

энергии служат твёрдые тела (рубины, алюминиевые граниты, иттрий, стёкла) и газы (He, Ar, Ne, CO<sub>2</sub>).

Применение лазеров для термической обработки основано на преобразовании световой энергии в тепловую. В основу работы лазеров положено усиление электромагнитных колебаний счёт индуцированного излучения атомов. Высокая концентрация энергии в световом потоке ОКГ позволяет нагреть поверхность до температурного диапазона термообработки за очень короткое время.

Глубина упрочнённого слоя при нагреве на CO<sub>2</sub>-лазере (при мощности 5 кВт) колеблется от 0,3 до 1,0 мм, а на импульсном лазере — 0,1 – 0,15 мм.

Механизм ЛТО заключается в фазовом превращении материала после его скоростного нагрева до температур выше температур фазовой перекристаллизации (вплоть до температур плавления) с последующим быстрым охлаждением обработанной зоны путём отвода теплоты за счёт теплопроводности материала изделия. Скорость охлаждения при температуре нагрева ниже температуры плавления составляет (5°С/с, при кристаллизации из жидкого слоя — 106°С/с (что в 10<sup>3</sup> раз больше скорости обычной закалки).

ЛТО позволяет повысить твёрдость и износостойкость упрочняемых материалов, а также предел контактной выносливости  $\sigma_H$  и предел выносливости при изгибе  $\sigma_{из}$ . Твёрдость зависит от концентрации углерода и легирующих элементов в стали (при постоянном режиме обработки). Методом ЛТО хорошо упрочняют средне- и высоколегированные углеродистые и инструментальные стали. Стали с низким содержанием углерода и высокопрочные низколегированные стали лазерной термической обработкой упрочняются плохо. ЛТО практически не влияет на предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_T$  сталей.

На сегодняшний день лазерная обработка считается перспективным методом поверхностного упрочнения изделий сложной формы, работающих в условиях износа и усталостного нагружения.

### **Лазерная химико-термическая обработка**

Насыщение легирующими элементами при лазерной химико-термической обработке (ЛХТО) происходит путём диффузии и массопереноса в твёрдой фазе, из плазмы, и жидкой фазы, при этом возможно конвективное и чисто механическое перемещение расплава в зоне воздействия лазерного импульса.

При ЛХТО на поверхность изделия различными способами предварительно наносят легирующие элементы. Наибольшее распространение среди способов нанесения легирующих элементов получили: 1) накатка фольги из легирующего материала; 2) электролитическое или химическое осаждение; 3) напыление; 4) электроискровое легирование; 5) нанесение порошков или обмазок. ЛХТО обычно осуществляется в режиме расплавления.

Свойства зоны легирования зависят от концентрации легирующих элементов и получения фаз различной степени стабильности и дисперсности, образующихся в процессе охлаждения. Строение и состав зоны термического влияния определяются режимом лазерного облучения: плотностью мощности излучения, временем его действия, числом импульсов, а также концентрацией легирующих компонентов в обмазке.

В настоящее время получены положительные результаты по цементации, азотированию, борированию и диффузионной металлизации железа и стали, а также металлов, не имеющих полиморфных превращений (Al, Ni, Cu и др.).

При цементации железа образуется двухслойная зона, состоящая из белого слаботравящегося слоя с равномерной твёрдостью *HV*1400 и расположенного за ним слоя с микротвёрдостью *HV*1000.

Диффузионная металлизация железа возможна при легировании различными металлами. Однако повышение твёрдости достигается только при растворении ванадия (V), ниобия (Nb), титана (Ti) и вольфрама (W).

Высокая износостойкость и кавитационная стойкость получены при лазерном азотировании из обмазок на стали 38Х2МЮА и 15ХМФ.

После лазерного борирования зона термического воздействия имеет твёрдость в зависимости от режима обработки  $HV1100 - 2100$ . При таком упрочнении достигается высокое сопротивление изнашиванию при различных схемах приложения нагрузки и различных условиях трения. Легирование бором (В) снижает коэффициент трения материала, повышает его износостойкость.

## **Тема №6 Цветные металлы и их сплавы. Неметаллические материалы**

### **Вопрос 1. Композиционные материалы**

*Композиционными материалами* называют материалы, состоящие из двух компонентов и более, объединённых различными способами в монолит и сохраняющими при этом индивидуальные особенности.

Композиционные материалы обладают комплексом свойств, отличающихся от традиционных конструкционных материалов, что и предопределило их успешное применение для совершенствования современных и разработки принципиально новых конструкций.

**Для композиционных материалов характерна следующая совокупность признаков:**

- 1) состав, форма и распределение компонентов материала определены заранее;
- 2) материалы состоят из двух компонентов и более различного химического состава, разделённых в материале границей;
- 3) свойства материала определяются каждым из его компонентов, содержание которых в материале достаточно большое;
- 4) материал обладает свойствами, отличными от свойств компонентов, взятых в отдельности;
- 5) материал однороден в макромасштабе и неоднороден в микромасштабе;
- 6) материал не встречается в природе, а создан человеком.

Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. Компонент, который обладает непрерывностью по всему объёму, является *матрицей*. Компонент же прерывный, разделённый в объёме композиционного материала, считается *армирующим* или упрочняющим. Примером композиционного материала является железобетон.

В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, а также полимеры органические и неорганические, керамические, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и её эксплуатационные характеристики: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Армирующие или упрочняющие компоненты равномерно распределены в матрице. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твёрдостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Более широким понятием, чем армирующий или упрочняющий компонент, является термин «наполнитель», поскольку наполнитель в матрице помимо изменения прочности оказывает влияние и на другие характеристики композиции.

### **Классификация композиционных материалов**

Композиционные материалы классифицируют по геометрии наполнителя, расположению его в матрице и природе компонентов.

**Классификация композиционных материалов по геометрии наполнителя:**

- 1) с нуль-мерными наполнителями, размеры которых в трёх измерениях имеют один и тот же порядок;
- 2) с одномерными наполнителями, один из размеров которых значительно превосходит два



других;

3) с двухмерными наполнителями, размеры которых значительно превосходят третий.

**Классификация композиционных материалов по схеме расположения наполнителей:**

1) с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;

2) с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя в виде волокон, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;

3) с трёхосным (объёмным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его распределении.

**Классификация композиционных материалов по природе компонентов:**

1) композиционные материалы, содержащие компонент из металлов или сплавов;

2) композиционные материалы, содержащие компонент из неорганических соединений оксидов, карбидов, нитридов и др.;

3) композиционные материалы, содержащие компонент из неметаллических элементов, углерода, бора и др.;

4) композиционные материалы, содержащие компонент из органических соединений (эпоксидные, полиэфирные, фенольные и другие смолы).

Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и прочности связи между ними. Обычно компоненты для композиционного материала выбирают со свойствами, существенно отличающимися друг от друга.

Модуль упругости композиционных материалов может изменяться в требуемом направлении в зависимости от схемы армирования. Высокая надёжность в работе конструкций из композиционных материалов связана с особенностями распространения в них трещин. В обычных сплавах трещина развивается быстро и скорость роста её в период работы конструкции детали возрастает. В композиционных материалах трещина обычно возникает и развивается в матрице и встречает препятствия на границе матрица — упрочнитель. Армирующий элемент тормозит её распространение, задерживая на некоторое время её рост.

**Вопрос 2. Пластмассы, их общая характеристика, классификация, и назначение**

Среди новых конструкционных материалов, необходимых для ускорения технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства, особое место принадлежит пластмассам и синтетическим смолам. Сегодня производство различной техники и машин невозможно представить без использования пластмасс и резин. Они являются не только заменителями дефицитных цветных металлов, но и самостоятельными машиностроительными материалами.

*Синтетическими полимерами* называют неметаллические материалы (пластические массы, резины, химические волокна, плёнки, лаки, клеи, герметики и др.), основой производства которых является синтез высокомолекулярных органических продуктов на базе полимерных соединений.

Полимерные высокомолекулярные соединения состоят из сотен и тысяч атомов. Гигантские молекулы этих соединений называют *макромолекулами*.

В зависимости от формы макромолекул полимерные соединения подразделяются на *линейные, разветвлённые и сетчатые (пространственные)* (рис.1).

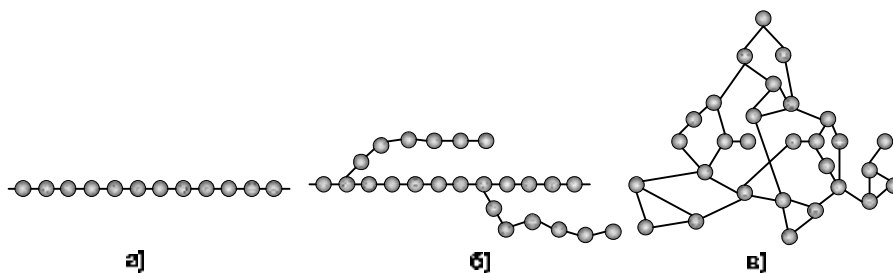


Рис.1. Строение высокомолекулярных соединений: *а* — линейных; *б* — разветвлённых; *в* — сетчатых.

У *линейных полимеров* макромолекулы представляют собой сотни или тысячи элементарных звеньев мономеров, соединённых внутримолекулярными связями в бесконечные цепи (рис. 1*а*). У *разветвлённых полимеров* цепи образуют ответвления, состоящие так же из элементарных звеньев мономеров (рис. 1*б*). У *сетчатых (пространственных) полимеров* цепи образуют пространственную сетку (рис. 1*в*).

Линейные и разветвленные полимеры относятся к *термопластичным*, а сетчатые — к *термореактивным полимерам*. Термопласты в отличие от реактопластов способны многократно подвергаться пластической деформации.

### **Все синтетические полимеры по типу синтеза делят на:**

- 1) полимеризационные (и сополимеризационные);
- 2) поликонденсационные высокомолекулярные соединения.

*Полимеризационные полимеры* — это полимеры, которые образованы при взаимодействии мономеров без изменения первоначального состава. К ним относятся полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, политетрафторэтилен.

*Поликонденсационные полимеры* — это полимеры, которые образуются из нескольких мономеров в результате протекания процесса (реакции) поликонденсации. Процесс сопровождается выделением побочных продуктов (воды ( $H_2O$ ), углекислого газа ( $CO_2$ ), аммиака ( $NH_3$ )). В результате состав полимера не отвечает составу первоначальных веществ (мономеров).

### **Основные сведения о пластмассах**

Пластические массы (пластмассы) занимают особое место среди синтетических полимерных материалов. Широкое применение пластмасс обусловлено наличием у них ценных свойств.

**Пластмассы широко применяются в машиностроении благодаря высоким показателям следующих ценных свойств:**

- 1) *хорошая удельная прочность*;
- 2) *фрикционные свойства* (некоторые пластмассы обладают высоким коэффициентом трения и малым износом);
- 3) *антифрикционные свойства* (некоторые виды пластмасс, например текстолит, капрон успешно заменяют бронзу в подшипниковых узлах машин);
- 4) *оптические свойства* (некоторые ненаполненные пластические массы (органическое стекло, полистирол и др.) прозрачны и бесцветны, способны пропускать лучи света в широком диапазоне волн, в том числе и ультрафиолетовую часть спектра значительно превосходя в этом отношении силикатные стекла);
- 4) *хорошая электроизоляционность*;
- 5) *хорошая теплозвукоизоляционность*;
- 6) *высокая химическая стойкость* (пластмассы неподвержены коррозии, а многие из них и агрессивным средам);
- 7) *малая плотность* (Например: плотность пенопласта составляет  $0,015 - 0,8 \text{ г/см}^3$ );
- 8) *технологичность* (трудоемкость изготовления самых сложных деталей из пластмасс ничтожна по сравнению с трудоемкостью изготовления деталей из других материалов);

9) *дешевизна сырья*.

**Одновременно с указанными достоинствами пластические массы обладают следующими недостатками:**

- 1) *ограниченная теплостойкость* (основные виды пластических масс могут удовлетворительно работать лишь в сравнительно небольшом интервале температур (от -60 до +200°C);
- 2) *низкая теплопроводность* (теплопроводность пластических масс в 500 – 600 раз ниже теплопроводности металла, что создаёт трудности при их применении в узлах и деталях машин, где необходим быстрый отвод больших количеств тепла);
- 3) *низкая твердость* (6 – 60 кГ/см<sup>2</sup> по Бринеллю);
- 4) *ползучесть* (это свойство особенно ярко выражено у термопластов (рис.3);
- 5) *малая жесткость* (модуль упругости самых жестких пластмасс - стеклопластиков на один – два порядка ниже, чем у металлов);
- 6) *старение* (пластмассы теряют свои свойства под действием следующих факторов: температуры, влажности, света, воды, длительного пребывания в атмосферных условиях.
- 7) *невысокая вязкость*.

### **Компоненты пластмасс**

Обычно пластмассы представляют собой сложные композиции, состоящие из нескольких веществ. Требуемые эксплуатационные свойства пластмасс получают благодаря подбору отдельных компонентов и их определенным сочетаниям.

В большинстве случаев пластмассы состоят из смолы, наполнителя, пластификатора, красителя и других добавок, улучшающих технологические и эксплуатационные свойства пластика.

### **Связующее вещество**

Основным компонентом всех пластмасс является *связующее* вещество (высокомолекулярное органическое соединение), которое придает пластмассам пластичность и способность формоваться, а затем затвердевать, сохраняя полученную форму. Некоторые пластмассы состоят только из связующего вещества (например, полиметилметакрилат — оргстекло). В качестве связующего вещества в пластмассах применяют главным образом синтетические смолы.

Для повышения механической прочности, теплостойкости, электроизоляционных и других свойств в состав большинства пластмасс вводят другой весьма важный компонент — *наполнитель*, который после пропитки связующим веществом спрессовывается в однородную массу. Кроме связующих веществ наполнителей в состав пластмасс вводят пластификаторы, пигменты и другие добавки.

Синтетические смолы используют в качестве связующего вещества в пластмассах. Их получают из веществ с низким молекулярным весом, а также из природных или ранее полученных веществ с высокомолекулярным весом. Получение высокомолекулярных синтетических смол может быть осуществлено методами полимеризации или поликонденсации.

*Наполнители* — это органические и неорганические вещества в виде порошков, волокон, листов.

**Наполнители вводят в пластмассы с целью:** Улучшения физико-механических свойств, диэлектрических свойств, фрикционных и антифрикционных свойств, повышения теплостойкости, уменьшения теплостойкости, уменьшения усадки, снижения стоимости пластмасс.

**Наполнители делятся на:** органические и неорганические.

*Органические наполнители* - это материалы на основе целлюлозы. Они снижают хрупкость смол и сохраняют малый удельный вес, однако увеличивают гигроскопичность и уменьшают термостойкость пластмасс.

*Неорганические наполнители* - это материалы, которые увеличивают хрупкость пластмасс, но повышают теплостойкость и улучшают электроизоляционные свойства. При формировании у пластмасс с неорганическими (минеральными) наполнителями усадка значительно меньше, чем у пластмасс с органическими наполнителями.

В зависимости от требуемой структуры в пластмассы могут быть введены наполнители следующих видов:

- 1) **порошкообразные** (в виде порошкообразной крошки) древесная мука, целлюлоза, слюда, кварцевая мука, сажа, графит, тальк,  $TiO_2$  и некоторые другие.
- 2) **волокнистые** (в виде различных волокон) хлопковые очёсы, асбестовое волокно, стеклянное волокно, кроме того, могут использоваться отходы тканей, бумаги, картона, древесного шпона и др. Волокнистые наполнители повышают механические свойства пластмасс, однако вследствие меньшей текучести затрудняют процессы формирования и возможность изготовления изделий сложной конфигурации;
- 3) **слоистые** (в виде цельнолистовых материалов) бумагу, ткани (хлопчатобумажные, стеклянные, асбестовые) и древесный шпон. Использование слоистых (листовых) наполнителей дает возможность получать пластмассы с наиболее высокими механическими свойствами и рядом специальных параметров. Такие пластмассы называют конструкционными.

В некоторых случаях изготавливают пластмассы без наполнителей, представляющие собой или прозрачные (типа органического стекла) или отдельные непрозрачные композиции.

*Пластификаторы* – это вещества, которые уменьшают межмолекулярное взаимодействие и хорошо совмещаются с полимерами. Пластификаторы вводятся в пластмассы в количестве 10-20% для повышения эластичности, уменьшения хрупкости готового изделия (улучшают морозостойкость) и предотвращения прилипания прессматериала к стенкам пресс-формы. В качестве пластификаторов применяют различные органические вещества: стеарин, касторовое масло, олеиновую кислоту, дибутилфталаты, трикрезилфосфаты и др.

*Специальные добавки* – это смазочные материалы, красители, добавки для уменьшения статических зарядов и горючести, для защиты от плесени, ускорители и замедлители отверждения и др. Специальные добавки служат для изменения или усиления какого-либо свойства.

*Стабилизаторы* – это вещества, предотвращающие разложение полимерных материалов во время их переработки и эксплуатации под воздействием атмосферных условий, повышенных температур и других факторов.

В качестве стабилизаторов используют ароматические амины, фенолы, сернистые соединения, газовую сажу.

### **Красители**

В композиции пластмасс для придания определенной окраски вводят соответствующие красящие вещества — *пигменты*.

#### **Виды красителей:**

- 1) минеральные (мумия, охра, умбра, литопон, крон и др.); 2) органические (нигрозин, родамин).

Для ускорения отверждения термореактивных пластмасс в их состав перед формированием вводят *катализаторы* (перекиси, кислоты или соли).

При производстве пластмасс с пористым или ячеистым строением в их состав вводят специальные вещества — *порообразователи*.

### **Классификация пластмасс**

**Классификация пластмасс по происхождению:** органического происхождения и неорганического происхождения.

Наибольшее применение в машиностроении получили пластмассы органического

происхождения.

**Классификация пластмасс в зависимости от пластической деформации при нагреве:**

- 1) термопластичные (термопласты) пластмассы;
- 2) термореактивные (реактопласты) пластмассы.

**Классификация пластмасс по диэлектрическим свойствам:**

- 1) неполярные; 2) полярные.

**Классификация пластмасс по физико-механическим свойствам при обычной температуре:**

- 1) *жёсткие*, являющиеся твёрдыми упругими веществами с высоким модулем упругости и малым удлинением при разрыве, сохраняющие форму при внешних напряжениях в условиях обычных или повышенных температур;
- 2) *полужёсткие*, являющиеся твёрдыми упругими веществами со средним модулем упругости, высоким относительным и остаточным удлинением при разрыве;
- 3) *мягкие*, являющиеся мягкими и эластичными веществами с низким модулем упругости, высоким относительным удлинением и малым остаточным удлинением;
- 4) *мягкие* и *эластичные*, являющиеся мягкими и эластичными веществами, с низким модулем упругости, поддающиеся значительным обратимым деформациям при растяжении — пластикаты (листы, ленты).

**Классификация пластмасс по назначению:**

- 1) конструкционные; 2) фрикционные; 3) антифрикционные; 4) специальные; 5) химически стойкие; 6) электроизоляционные; 7) прозрачные; 8) тепло- и звукоизоляционные; 9) уплотнительные (прокладочные); 10) декоративные.

**Классификация пластмасс по виду наполнителя:**

- 1) с порошкообразным наполнителем; 2) с волокнистым наполнителем; 3) с слоистым наполнителем; 4) без наполнителя.

### **Вопрос 3. Резины, их общая характеристика, классификация и назначение**

Современная техника не может существовать без резинотехнических изделий. Резина используется для производства автомобильных шин, изоляции проводов, водолазных костюмов, баллонов аэростатов, шлангов, надувных лодок, противогазов и многого другого.

*Резины* — это пластмассы с редкосетчатой структурой, в которых связующим выступает полимер, находящийся в высокопластическом состоянии.

**Резина в отличие от других материалов обладает рядом ценных свойств:**

высокая эластичность; высокое сопротивление истиранию; высокое сопротивление разрыву; газо- и водонепроницаемость; химическая стойкость; хорошие диэлектрические свойства; небольшой удельный вес.

В резинах связующим являются каучуки натуральные (НК) или синтетические (СК). Каучукам, представляющим собой линейные полимеры, присуща высокая пластичность, обусловленная особенностями строения их молекул. Линейные и слаборазветвлённые молекулы каучуков имеют зигзагообразную или спиралевидную конфигурацию и отличаются большой гибкостью. Чистый каучук ползёт при комнатной температуре и особенно при повышенной, хорошо растворяется в органических растворителях. Такой каучук не может использоваться в готовых изделиях.

Для повышения упругих и других физико-механических свойств в каучуке формируют редкосетчатую молекулярную структуру. Это осуществляют вулканизацией — путём введения в каучуки химических веществ — вулканизаторов (как правило, серу S), образующих поперечные химические связи между звеньями макромолекул каучука. В зависимости от числа возникших при вулканизации поперечных связей получают резины различной твёрдости.

## Классификация резин

### Классификация резин по твердости:

пористые (губчатые); мягкие ( $\leq 5\%S$ ); особо эластичные; средней твёрдости ( $10 - 15\%S$ ); твёрдые; высокой твердости; жесткие (Эбониты ( $\geq 30\%S$ )).

### Классификация резин по назначению:

- 1) универсальные;
- 2) специальные: а) масло- и топливостойкие; б) химически стойкие; в) светостойкие; г) морозо- и теплостойкие; д) газонепроницаемые; е) диэлектрические; ж) стойкие к радиации.

### Классификация резин по технологии изготовления:

клееные; формованные; штампованные; литые.

### Классификация резин по типу и конструкции изделий:

шинные; камерные; рукавные; протекторные; транспортные; амортизационные и др.

## Влияние условий эксплуатации на свойства резин

Нагрев, как правило, снижает прочностные свойства резин. Термическая стабильность резин определяется прочностью химических связей в макромолекулах и их структурой. Наиболее интенсивно, прочность уменьшается у резины на основе хлоропрена. Органические резины после нагрева ( $150^{\circ}\text{C}$ ) в течение 1 – 10 ч теряют прочность.

Одновременное действие на резины **температуры, озона, кислорода, нагрузки, ультрафиолетовых лучей** интенсифицирует развитие процессов старения. Резины на основе СКТ способны длительное время работать при этой температуре. Детали из резин на основе СКФ и СКТ — уплотнители подвижных и неподвижных соединений, прокладки, колпачки и т. п. — способны работать длительное время при температурах до  $250 - 300^{\circ}\text{C}$ .

При низких отрицательных температурах резины практически полностью утрачивают высокоэластические свойства и переходят в стеклообразное состояние. Уровень потери свойств больше проявляется в условиях сдвига, чем сжатия или растяжения.

Под действием ионизирующего излучения резины стареют.

**Стойкость резин к радиации зависит от:** природы каучука; среды; состава резин (наличия антирадов).

Наибольшая скорость старения под действием радиации отмечена у резин на основе СКН, СКБ, наирита и проявляется в повышении их твёрдости и уменьшении вязкости. Более низкая скорость старения наблюдается у резин на основе НК, СКИ-3. Скорость старения самым существенным образом зависит от мощности дозы облучения. В ядерной технике для изготовления уплотнительных деталей чаще применяют резины на основе СКИ и НК.

## Тема №7 Поведение материалов в особых условиях. Коррозия металлических материалов и её виды. Защита металлов и сплавов от коррозии

### Вопрос 1. Поведение материалов в особых условиях.

#### Работа материалов в условиях низких температур

Воздействию низких температур подвергаются очень многие материалы и изделия, например трубы для газо- и нефтепродуктов, мосты, железные дороги, автомобили, летательные аппараты и т. д. В северных районах охлаждение материалов может достигать  $-60^{\circ}\text{C}$ , корпуса самолетов и космических аппаратов могут охлаждаться до температуры жидкого кислорода ( $-183^{\circ}\text{C}$ ). Детали и отдельные узлы холодильной и криогенной техники,

которые используются для получения, хранения, транспортировки сжиженных газов, охлаждаются до температуры жидкого гелия ( $-269^{\circ}\text{C}$ ).

**При низких температурах у металлов наблюдаются:** 1) потеря пластичности; 2) потеря вязкости; 3) повышенная склонность к хрупкому разрушению.

Основное требование к материалам, работающим в условиях низких температур, — это отсутствие хладноломкости.

Для надёжной работы материала необходимо, чтобы температурный порог хладноломкости был ниже рабочей температуры. На склонность к хрупкому разрушению, как и при нормальных температурах, влияют концентраторы напряжений и масштабный фактор деталей.

Материалы с ГЦК решёткой, а также титан и его сплавы, обладающие ГПУ решёткой, не имеют явно выраженного порога хладноломкости, и ударная вязкость у них уменьшается плавно.

Кроме критериев хладостойкости основанием для выбора материала служат прочностные характеристики ( $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$ ), физические и технологические свойства.

Из физических свойств материалов при низких температурах интерес представляют теплопроводность и теплоёмкость. Скорость захлаживания материала зависит от теплоёмкости и теплопроводности металла, а при низких температурах, близких к жидкому азоту ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) эти характеристики уменьшаются более чем в 10 раз. Скорость захлаживания материала при термоциклировании по-разному зависит от теплоёмкости и теплопроводности. Чем меньше теплоёмкость и больше теплопроводность, тем легче захлаживается криогенное оборудование и быстрее выходит на заданный режим.

Наиболее распространенными средами в криогенной технике являются кислород и водород, поэтому необходимо учитывать совместимость с ними используемых материалов.

Основные материалы, которые используются при криогенных температурах, — это углеродистые стали с ОЦК решётками, алюминий и его сплавы (АМц, АМг, АМг5 и др.), титан и его сплавы (ВТ1, ВТ5, ОТ4 и др.).

Нержавеющие стали переходного и мартенситного классов не охрупчиваются до  $-196^{\circ}\text{C}$ . Нержавеющие стали аустенитного класса пластичны и вязки до температур  $-253^{\circ}\text{C}$ .

### **Работа материалов в условиях радиационного облучения**

Радиационное облучение материалов в условиях космоса связано с огромным радиационным полем вокруг Земли. Это и корпускулярная радиация — электроны и протоны, попавшие в магнитное поле Земли, космические лучи — частицы высоких энергий, приходящие из различных областей Вселенной, и солнечные космические лучи.

В настоящее время можно сказать, что воздействие электронного и протонного излучений на металлы исследовано ещё недостаточно.

Радиационное воздействие сильнее сказывается на металлах с ГЦК решёткой, чем на металлах с ОЦК и ГПУ решётками.

**Из всех частиц наибольшее влияние на свойства конструкционных материалов оказывают нейтроны, способные из-за отсутствия заряда проникать далеко в глубь кристаллической решётки металла и вызывать в ней следующие существенные изменения:**

- 1) образование «пар Френкеля» вследствие упругого столкновения частиц с ядрами атомов металла;
- 2) нарушение электронной структуры (ионизационные эффекты) в результате столкновения частиц с орбитальными электронами;
- 3) местное повышение температуры (термический пик), связанное с упругими колебаниями решётки на пути прохождения частиц;
- 4) образование атомов новых элементов в процессе ядерного распада, а также при захвате ядром частиц;

5) радиационная эрозия в результате отрыва атомов с поверхности под влиянием ударов высокоскоростных пылевидных частиц окружающей среды.

Соударения частиц с атомами в узлах кристаллической решётки смещают и возбуждают другие атомы. Вследствие упругого соударения частицы с атомами она теряет часть своей кинетической энергии, зависящую от целого ряда факторов этого взаимодействия. Если при этом соударении атом приобретает дополнительную энергию и она становится больше энергии, необходимой для его смещения, то атом из узла кристаллической решётки перемещается в междоузлие. За счёт такого перемещения атома из узла решётки в междоузлие и наличия вакансии образуется «пара Френкеля».

Возникающие дефекты строения приводят к изменению следующих структурно чувствительных свойств сплавов: снижаются пластичность, вязкость, повышается удельное электросопротивление и прочность, а главным образом сопротивление малой пластической деформации ( $\sigma_{0,2}$ ).

Наиболее опасное явление, наблюдаемое при радиационном облучении, — это охрупчивание материалов. Данное явление наиболее сильно проявляется у металлов с ОЦК решёткой; так, например, критическая температура хрупкости молибдена после нейтронного облучения повышается от  $-30$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Вследствие радиационного облучения у металлов и сплавов понижаются вязкость, пластичность, сопротивление отрыву, а прочность и электросопротивление повышаются, т. е. возрастает вероятность хрупких разрушений.

### **Жаростойкость и методы, её повышения**

*Жаростойкость* — способность металлов и сплавов сопротивляться окислению и газовой коррозии при высоких температурах. Жаростойкость зависит от многих внешних и внутренних факторов. В основном за жаростойкость отвечают поверхность металла и чистота (качество) её обработки. Полированные поверхности окисляются медленнее, так как оксиды распределены равномерно и более прочно сцеплены с поверхностью металла. Формирующаяся на поверхности оксидная плёнка достаточно хорошо защищает металл от окисления в том случае, если она плотная и не пропускает ионы кислорода, хорошо сцеплена с подложкой и не отслаивается при механических испытаниях. К металлам, которые образуют такие плёнки, относятся хром (Cr) и алюминий (Al). Оксидные плёнки типа шпинели  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  хорошо защищают от окисления при высоких температурах. Если на поверхности образуется рыхлый оксид, как у магния (Mg), то он не стоек и не защищает металл от дальнейшего окисления.

Повышение жаростойкости сплавов достигается легированием элементами (хром (Cr), алюминий (Al), кремний (Si), бериллий (Be)), образующими на поверхности непроницаемые для ионов основного металла и кислорода оксидные плёнки. Также для этих целей используются защитные покрытия, состав которых выбирается с учётом условий работы изделия и состава агрессивной среды. Структура жаростойкого материала должна быть однородной и однофазной (чистые металлы или твёрдые растворы).

Термическая обработка меняет строение сплавов и, следовательно, их коррозионную стойкость. Отжиг и нормализация приводят к формированию однофазной структуры и способствуют увеличению жаростойкости материала.

Пластическая деформация ухудшает жаростойкость, так как приводит к появлению градиента напряжений в структуре металла. Величина зерна для жаростойкого материала не существенна, поэтому эта характеристика является структурно нечувствительной.

Характеристики сплавов, стойких к коррозии при повышенных температурах, могут быть даны лишь к конкретным агрессивным средам и выбор материала решается с учётом условий работы данного изделия.



## Жаропрочность и методы её повышения. Явление ползучести

*Жаропрочность* — способность материала длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при воздействии механических нагрузок и повышенных температур.

Жаропрочность важна при выборе материала, когда рабочие температуры изделий превышают 0,3 температуры плавления  $T_{пл}$ . Многие детали современных паросиловых установок, металлургических печей, двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин и других машин при работе разогреваются до высоких температур и испытывают большие нагрузки. Условия работы деталей различны. Основное значение при выборе материала имеют: 1) температура; 2) длительность работы под нагрузкой; 3) значение напряжения.

При высоких температурах ускоряются диффузионные процессы, изменяются исходная микроструктура и механические свойства материалов. С повышением температуры значительно возрастает число вакансий, увеличивается подвижность точечных дефектов. Кроме того, диффузия способствует перемещению дислокаций (линейный дефект) путём переползания, что даёт им большую «степень свободы», но также наблюдаются частичная аннигиляция дислокаций (дислокации разного знака взаимно уничтожаются), перераспределение их, что коренным образом меняет первоначальную дислокационную структуру металла.

Длительное время воздействия температуры приводит к существенным структурным изменениям: теряется прочность, полученная при термической обработке (закалка, старение), а также происходит потеря упрочнения, вызванного пластической деформацией, из-за таких процессов, как возврат и рекристаллизация.

Как уже было сказано, при высоких температурах ослабевают межатомные связи у металлов, уменьшаются модуль упругости  $E$ , временное сопротивление (предел прочности)  $\sigma_b$  и предел текучести  $\sigma_t$ .

Чем ниже температура плавления сплава, тем ниже и рабочая температура. При нагружении материала длительное время в условиях повышенных температур наблюдается процесс (явление) *ползучести*.

Если при постоянной температуре под действием постоянной нагрузки вызвать в металле напряжение даже ниже предела текучести  $\sigma_t$  и оставить его в этих условиях длительное время, то металл со временем будет деформироваться с определённой скоростью. Это явление получило название *ползучести* или *крипа*.

Основными критериями жаропрочности металлов являются *предел длительной прочности* и *предел ползучести*. Такие понятия, как ползучесть и жаропрочность, тесно связаны между собой и отделить их друг от друга не представляется возможным.

## Вопрос 2. Стали и сплавы с особыми физико-механическими свойствами

### Стали и сплавы с особыми физическими свойствами

К сталям с особыми физическими свойствами относятся: магнитная; немагнитная; сталь, обладающая высоким электрическим сопротивлением; сталь с особыми теплофизическими свойствами.

### Тугоплавкие материалы

*Тугоплавкие материалы.* Тугоплавкие металлы и сплавы на их основе применяют для работы при температурах более 1000°C.

Тугоплавкими называются металлы, имеющие температуру плавления выше, чем у железа. Наибольшее применение в технике находят тугоплавкие металлы, имеющие следующие температуры плавления: хром (Cr) — 1900°C, ниобий (Nb) — 2415°C, молибден (Mo) — 2620°C, тантал (Ta) — 3000°C, вольфрам (W) — 3410°C.

Расширение производства и применение тугоплавких металлов и сплавов связано с развитием атомной теплоэнергетики и ракетно-космической техники.

Сплавы на основе ниобия (Nb) и молибдена (Mo) имеют наиболее удовлетворительные технологические свойства. Кроме того, они охрупчиваются при сравнительно низких температурах (+100) — (–100)°С. Вольфрам (W) переходит в хрупкое состояние при температуре 600°С. Благодаря сравнительно высокой пластичности сплавы ниобия и молибдена имеют более широкое распространение.

Все тугоплавкие металлы имеют низкую жаростойкость. Для защиты их от окисления применяют различные покрытия. Для молибденовых и вольфрамовых сплавов применяют различные термодиффузионные силицидные покрытия.

В качестве материала для вкладышей сопел в реактивных двигателях, работающих на твёрдом топливе, применяют графит, имеющий температуру плавления 3900°С. Температура пламени в таких двигателях достигает 3500°С. Недостатком графита является низкая эрозионная стойкость, приводящая к износу сопла из-за твёрдых частиц, содержащихся в отходящих газах.

### **Магнитные и немагнитные стали и сплавы**

Магнитные стали широко применяются в электронике. В зависимости от назначения различают магнитотвёрдые и магнитномягкие сплавы.

*Магнитотвёрдые стали* служат, главным образом для изготовления постоянных магнитов. Они должны иметь высокие значения коэрцитивной силы и остаточной индукции.

*Коэрцитивной силой* называется напряжённость магнитного поля обратного знака, которая должна быть приложена к образцу для его размагничивания.

*Остаточной индукцией* называют магнитную индукцию, остающуюся в образце после его намагничивания и снятия магнитного поля.

Наиболее известные марки магнитотвёрдых сталей: EX2 (1% C, 2% Cr), EX3 (1% C, 3% Cr), EX5K5 (1% C, 5% Cr, 5% Co), EX9K15M (1% C, 9% Cr, 15% Co, 1% Mo). Буква E характеризует магнитную сталь (электротехническую). В этой стали содержатся хром (Cr), кобальт (Co), молибден (Mo).

Магнитотвёрдые стали подвергают закалке на мартенсит и искусственному старению при 100°С.

Одним из лучших материалов для магнитов является сплав альнико (8% Al, 14% Ni, 24% Co, остальное Fe). Магниты из альнико изготавливают литьём, так как они плохо обрабатываются резанием.

*Магнитномягкие стали* используются для работы в переменных полях, т. е. в условиях непрерывного перемагничивания. Поэтому они применяются для изготовления сердечников трансформаторов, роторов, статоров, магнитопроводов, электроизмерительных приборов.

Исходя из функционального назначения магнитномягкие материалы должны иметь малое значение коэрцитивной силы и высокую магнитную проницаемость. Этим свойствам отвечают низкоуглеродистые стали с добавлением 1 – 5% кремния (Si).

Обозначаются магнитномягкие стали буквой Э (Э1, Э11, Э21, Э41 и т. д.) и характеризуются высоким процентом содержания кремния (Si) (1 – 5%). Кроме магнитных сталей применяются магнитные сплавы на «Al – Ni – Co» и «Fe – Al» основе.

Высокую магнитную проницаемость имеют специальные железоникелевые сплавы — пермаллои с определенными узкими пределами содержания никеля (Ni) (около 78,5%). Магнитная проницаемость пермаллоев почти в 10 раз больше, чем низкоуглеродистого технического железа, что позволяет использовать их для приборов, работающих в слабых полях (радио, телефон). Для тех же целей разработан заменитель дорогих пермаллоев — сплав альсифер, содержащий 5,4% Al, 9,6% Si, остальное железо (Fe). Недостатком сплава является его повышенная хрупкость. Альсифер обычно используют в виде порошка или тонкостенных фасонных отливок.

*Немагнитные стали и сплавы*, например 55Н9Г9 и Н25, заменяют дорогие цветные металлы. Они применяются в приборах, где магнитные материалы могут повлиять на точность показаний.

### **Сплавы с малым температурным коэффициентом линейного расширения**

*Стали и сплавы с особыми теплофизическими свойствами* отличаются особо низким коэффициентом теплового расширения. К ним относятся сталь 18ХМТФ и сплавы инвар Н36 (содержание никеля (Ni) 36%, остальное — железо (Fe)), элинвар Н36Х8, ковар Н29К18, платинит Н48 (последний заменяет платина (Pt)). Указанные сплавы применяются для часовых пружин, камертонов, физических приборов.

Малый температурный коэффициент линейного расширения имеют сплавы системы «Fe – Ni» в интервале концентраций 29 – 45% никеля (Ni). Наименьшее значение коэффициента  $\alpha$  имеет инвар 36Н — сплав, содержащий 36% никеля (Ni) ( $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Еще более низкое значение коэффициента линейного расширения ( $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) в температурном интервале от  $-60$  до  $+100^\circ\text{C}$  достигается при использовании суперинвара 32НКД — сплава, дополнительно легированного кобальтом и медью (31,5 – 33% Ni; 3,2 – 4,2% Co; 0,6 – 0,8% Cu).

### **Сплавы для упругих элементов**

Для изготовления различных упругих элементов в приборостроении (сильфонов, пружин, мембран) применяют материалы с высокими упругими свойствами, не меняющимися в широком температурном диапазоне (до  $200^\circ\text{C}$ ). К ним относят элинвар — Fe – Cr – Ni сплав, содержащий около 40% Ni, 6% Cr с добавками Ti и Al. Элинвар упрочняется в результате закалки и старения при  $700^\circ\text{C}$ , при котором выделяются дисперсные частицы.

Для немагнитных упругих элементов ответственного назначения стойких против коррозии, применяют бериллиевые бронзы БрБ2 после закалки с  $780 - 790^\circ\text{C}$  и старения при  $350^\circ\text{C}$ .

## **Тема №8 Основы технологии литейного производства и обработки материалов давлением**

### **Вопрос 1. Технология изготовления отливок в песчано-глинистых формах**

Литьём в песчаные формы изготавливаются большинство отливок в серийном производстве. Сущность его заключается в заливке расплава в песчаную (литейную) форму, полость которой имеет конфигурацию отливки. После чего затвердевший и охлаждённый металл или сплав сохраняет конфигурацию этой полости.

Основные операции технологического процесса изготовления отливок в песчаных формах могут быть объединены в три группы:

I. Формовка. Включает в себя операции изготовления модельного комплекта, приготовления формовочных и стержневых смесей, изготовление элементов формы и стержней и сборку литейной формы;

II. Плавка и заливка. Включает в себя операции подготовки и загрузки плавильной печи, плавления, доводки и заливки расплава в литейную форму;

III. Выбивка и очистка отливок. Осуществляется после затвердевания и охлаждения отливки, состоит в выбивке отливок из литейных форм, очистке их от остатков формы и стержней, а также в удалении элементов литниковой системы.

Для снятия внутренних напряжений, получения заданных структуры и механических свойств металла отливки подвергают соответствующей термической обработке.

Выбор вида литейной формы определяется материалом, массой и толщиной стенок отливки, а также технологией изготовления формы.

**Назначение литейной формы состоит в обеспечении:**

- 1) необходимой конфигурации и размеров отливки;
- 2) заданной точности и качества поверхности отливки;
- 3) определённой скорости охлаждения залитого металла, способствующей формированию требуемой структуры сплава и качества отливок.

Эскиз отливки показан на (рис. 2а). Для изготовления песчаной формы этой отливки необходимо иметь модельный комплект и другую литейную оснастку.

*Литейная оснастка* — приспособления, применяемые для изготовления отливок. Литейная оснастка состоит из технологических приспособлений, необходимых для получения в форме контуров отливки, и включает в себя модельный и формовочный комплекты.

*Модельный комплект* включает в себя всю оснастку для получения полости формы.

**В рассматриваемом случае модельный комплект состоит из:**

- 1) модели; 2) стержневого ящика; 3) моделей элементов литниковой системы ;
- 4) прибыли; 5) выпора и др.

При необходимости модельный комплект должен включать также шаблоны для контроля размеров и конфигурации формы. Имея всю необходимую оснастку, можно изготовить литейную форму.

**Формовочный комплект состоит из:**

опок; подмодельной плиты; штырей; шаблонов.

*Модель* — приспособление, с помощью которого в форме 1 (рис. 1б) получают отпечаток, соответствующий конфигурации отливки.

Модель копирует отливку, отличаясь от неё увеличенными размерами. Необходимость изготовления модели увеличенных размеров вызвана усадкой металла отливки при его кристаллизации и охлаждении, а также дальнейшей механической обработкой рабочих поверхностей отливки.

**По конструкции модели могут быть:**

- 1) неразъемными; разъемными; с отъемными частями и т. п.

**Мастер модели изготавливают из следующих материалов:**

- 1) из дерева (единичное и серийное производство);
- 2) чугуна, алюминия, пластмасс (массовое производство).

*Стержневые ящики* (рис. 1в, 1б) служат для изготовления стержней 8, которые устанавливаются в форму 1 с целью создания полости или отверстия в отливке. По конструкции стержневые ящики подразделяются на цельные, разъемные (рис. 1в, 1б), вытряхные и др. Изготавливают их из тех же материалов, что и модели.

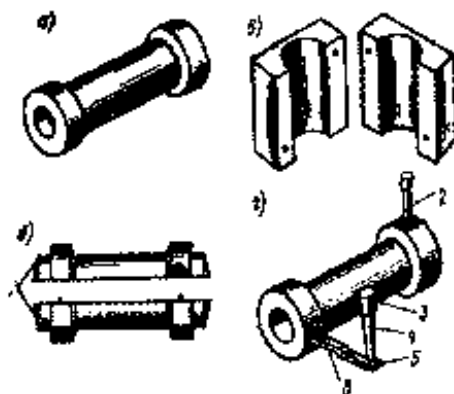


Рис. 1. Литейная модель (б), стержневой ящик (в), отливка (з) чугунной втулки (а).

Назначение других элементов литейной формы состоит в следующем. Совокупность каналов и резервуаров, создаваемых литниковой воронкой 10, стояком 11, зумпфом 13, шлакоуловителем 12 и питателями 14, 15 (рис. 3), называют *литниковой системой*. Литниковая система предназначена для подвода жидкого металла из литейного заливочного

ковша, в который расплавленный металл поступает из плавильного агрегата или раздаточного ковша, в полость формы 1.

*Литниковая воронка* 10 (рис. 3), предназначенная для приема расплава и задержания попадающего вместе с ним шлака.

*Стояк* 11 (рис. 3) представляет собой вертикальный канал, через который расплавленный металл поступает от литниковой воронки 10 к другим элементам литниковой системы. Конусность 2...4% стояка обеспечивает удобства при формовке и напор расплава.

*Зумпф* 13 (рис. 3) предохраняет нижнюю полуформу от размыва и попадания продуктов размыва (главным образом — частиц формовочной смеси) в полость формы, а, следовательно — в отливку.

*Шлакоуловитель* 12 (рис. 3) необходим для предотвращения попадания шлака и других частиц в полость формы.

*Питатели* 14, 15 (рис. 3) предназначены для плавной подачи расплавленного металла с определённой скоростью непосредственно в полость формы.

*Прибыль* 7 (рис. 3) называют технологический прилив, который, затвердевая в последнюю очередь, предотвращает образование усадочных раковин в теле отливки. Усадочная раковина при этом формируется в прибыли.

Через *выпор* 5 (рис. 3) выходит воздух и другие газы, которые образуются в полости формы во время её заливки расплавленным металлом. Выпор также предназначен для уменьшения динамического давления металла на форму. Газы возникают в порах формовочной и стержневой смеси 2. Если их не удалять, то они могут пройти через границу «форма — металл» и попасть в отливку, образуя так называемые газовые раковины. Поэтому для лучшего удаления газов в полуформах верха и низа, а также в стержнях устраивают вентиляционные каналы 6, способствующие выходу газов из литейной формы.

В литниковую систему могут входить дополнительные прибыли и питающие выпоры, устраиваемые для утолщенных отливок из стали и цветных сплавов.

Уплотнение формовочной смеси в верхних и нижних полуформах, как правило, выполняют в опоках 3, 4, представляющих собой открытые с двух противоположных сторон металлические ящики. После изготовления полуформ низа, верха и стержней производят операции сборки форм и их заливки жидким металлом.

После заливки металла, его затвердевания и охлаждения до требуемой температуры производят выбивку форм (извлечение отливки из формы).

Выбитая из формы отливка подвергается обрубке (отделению литниковой системы, прибылей, заусенцев и т. д.) и очистке, затем, если необходимо — термообработке. Перед сдачей в механический цех все отливки проходят необходимый контроль. При этом часть отливок может быть отправлена на устранение дефектов (заварку, пропитку специальными составами и др.). Основными причинами брака отливок являются трещины, усадочные и газовые раковины.

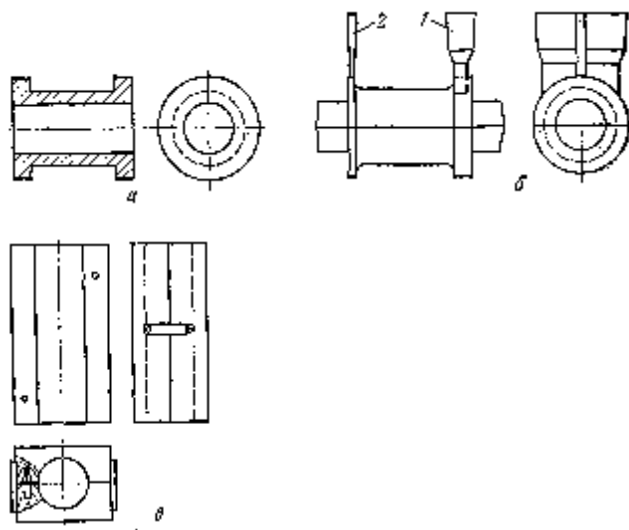


Рис. 2. Эскиз литой заготовки (а), модели (б) и стержневого ящика (в).

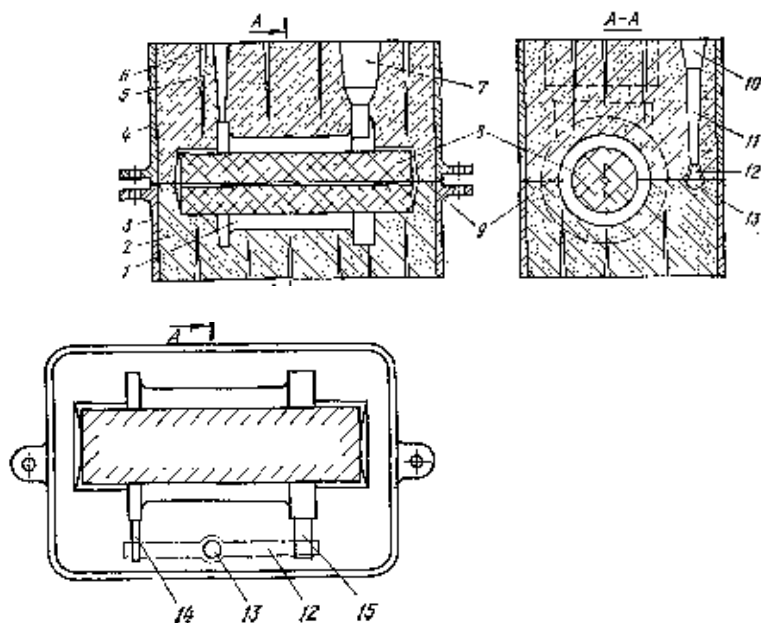


Рис. 3. Эскиз литейной формы: 1 — собственно полость формы; 2 — формовочная смесь; 3 — опока нижней полуформы; 4 — опока верхней полуформы; 5 — выпор; 6 — вентиляционный канал; 7 — прибыль; 8 — стержень; 9 — плоскость разъёма формы (лад); 10 — литниковая воронка; 11 — стояк; 12 — шлакоуловитель; 13 — зумпф; 14, 15 — питатели.

### Формовочные материалы

Материалы, из которых изготовляют литейные формы, исключая металлические, называют *формовочными материалами*.

**Виды формовочных материалов:** исходные; формовочные смеси (для изготовления форм); стержневые смеси (для изготовления стержней); материалы окончательной отделки форм и стержней; отработанные — бывшие в употреблении смеси.

*Исходными* являются материалы, из которых приготавливают формовочные и стержневые смеси, а также материалы окончательной отделки форм и стержней.

*Формовочные и стержневые смеси* представляют собой предварительно подготовленные, взятые (в зависимости от назначения) в определённой пропорции, равномерно перемешанные между собой исходные материалы. Стержневые смеси подвергаются значительно бóльшим термическим и механическим воздействиям, чем формовочные, так как стержень практически со всех сторон окружён расплавленным металлом. Для улучшения механических, технологических и других свойств в формовочные и стержневые смеси вводят вспомогательные формовочные материалы: связующие (смолы, жидкое стекло), противопригарные (пылевидный кварц, каменноугольная пыль), защитные (борная кислота, фтористая присадка) и др. Перед установкой стержней в формы их обязательно просушивают.

#### Состав формовочных смесей:

1) Песок формовочный (ГОСТ 2138).

Песок формовочный — это диспергированный горный минерал.

В состав песка входит кремнезём ( $\text{SiO}_2$ ), который обладает температурой плавления равной  $1713^\circ\text{C}$  и плотностью  $2,5 \div 2,8 \text{ г/см}^3$ .

В песке также содержатся вредные примеси, такие как: слюда, полевошпат, окислы железа и щелочноземельных металлов, которые имеют более низкую температуру плавления и поэтому снижают огнеупорность песка.

Основным показателем качества песка является показатель содержания глины и примесей.

## Огнеупорность песков

По огнеупорности пески позволяют отливать в песчаноглинистые смеси все цветные металлы, а также сталь и чугун. Повысить огнеупорность песка можно путем введения в него огнеупорных материалов.

### Виды огнеупорных материалов:

Циркон ( $ZrO_2+SiO_2$ ); Магнезит ( $MgCO_3$ ); Хромистый железняк ( $FeOCr_2O_3$ ).

*Материалами для окончательной отделки форм и стержней* являются огнеупорные литейные краски, замазки, клеи и т. п. материалы, которые часто называют вспомогательными.

### Основные свойствами формовочных и стержневых:

1) прочность на сжатие и разрыв, поверхностная прочность или осыпаемость; 2) газопроницаемость (способность смеси пропускать газы); 3) газотворность (способность нагретой смеси выделять газы); 4) гигроскопичность; 5) формуемость; 6) текучесть; 7) уплотняемость; 8) выбиваемость и др.

Все эти свойства контролируются стандартными методиками на специальных приборах.

Составы и уровни свойств смесей назначают в зависимости от характера технологического процесса, в свою очередь, являющегося функцией большого числа факторов (масштаба производства, материала, массы, степени сложности, тонкостенности отливок и др.).

## Вопрос 2. Производство чугуна

*Чугунами* называются сплавы на основе железа (Fe) и углерода (C) с содержанием углерода более 2,14% (мас.). Около 80% всего количества выплавляемого чугуна составляет передельный чугун, являющийся исходным продуктом для производства стали. Для производства фасонного литья на машиностроительных заводах используют литейный чугун (15 – 20%), а в качестве легирующих добавок и раскислителей при выплавке стали — ферросплавы: ферромарганец и ферросилиций (1 – 2% масс.).

### Исходные материалы для производства чугуна

В поверхностных слоях земной коры железо редко встречается в чистом виде. Благодаря большой склонности железа к окислению, в земной коре оно находится в виде окислов в смеси с окислами других химических элементов.

*Железная руда* — это горная порода, содержащая железо в таких количествах, при которых её технически возможно и экономически целесообразно перерабатывать. Руда состоит из смеси железосодержащих минералов с пустой породой, в состав которой входят различные соединения, прежде всего кремнезём ( $SiO_2$ ), глинозём ( $Al_2O_3$ ), оксид кальция ( $CaO$ ) и оксид магния ( $MgO$ ). Реже в состав пустой породы входит магнезит ( $MgCO_3$ ) и доломит ( $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ ).

*Пустой породой руды* называется такая её составляющая, которая не вносит существенных технологических осложнений в металлургическую переработку руды и легко отделяется от рудных минералов или в процессе обогащения или переходит в шлаки при плавке.

Пригодность железной руды для доменной плавки зависит от содержания железа (Fe), состава пустой породы и концентрации таких вредных примесей, как сера (S), фосфор (P), мышьяк (As) и др. Вредные примеси осложняют металлургические процессы, и, загрязняя основной металл, снижают его свойства.

В зависимости от количества рудного вещества различают богатые и бедные руды. Железные руды принято называть богатыми, если они содержат более половины железа (Fe); но это понятие меняется со временем. Также важную роль играет восстановимость руды, которая определяется скоростью восстановления из неё железа и

зависит от природы оксида железа, плотности и пористости руды. Чем плотнее и менее пориста руда, тем хуже её восстановимость.

К основным рудообразующим минералам, наиболее часто используемым для производства чугуна, относятся следующие железные руды:

1) *Магнитный железняк (магнетит)*. Содержит железо в количестве 40 – 70% в виде оксида  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (закись-окись железа) и обладает хорошо выраженными магнитными свойствами.

2) *Красный железняк (гематит)*. Содержит 45 – 65% железа в виде безводного оксида  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В качестве пустой породы гематит содержит кремнезём ( $\text{SiO}_2$ ).

3) *Бурый железняк (лимонит)*. Содержит железо в виде водных окислов типа  $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$  с переменным количеством гидратной влаги.

4) *Шпатовый железняк (сидерит)*. Содержит 30 – 40% железа в виде карбоната  $\text{FeCO}_3$ .

Кроме железных руд, для металлургического производства чугуна требуются следующие *исходные материалы*: марганцевая руда, флюсы, топливо и воздух. Дадим краткую характеристику этим материалам.

*Марганцевые руды* — горные породы, содержащие марганец (Mn) в виде различных окислов  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  с общим содержанием марганца в пределах 25 – 40% (мас.). Марганец (Mn) при выплавке чугуна используется в первую очередь как раскислитель.

*Флюсы* — материалы (вещества) определённого химического состава, способствующие превращению в шлак пустой породы, вредных примесей и золы топлива. Данное определение справедливо только для металлургического производства. Доменные флюсы также вводятся в доменную печь с целью понижения температуры плавления пустой породы железной руды.

Основным видом топлива, используемым при выплавке чугуна в доменных печах и вагранках, является кокс.

*Кокс (каменноугольный кокс)* — представляет собой твёрдую пористую массу, которую получают сухой перегонкой (прокаливанием) при температуре 1000 – 1200°C без доступа воздуха некоторых сортов каменных углей, называемых коксующимися. Средняя теплота сгорания кокса составляет 29,3 МДж/кг (7000 ккал/кг).

**В современном доменном производстве кокс играет две важные роли:**

1) Служит основным видом топлива, обеспечивая нагрев рабочей части доменных печей до необходимой температуры;

2) Обеспечивает восстановление железа из его оксидов (см. ниже).

Благодаря своей высокой механической прочности, пористости и высокой теплотворной способности он стал применяться на всех металлургических предприятиях чёрной металлургии, вытеснив применявшийся ранее для этих целей древесный уголь.

Совокупность материалов исходного сырья, взятых в определённом массовом соотношении, предназначенных для получения металлов, называется *шихтой*. Именно шихта поступает в плавильные агрегаты для получения металлов.

### **Подготовка исходных материалов к плавке**

Перед плавкой руды проходят специальную подготовку, которая повышает производительность доменных печей и уменьшает расход топлива. Основными операциями подготовки руд к плавке являются: 1) дробление; 2) сортировка; 3) обогащение; 4) обжиг; 5) агломерация (спекание) обогащённой руды.

## **Вопрос 3. Производство стали**

### **Производство стали**

*Стальями* называются сплавы на основе железа (Fe) и углерода (C) с содержанием углерода до 2,14% (мас.). Практическое применение нашли стали с содержанием углерода (C) до 1,5% (мас.). Постоянными примесями в сталях являются марганец (Mn),



кремний (Si), фосфор (P) и сера (S). Кроме углеродистых сталей, в машиностроении и строительстве широко применяют легированные стали, в состав которых для улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств дополнительно введены различные химические элементы (хром (Cr), никель (Ni), молибден (Mo) и др.

В последние годы широко применяются электрометаллургические способы производства стали, позволяющие получать наиболее сложные и высоколегированные стали. Ниже рассмотрим три основных способа производства стали, применяемых в современном металлургическом производстве: в кислородных конверторах; в мартеновских печах, в электрических печах.

Исходными материалами для получения стали служат передельный (белый) чугун, стальной лом и ферросплавы. Чугун по сравнению со сталью содержит большее количество углерода (C) и примесей. Поэтому *основная задача передела чугуна в сталь* состоит в удалении избытка углерода (C) и примесей с помощью окислительных процессов, протекающих в сталеплавильных агрегатах.

### Конверторное производство стали

Сталь в конвертерах выплавляют бессемеровским, томасовским и кислородно-конверторным способами.

В основе конверторных процессов лежит обработка жидкого чугуна газообразными окислителями без подвода извне дополнительного тепла. Процесс выплавки стали в конверторах осуществляется только за счёт химической теплоты экзотермических реакций окисления примесей с учётом физической теплоты жидкого чугуна. Продувка чугуна производится сверху или через днище в специальных агрегатах — конверторах. Конверторную плавку характеризует высокая производительность за счёт большой реакционной поверхности металл-окислитель и высокой скорости окисления примесей.

*Конвертор* представляет собой большую реторту, наружная поверхность которой выполнена из листовой стали значительной толщины, а внутренняя футерована огнеупорным материалом. Внешне конвертор напоминает сосуд грушевидной формы. Вместимость современных конверторов составляет 250 – 400 т.

*Кислородно-конверторный способ выплавки стали.* Разработка данного способа выплавки стали явилось новым важным этапом в совершенствовании сталеплавильного производства. Замена воздушного дутья кислородным поставило конверторный способ производства стали на современный уровень и обеспечило ему повсеместное широкое применение.

Применение технически чистого кислорода (не менее 99,5% O<sub>2</sub>) для продувки чугуна позволило за счёт снижения содержания азота (N<sub>2</sub>) улучшить качество кислородно-конвертерной стали. В нашей стране в настоящее время используются кислородные конвертеры ёмкостью 100 – 400 т. Объём выплавляемой кислородно-конвертерной стали в нашей стране составляет около 35% от общего объёма её производства. На большинстве металлургических предприятий для кислородно-конверторного способа выплавки стали используют конвертеры с глухим дном (см. рис. 1).

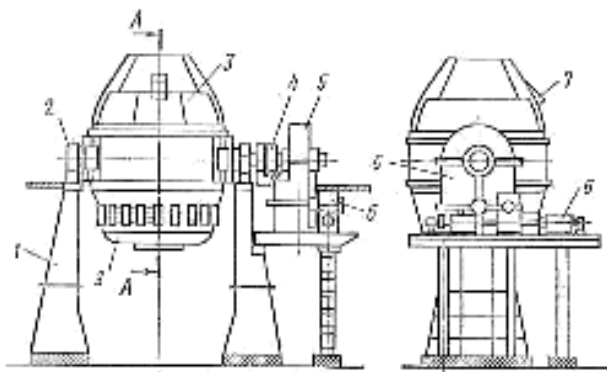


Рис. 1. Кислородный конвертор на 100 – 130 т: 1 — опорная станина; 2 — опорные подшипники; 3 — корпус конвертора; 4 — муфта соединения с механизмом поворота; 5 — механизмы (редукторы) поворота конвертора; 6 — электродвигатель; 7 — отверстие для выпуска стали (лётка); 8 — отъемное днище.

Схема устройства кислородного конвертера в разрезе представлена на рис. 2. I. Корпус конвертера 1 изготавливают из стальных сваренных встык листов толщиной до 100 мм. Корпус имеет среднюю цилиндрическую часть, глухое дно и симметричную сужающуюся горловину 2. У основания горловины расположено отверстие для выпуска стали 3 (лётка). Такое расположение лётки способствует лучшему отделению стали от шлака и уменьшает опасность восстановления фосфора (Р) при сливе металла. Рабочее пространство конвертера футеровано смолодоломитовыми кирпичом, а сталевыпускное отверстие — магнезитовым или магнезито-хромитовым кирпичом. Конвертор может поворачиваться в вертикальной плоскости благодаря опорному поясу 4 с цапфами, расположенными в подшипниках опор. Одна или обе цапфы являются приводными. Кислород ( $O_2$ ) подаётся в конвертор сверху через водоохлаждаемую фурму 5, опускаемую в горловину 2 конвертера. Схема устройства наконечника водоохлаждаемой фурмы 5 для подачи кислорода ( $O_2$ ) в конвертор представлена на рис. 2. II. Подача сверху обусловлена образованием высокотемпературной реакционной зоны в месте вдувания кислорода ( $O_2$ ) в металл и необходимостью сохранения футеровки днища конвертера. Фурма 5 способна перемещаться вверх-вниз. При подаче кислородного дутья она находится на расстоянии 300 – 2000 мм от поверхности ванны. Кислород ( $O_2$ ) подаётся под давлением 0,8 – 1,0 МПа. Расход кислорода ( $O_2$ ) и расположение воздуходувной фурмы 5 над поверхностью расплавленного металла зависит от ёмкости конвертера и интенсивности продувки. Так, расход кислорода ( $O_2$ ) может составлять 2,5 – 4 м<sup>3</sup>/т металла в 1 мин. Продолжительность плавки в современном кислородном конвертере составляет 35 – 50 мин.

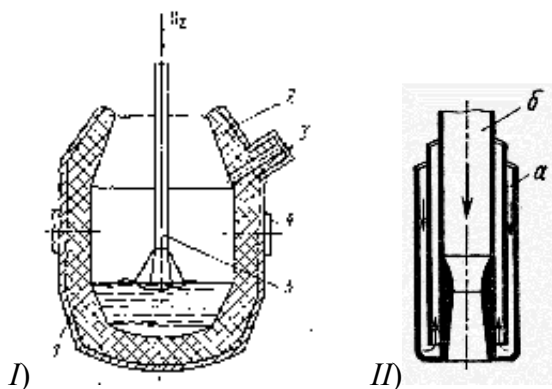


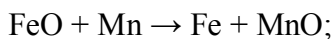
Рис. 2. I — Схема устройства кислородного конвертера: 1 — корпус конвертера; 2 — горловина; 3 — отверстие для выпуска стали (лётка); 4 — опорный пояс; 5 — фурма водоохлаждаемая для подачи кислорода; II — Схема устройства наконечника водоохлаждаемой фурмы для подачи кислорода: а — каналы для циркуляции воды; б — канал для подачи кислорода в наконечнике фурмы.

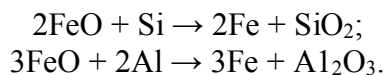
Таким образом, кислород ( $O_2$ ) при данном способе выплавки не вдувается под зеркало металла (как воздух в бессемеровском и томасовском процессах), а подаётся на поверхность залитого в конвертор металла. Однако и при таком способе подачи кислорода процесс выплавки сопровождается интенсивным тепловыделением. Это даёт возможность перерабатывать чугуны с различным содержанием примесей, а также вводить в конвертор не только жидкий металл, но и добавлять к нему для охлаждения скрап (металлолом) или железную руду. Количество добавляемого скрапа на некоторых металлургических предприятиях может составлять до 30% от массы металла.

Исходными материалами для конвертерной плавки являются жидкий чугун, металлический лом (металлическая часть шихты) и шлакообразующие, окислители (неметаллическая часть шихты).

*Раскисление* стали в ковше — обязательная завершающая операция. Окислительный характер плавки приводит к высокой концентрации закиси железа (FeO) в металле, вызывающей в стали красноломкость при горячей деформации и ухудшение механических свойств. *Раскислением* называется процесс восстановления железа из FeO. При разных способах получения стали раскисление ведётся различно.

Обычно раскисление производят марганцем (Mn), кремнием (Si) и алюминием (Al) по реакциям:





Кремний (Si) и марганец (Mn) вводят в виде соответствующих ферросплавов, алюминий (Al) — в чистом виде. Марганец (Mn), кремний (Si) и алюминий (Al) называют *раскислителями стали*. Данные раскислители вводятся в расплавленную сталь после её вторичной продувки кислородом (O<sub>2</sub>). Образующиеся окислы (MnO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) данных раскислителей образуют с окислами железа (FeO) жидкую шлаковую фазу, помогающую вывести продукты раскисления из металла. Иногда часть раскислителей вводят в конвертор за несколько минут до разливки в ковш. Завершается раскисление обычно в разливочном ковше. Общий расход технического кислорода (O<sub>2</sub>) на получение 1 т. стали в кислородном конверторе составляет 50 – 60 м<sup>3</sup>, что незначительно превышает теоретически необходимое количество.

В зависимости от степени раскисленности различают *кипящие, полуспокойные и спокойные стали*.

**К достоинствам кислородно-конвертерного способа следует отнести:**

- 1) Более низкая по сравнению с мартеновской себестоимость кислородно-конвертерной стали, благодаря меньшим затратам на передел на 20 – 30% при сопоставимой стоимости шихты;
- 2) Конвертерный процесс легче поддается комплексной механизации и автоматизации;
- 3) Строительство кислородно-конвертерного цеха одинаковой производительности с мартеновским требует меньших капитальных затрат.

Перечисленные преимущества кислородно-конвертерной стали позволяют в ряде развитых стран полностью (Япония) или в основном (США, Германия, Великобритания) заменить мартеновские печи кислородными конверторами. В отечественной металлургии также происходит постепенное вытеснение мартеновского процесса кислородно-конвертерным.

**Недостатком кислородно-конвертерного способа получения стали является** большое пылеобразование, обусловленное обильным окислением и испарением железа; угар металла составляет 6 – 9%, что значительно больше, чем при других способах производства стали. Это вызывает необходимость обязательного сооружения при этих конверторах сложных и дорогих пылеочистительных установок.

Конверторная сталь имеет ограниченный круг потребителей, так как высококачественные, а тем более легированные стали, конверторными способами не производятся.

### **Мартеновское производство стали**

Мартеновский способ производства стали был разработан в 1865 году во Франции инженером П. Мартеном. При разработке данного способа Мартен для сталеплавильной печи применил принцип регенерации тепла отходящих печных газов для подогрева топлива и воздуха, подаваемых в печь. Современные мартеновские печи строят разной вместимости и производительности — от 10 до 500 – 900 т.

Мартеновская печь является пламенной регенеративной печью. В рабочем пространстве печи сжигается газообразное или жидкое топливо. Необходимая высокая температура для получения стали в жидком состоянии обеспечивается за счёт регенерации тепла отходящих газов. Схема работы мартеновской печи представлена на рис. 3.

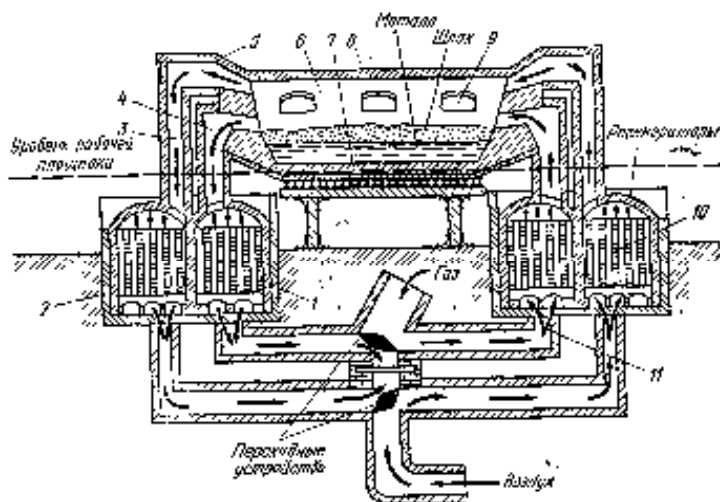


Рис. 3. Схема работы мартеновской печи: 1 — газовые регенераторы; 2 — воздушные регенераторы; 3, 4 — воздушные и газовые вертикальные каналы; 5 — головки; 6 — рабочее пространство печи; 7 — подина печи; 8 — свод; 9 — рабочие окна; 10 — насадка регенератора; 11 — борова.

Верхняя часть мартеновской печи состоит из плавильного (рабочего) пространства 6, головок 5 и вертикальных каналов 3, 4. Плавильное пространство 6 ограничено передней стенкой с завалочными (рабочими) окнами 9, задней стенкой с выпускным отверстием, снизу — подиной 7 и откосами, сверху — сводом 8, с торцов — головками 5. Через завалочные окна 9 в печь загружают шихту и дополнительные материалы по ходу плавки, удаляют и наводят шлак, берут пробы металла и шлака. Выпуск готового металла и шлака производят через отверстие в задней стенке (лётку), находящееся на уровне подины 7. На время плавки отверстие заделывают магнезитовым порошком и огнеупорной глиной.

Рабочее пространство печи 6 футеровано огнеупорным кирпичём. В современном сталеплавильном производстве для кладки стен и подины 7 мартеновских печей применяют и кислые и основные огнеупорные материалы. Поэтому, в зависимости от вида футеровки, различают *основные* и *кислые мартеновские печи*.

В *основных печах* подину 7 и откосы выкладывают основным магнезитовым кирпичём, а сверху наваривают слой магнезитового или доломитового порошка. Подвесной свод 8 выполняют из хромомагнезитового кирпича. Использование основной футеровки позволяет загружать в печь в качестве флюса известь ( $\text{CaCO}_3$ ), получать основной шлак и удалять, вредные примеси — серу (S) и фосфор (P).

В *кислых печах* подину 7 и откосы футеруют кислым динасовым кирпичём на основе кремнезёма, а верхний слой наваривают из кварцевого песка. Свод печи 8 также выполняют из динаса. Из-за невозможности удаления серы (S) и фосфора (P) из металла кислый процесс применяют значительно реже основного. В кислых печах в качестве шихты либо используют чистые по сере и фосфору чугун и стальной лом, либо переливают жидкую заготовку из основной печи после удаления из неё вредных примесей (дуплекс-процесс: основная → кислая мартеновская печь). Сталь, выплавленная в кислых мартеновских печах, содержит меньшее количество растворённых газов, лучше раскислена, характеризуется меньшим содержанием неметаллических включений, более благоприятной их формой и равномерным распределением в объёме металла.

Ванна печи, удерживающая расплавленные материалы, имеет форму чаши, и её длину и ширину обычно определяют на уровне порогов завалочных окон 9, через которые производится загрузка в печь твёрдых исходных материалов. Современная 500-тонная печь имеет ванну длиной 16,4 м, шириной 5,9 м и глубиной более 1 м. Произведение этой длины на ширину принято называть условной площадью пода мартеновской печи. Глубиной ванны считают размер в самой глубокой её части, которая расположена около выпускного отверстия, от подины, до уровня порогов завалочных окон 9.

Боковую кладку и под 7 мартеновской печи снаружи укрепляют прочными стальными балками. До недавнего времени своды 8 мартеновских печей делали арочными и выкладывали из динасового кирпича. Такие своды не допускали их нагрев выше  $1700^\circ\text{C}$ , что

тормозило производительность мартеновских печей. Такие своды обычно выдерживали 200 – 250 плавов. Теперь в основных печах своды 8 делают из термостойкого хромомагнетитового кирпича. Изменилась и конструкция самого свода. Отдельные блоки свода подвешиваются на тягах к поперечным балкам каркаса печи и свод получается подвесным. Применение хромомагнетита и новой конструкции свода позволяют производить нагрев до 1800°C. Такие подвесные хромомагнетитовые своды выдерживают до 500 плавов.

В торцах рабочего пространства печи 6 расположены головки 5, в которых сходятся каналы для подвода топлива, воздуха и отвода продуктов горения. Головки 5 соединены с нижней частью печи вертикальными каналами 3, 4. Именно в головках 5 образуется газовое пламя. Внутри стенок головок 5 обычно вставляют кессоны, в которых циркулирует вода для сохранения огнеупорного материала головок от разрушения. Нижняя часть мартеновской печи расположена под рабочей площадкой. Оно состоит из шлаковиков (на рис. 3 не показаны), регенеративных камер 10 и боровов 11 с перекидными клапанами (перекидными устройствами). Шлаковики устанавливаются перед регенераторами 1, 2; в них происходит отделение от дымовых газов частиц шлака и пыли, поступающих из рабочего пространства 6 печи с отходящими газами. Основное назначение шлаковиков — предохранение регенераторов от быстрого загрязнения.

На рис. 3 представлена схема работы мартеновской печи, на которой показано поступление топлива и воздуха с правой стороны, при этом движение газов показано стрелками. В рабочем пространстве печи 6 топливо смешивается с воздухом и сгорает с образованием факела пламени с температурой 1800 – 1900°C. Газообразные продукты горения поступают в каналы противоположной левой головки 5, затем в вертикальные каналы (3, 4), шлаковики и регенераторы (1, 2). Температура дымовых газов, поступающих в регенераторы, составляет 1500 – 1550°C.

Регенераторы 1, 2 представляют собой камеры с выложенными клеткой насадками 10 из огнеупорного шамотного кирпича. Мартеновские печи, для работы которых используется газообразное топливо, оборудуют четырьмя регенераторами (по два с каждой стороны печи). При прохождении дымовых газов насадки 10 одной пары регенераторов, в нашем случае — левых (см. рис. 3), нагреваются до 1300 – 1400°C. После перекидки клапанов движение топлива, воздуха и газов меняется на противоположное. Через один из нагретых регенераторов в рабочее пространство печи 6 пойдёт газообразное топливо, через другой — воздух. Проходя через насадку 10, они нагреваются до 1100 – 1200°C. В это время другая пара регенераторов нагревается, аккумулируя тепло отходящих из рабочего пространства печи 6 газов. После охлаждения насадок первой пары регенераторов до определённой температуры происходит очередная перекидка клапанов (перекидных устройств) и процесс повторяется в обратном направлении. Из регенераторов 1, 2 дымовые газы идут по боровам 11 в дымовую трубу, по пути проходят через котёл-утилизатор и газоочистку.

Мартеновский способ получения производства стали получил широкое применение благодаря возможности использования различного сырья и разнообразного топлива. В зависимости от используемого сырья в настоящее время мартеновскую плавку ведут одним из двух способов: *скрап-процессом* или *скрап-рудным процессом*.

Плавку стали в основных мартеновских печах *скрап-процессом* ведут на тех заводах, где нет доменных печей и жидкий чугун не производится. Основной скрап-процесс обычно применяют в печах малой ёмкости (до 100 т) на машиностроительных заводах. Исходными материалами являются стальной лом (скрап), расход которого составляет 60 – 70%, чушковый передельный чугун (30 – 40%) и известь ( $\text{CaCO}_3$ ) в количестве 8% от массы металла.

*Скрап-рудный процесс* применяют на больших металлургических заводах, имеющих доменное производство жидкого чугуна. Плавку обычно ведут как в средних, ёмкостью 150 – 400 т, так и в крупных мартеновских печах ёмкостью до 900 т. В качестве шихты в печи загружают стальной лом (20 – 40%) и заливают жидкий чугун (60 – 80%).

## Производство стали в электропечах

Электроплавка — наиболее совершенный способ получения стали, имеющий ряд преимуществ по сравнению с производством стали в конвертерах и мартеновских печах. Простота регулировки теплового режима и высокие температуры процесса позволяют использовать шлаки высокой основности, что обеспечивает более полное удаление вредных примесей. Восстановительная атмосфера печи способствует глубокому раскислению стали. В электрических печах выплавляют высококачественные конструкционные, инструментальные, коррозионностойкие, жаростойкие и другие специальные стали и сплавы.

Для выплавки стали применяют электродуговые и индукционные электрические печи. Ёмкость наиболее широко применяемых дуговых печей колеблется в широких пределах 0,5 – 360 т. Печи средней и большой ёмкости обычно используют на металлургических заводах для получения слитков, а печи малой ёмкости — на машиностроительных предприятиях для получения стальных отливок.

## Вопрос 4. Производство меди

Содержание меди (Cu) в земной коре составляет 0,01%. Как древнейший металл, медь стала использоваться человеком очень давно. В природе встречались самородки меди, из которых изготавливались украшения и простейшие оружия путём обработки каменными орудиями.

Наиболее важными свойствами меди (Cu), обеспечившими ей широкое применение, являются высокие электропроводность и теплопроводность, высокая пластичность и способность образовывать технологичные сплавы, которые хорошо обрабатываются и обладают хорошими механическими свойствами.

В настоящее время самородная медь (Cu) встречается редко, и главным природным источником для её производства являются сульфидные руды (сернистые минералы меди), на которые приходится около 80% её мировой добычи.

К сульфидным рудам относятся:

- 1) *медный колчедан (халькопирит)* ( $\text{CuFeS}_2$  или  $\text{CuS} \cdot \text{FeS}$ );
- 2) *борнит* ( $5\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Fe}_2\text{S}_3$ );
- 3) *халькозин* ( $\text{CuS}$ ) и др.

В этих рудах (сернистых минералах меди) обычно содержится много пирита ( $\text{FeS}_2$ ), а иногда и сульфиды различных цветных достаточно ценных металлов. То есть многие сульфидные руды являются полиметаллическими и кроме меди Cu в них довольно часто содержатся цинк (Zn), свинец (Pb), никель (Ni), молибден (Mo) и т. д. Также, нередко в сульфидных рудах содержится серебро (Ag) и золото (Au). Пустая порода сульфидных руд обычно состоит из песчаников, глины, известняка ( $\text{CaCO}_3$ ) и других составляющих.

**Извлечение меди из руд может производиться двумя способами:**

- 1) *гидрометаллургическим* (способ состоит в выщелачивании меди из руд серной кислотой ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) или нашатырным спиртом ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ));
- 2) *пирометаллургическим* (способ состоит в плавке на медный штейн с последующей восстановительной плавкой).

Наиболее широкое распространение получил пирометаллургический способ извлечения меди из руд.

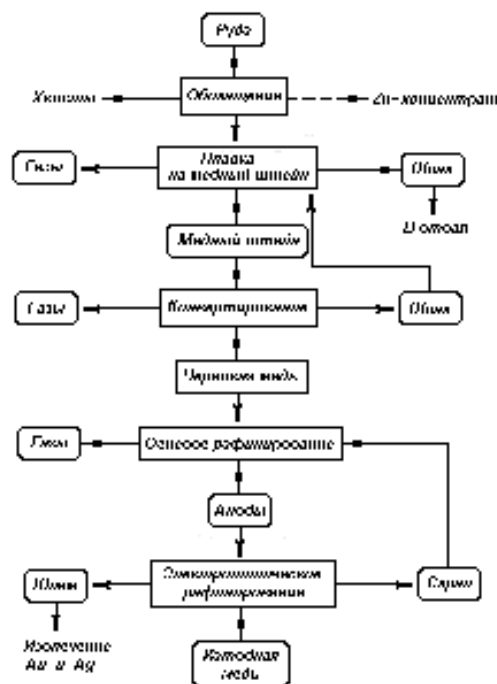


Рис.1. Схема получения меди из сульфидных руд пирометаллургическим способом.

**Пирометаллургический способ получения меди включает следующие операции:**

- 1) операции обогащения руд с получением медного концентрата;
- 2) обжиг полученного медного концентрата;
- 3) плавку медного концентрата на *медный штейн* — сплав, состоящий в основном из сульфидов меди ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), сульфидов железа ( $\text{FeS}$ ) и сульфидов небольшого количества примесей;
- 4) получение черновой меди;
- 5) рафинирование черновой меди с целью получения химически чистой.

Упрощённая схема получения меди из сульфидных руд пирометаллургическим способом представлена на рис.1. Реализация этой схемы на различных этапах переработки руды, особенно до получения медного штейна, может проводиться в различных печах и в различных технологических вариантах. В представленной схеме первый передел медной руды — это обогащение. Однако бывают случаи, когда медные руды, богатые серой (S) (свыше 35%S), плавят и без обогащения для извлечения из них не только меди (Cu), но и серы (S) (например, медно-серная плавка).

## Вопрос 5. Основы порошковой металлургии

*Порошковые материалы (порошковые сплавы)* представляют собой материалы, получаемые из металлических порошков (на основе железа, из цветных металлов, в некоторых случаях с добавкой графита или других примесей), подвергаемых прессованию при высоком давлении с целью придания определённой конфигурации заготовке и последующему спеканию. Такой способ получения порошковых сплавов называется *порошковой металлургией*.

Порошковые сплавы называют также металлокерамическими в связи со сходством их изготовления с изготовлением керамических изделий.

Порошковые сплавы широко применяются в различных отраслях машиностроения благодаря высокой экономичности технологии их изготовления (по сравнению с различными методами литья и штамповки). Особенно эффективны порошковые сплавы на основе железа как заменители цветных металлов.

Технологический процесс производства порошковых материалов (сплавов) включает следующие составляющие: 1) получение металлических порошков; 2) подготовка шихты; 3) прессование; 4) спекание полученной заготовки. Иногда изделия из порошковых сплавов

подвергают дополнительной обработке — калиброванию, горячей допрессовке, термической и химико-термической обработке, нанесению декоративных и защитных покрытий.

*Получение металлических порошков.* Известны следующие способы получения металлических порошков: 1) механическим измельчением железной и стальной стружки в шаровых, молотковых и вихревых мельницах; 2) восстановлением из окислов тугоплавки металлов (вольфрам (W), молибден (Mo), железо (Fe) и др.); 3) распылением жидкого металла сжатым воздухом или паром (алюминия (Al), меди (Cu), олова (Sn) и др.); 4) электролитическим осаждением — меди (Cu), олова (Sn), железа (Fe) и др.

*Подготовка шихты.* Порошок подвергают очистке от загрязнений, сушке, дополнительному измельчению, отжигу для снятия наклёпа и получения однородной структуры (в защитной или восстановительной атмосфере), распределению по степени дисперсности (с помощью набора стандартных сит), смешиванию (в специальных смесителях).

*Прессование.* Прессование производят в специальных штампах — пресс-формах. При прессовании происходит механическое сцепление частиц металлического порошка и образование заготовки определённой конфигурации.

*Спекание заготовок.* Спекание представляет собой специальный отжиг спрессованных заготовок. Его производят с целью повышения механических свойств спрессованных заготовок.

В процессе спекания происходит восстановление окислов металлических частиц и образование прочного металлического контакта, снятие внутренних напряжений и искажений кристаллической решётки частиц металла, рекристаллизация, диффузия. В результате спекания малопрочные механические связи между частицами металлического порошка заменяются более прочными межатомными связями.

Спекание осуществляют в печах с защитной атмосферой. Продолжительность спекания обычно составляет 1 – 3 ч.

Температура спекания заготовок, спрессованных из порошка одного металла, составляет примерно 75% от температуры плавления данного металла. Например, для железа (Fe) эта температура составляет 1100 – 1200°C, для меди (Cu) — 800 – 900°C, для молибдена (Mo) — 2100 – 2300°C.

Спекание заготовок из металлических порошков, в состав которых входят частицы металлов с большой разницей в температурах плавления, производят при температуре, превышающей температуру плавления наиболее легкоплавкого компонента. При спекании образуется жидкая фаза, связывающая частицы более тугоплавкого компонента. Так, например, температура спекания порошков железа (Fe) и меди (Cu) составляет 1100 – 1200°C, меди (Cu) и олова (Sn) — 700 – 800°C.

Прессование и спекание можно совместить в одну технологическую операцию, называемую *горячим прессованием*. В этом случае применяют более низкое давление, составляющее 5 – 10% давления обычного прессования и более низкие температуры (на 10 – 30% ниже температуры спекания холоднопрессованных заготовок).

Наиболее распространёнными видами брака при спекании является пережог, плохо пропечённая сердцевина, неравномерная плотность, усадочные макропоры, коробление, трещины, расслоение, несоответствие заданным свойствам и размерам.

## **Применение порошковых материалов**

В зависимости от назначения порошковые сплавы делят на: 1) антифрикционные; 2) фрикционные; 3) плотные; 4) тугоплавкие; 5) электротехнические; 6) твёрдые сплавы.

*Антифрикционные сплавы.* Эти сплавы получают из порошков как чёрных, так и цветных металлов. При наличии пор, в которых удерживается смазочный материал, и наличии графита (C), являющегося хорошим твёрдосмазочным материалом, подшипники скольжения отличаются малым износом, малым коэффициентом трения, потребляют меньшее количество смазочного материала, хорошо прирабатываются.



*Фрикционные сплавы.* Эти сплавы применяются для тормозных устройств. В связи с назначением они должны иметь высокий коэффициент трения, обладать износостойкостью, высокой теплопроводностью, хорошей прирабатываемостью. Например, на сегодняшний день в промышленности широкое применение нашли сплавы, состоящие из 60 – 75% меди (Cu), 5 – 8% свинца (Pb), 5 – 8% олова (Sn), до 22% никеля (Ni), до 22% железа (Fe), 0,5% кремнезёма (SiO<sub>2</sub>), 4 – 8% графита (C) и до 0,3% асбеста. Фрикционные сплавы отличаются невысокой прочностью, и, поэтому, чаще всего, они используются в качестве тонкого слоя, который соединяется (чаще всего спеканием под давлением) со стальной основой (диском, лентой).

*Плотные сплавы.* Эти сплавы получают из порошков железа (Fe), стали, меди (Cu), бронзы, латуни. Они применяются для изготовления деталей машин и измерительного инструмента.

*Тугоплавкие металлы и сплавы.* Эти металлы — вольфрам (W), молибден (Mo), титан (Ti) и др., применяемые в виде прутков, проволоки и листа, получают прессованием порошков в холодном состоянии в брикеты, спеканием в атмосфере водорода (вольфрам и молибден) или в вакууме (титан).

Вольфрам (W) применяют для изготовления нитей накала в электролампах, для деталей радиоламп, для электрических контактов, электронагревателей и др. Молибден (Mo) применяют для нужд электролампового и электровакуумного производства (подвески, сетки, аноды и др.).

Кроме чистых металлов методом порошковой металлургии получают сплавы тугоплавких металлов. Например, сплавы вольфрама (W) с молибденом (Mo) для электровакуумной аппаратуры, сплавы вольфрам (W) – молибден (Mo) – никель (Ni) применяются для изготовления изделий, спаиваемых в стекло.

*Электротехнические сплавы.* Эти сплавы применяются для изготовления электрических контактов, магнитов, сердечников индукционных катушек. Получают электротехнические сплавы из порошков железа (Fe), вольфрама (W), бронзы и графита (C), железа (Fe) и никеля (Ni) и специальных сплавов.

Скользящие контакты для электродвигателей изготавливают из бронзографитных и меднографитных сплавов. Постоянные магниты изготавливают из порошков металлов алюминия (Al) – никеля (Ni) – меди (Cu) (сплав Ални), алюминия (Al) – никеля (Ni) – кобальта (Co) – меди (Cu) (сплав Алнико).

В высокопрочном наиболее легированном алюминиевом сплаве В95 в результате применения метода порошковой металлургии увеличена концентрация легирующих элементов. Временное сопротивление  $\sigma_b$  этого сплава возрастает до 700 – 750 МПа. Одновременно повышается пластичность и прочность при повышенной температуре.

## **Тема № 9 Основы технологии получения неразъёмных соединений**

### **Вопрос 1. Пайка металлов, её общая характеристика и физическая сущность**

*Пайка* — это технологический процесс соединения металлических деталей посредством присадочного материала (металла или сплава), основанный на диффузионном взаимодействии материалов соединяемых деталей и присадочного материала. Присадочный материал называется *припоем*.

В процессе диффузионного взаимодействия (сцепления паяного шва с материалом соединяемых деталей) образуются химические соединения или твёрдые растворы.

По конструктивным особенностям паяные соединения подобны сварным и клеевым. Данные соединения нашли широкое применение в приборостроении. В машиностроении примерами применения паяных соединений могут служить радиаторы автомобилей и тракторов, тонкостенные трубопроводы и прочие конструкции.

В отличие от сварки пайка позволяет соединять как детали из однородных, так и из разнородных материалов. Примером этому может быть соединение стальной и алюминиевой детали. Кроме того, имеется возможность паять детали с тонкостенными элементами, где применение сварки недопустимо из-за опасности пережога и коробления.

Технология пайки состоит в следующем. Перед пайкой спаиваемые поверхности деталей обезжиривают и очищают от окислов. Для предохранения паяных поверхностей деталей от окислов, образующихся при пайке, используют флюсы (канифоль, бура, хлористый цинк).

После подготовки соединяемых деталей к пайке и последующей сборки их обычно подогревают до температуры плавления припоя и в зазоры между ними вводят расплавленный припой, который после охлаждения соединяет детали. Для получения качественного паяного соединения температура плавления припоя должна быть ниже температуры плавления металлов соединяемых деталей.

Так как пайка осуществляется при температуре значительно более низкой, чем при сварке плавлением, то паяные детали по сравнению со сварными менее подвержены короблению и создаются условия, благоприятствующие пайке тонкостенных деталей, отличающихся по толщине, а также получению конструкций сложной формы. Однако, по сравнению со сварными соединениями паяные менее прочны.

При изготовлении паяных соединений различают два вида припоев — легкоплавкие и тугоплавкие.

*Легкоплавкие (мягкие) припои* плавятся при температуре до 350°C. К ним относятся свинцовые и оловянно-свинцовые сплавы.

*Тугоплавкие (твёрдые) припои* плавятся при температуре более 600°C. К ним относятся медно-цинковые и серебряно-медные сплавы.

Паяные швы из мягких припоев малопрочные, поэтому мягкие припои применяют для соединения ненагруженных, малонагруженных, не подверженных действию ударных нагрузок и вибраций деталей. Из-за низкой температуры плавления мягкие припои не рекомендуется применять в соединениях, работающих при температуре более 100°C. Мягкие припои нашли широкое распространение в приборостроении.

Твёрдые припои применяют для соединений, несущих нагрузки. При статических нагрузках применяют припои на медной основе, а для соединений, воспринимающих ударные нагрузки, — припои на серебряной основе.

Расчёт на прочность паяных соединений осуществляют по соответствующим формулам сопротивления материалов, как и для одностипных сварных и клеевых соединений. Допускаемое напряжение на срез можно принимать для швов из оловянно-свинцовых припоев  $[\tau_c] = 20 \div 30$  МПа; из медно-цинковых припоев  $[\tau_c] = 175 \div 230$  МПа.

## **Вопрос 2. Газокислородная резка металлов, её общая характеристика, физическая сущность**

### **Сущность процесса и основные условия газокислородной резки**

В технически чистом кислороде при температуре, необходимой для начала реакции, интенсивность окисления металла становится настолько большой, что переходит в горение.

Для непрерывности процесса горения необходимо соблюдение следующих условий:

- 1) постоянный контакт окислителя с неокисленным металлом поверхности;
- 2) непрерывный подогрев неокисленного металла до температуры воспламенения;
- 3) достаточно высокая концентрация кислорода в газовой фазе, вступающей в контакт (в химическое взаимодействие) с металлом.

Таким образом, процесс газокислородной резки является процессом сквозного прожигания твёрдого металла струёй чистого кислорода.

Для получения качественной (гладкой) поверхности реза необходимо, чтобы разрезаемый металл удовлетворял следующим технологическим требованиям:

1) температура горения металла должна быть ниже температуры его плавления, что связано с тем, чтобы при горении сам металл не плавился;

2) продукты горения металла должны быть жидкими для того, чтобы они легко удалялись из зоны реза, оголяя поверхность металла для непрерывного контакта со струёй кислорода при перемещении резака вдоль линии реза.

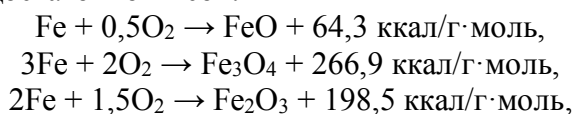
Кроме этих двух основных технологических требований, предъявляемых к разрезаемому металлу, следует учитывать и дополнительные требования, имеющие определённое значение.

Так, следует иметь в виду, что для интенсивного горения металла необходим его постоянный контакт (химическое взаимодействие) с чистым кислородом, а образующиеся газообразные оксиды способствуют снижению концентрации свободного кислорода в зоне реза. Отсюда вытекает первое требование — недопустимость образования большого количества газообразных продуктов горения.

Вторым дополнительным требованием, которому должен удовлетворять разрезаемый металл — достаточно высокая жидкотекучесть образующихся оксидов.

Третье дополнительное условие — достаточно высокий тепловой эффект реакции окисления металла, а теплопроводность металла не должна быть очень большой с тем, чтобы не происходило интенсивное охлаждение зоны реза.

Всем этим требованиям удовлетворяют железо, углеродистые и низколегированные конструкционные стали при невысоком содержании углерода: температура плавления железа  $1539^{\circ}\text{C}$ , горения —  $1200^{\circ}\text{C}$ , температура плавления оксида железа —  $1370^{\circ}\text{C}$ . Тепловой эффект реакций окисления достаточно высок:



а теплопроводность железа является ограниченной.

Худшими технологическими характеристиками обладают никель и медь; так температура плавления меди —  $1083^{\circ}\text{C}$ , оксида меди —  $1230^{\circ}\text{C}$ , тепловой эффект окисления —  $37,5 \text{ ккал/г}\cdot\text{моль}$ , а теплопроводность меди очень велика.

Совершенно не удовлетворяют технологическим требованиям алюминий, магний, хром и цинк. Так, температура плавления алюминия  $\text{Al}$  —  $658^{\circ}\text{C}$ ; оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  —  $2050^{\circ}\text{C}$ ; магния  $\text{Mg}$  —  $651^{\circ}\text{C}$ , оксида магния  $\text{MgO}$  —  $2500^{\circ}\text{C}$ .

Естественно, что примеси в сталях также оказывают влияние на способность подвергаться кислородной резке, причём разные элементы в разной степени. Влияние углерода сказывается при содержании его свыше  $0,25\%$ ; марганец, никель и медь в тех количествах, в которых они содержатся в сталях, не мешают выполнению газокислородной резки. Кремний, алюминий и хром, по мере их увеличения в сталях, ухудшают процесс резки.

### **Подогревательное пламя и кислород режущей струи**

Для возможности начала процесса резки и устойчивого его протекания необходимо подогреть металл в нужном месте до температуры его воспламенения. С этой целью резак должен иметь канал для подачи горючего газа в смеси с кислородом для создания подогревательного пламени и канал, по которому подаётся струя режущего кислорода.

Несмотря на то, что реакция горения железа протекает с выделением тепла, для создания необходимой температуры в зоне реза нужно и после начала процесса не выключать подогревательное пламя, так как тепловой энергии, образующейся только за счёт горения железа, оказывается не достаточно.

Схема устройства ацетилено-кислородного резака приведена на рис.18.39. Для подогрева места начала реза до температуры воспламенения металла при закрытом вентиле 3 другими вентилями 4 и 9 открывают подачу кислорода ( $\text{O}_2$ ) и ацетилена ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) для создания

нагревательного пламени, горящего на выходе смеси этих газов из кольцевого канала, образуемого зазором между наружным и внутренним мундштуками 14 и 15. После разогрева места начала реза до необходимой температуры открытием вентиля 3 подают струю режущего кислорода.

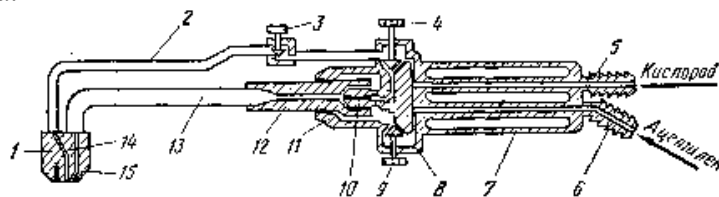


Рис. 18.39. Схема устройства ацетилено-кислородного резака: 1 — головка резака; 2 — трубка режущего кислорода; 3, 4, 9 — вентили; 5, 6 — ниппели для шлангов; 7 — рукоятка; 8 — корпус резака; 10 — инжектор; 11 — накидная гайка; 12 — смешительная камера; 13 — наконечник; 14, 15 — внутренний и наружный мундштуки

Мощность подогревательного пламени, а, следовательно, и расход горючего газа зависят от толщины разрезаемого металла:

### Вопрос 3. Процесс обработки материалов резанием: общая характеристика, виды, область применения

Основными видами обработки материалов резанием являются (рис. 1): точение (а); строгание (б); долбление (в); сверление (зенкерование, развёртывание и зенкование) (г); фрезерование (д) и шлифование (е), — производимые на металлорежущих станках соответствующей группы. В зависимости от вида выполняемых технологических операций различают станки токарной группы, строгальной, долбежной, сверлильной, расточной, фрезерной, шлифовальной и др.

При обработке материалов резанием используют различный режущий инструмент: резцы, свёрла, зенкера, развёртки фрезы, которые имеют специально заточенную режущую часть, а также применяют шлифовальные абразивные круги, зёрна которых обладают острыми гранями и углами. Режущий инструмент изготавливают из материала повышенной твёрдости, прочности, термо- и износостойкости, различных форм и размеров.

**Точение.** При точении главным движением резания является вращательное движение заготовки, а движение подачи — прямолинейно-поступательное движение резца (рис.1а). К параметрам (режимам) режима резания при точении относятся:

- 1) *скорость резания  $v$*  — линейная скорость точки, лежащей на обрабатываемой поверхности, м/мин;
- 2) *подача  $s$*  — перемещение резца за один оборот заготовки, мм;
- 3) *глубина резания  $t$*  — расстояние от обрабатываемой поверхности до обработанной, измеренное перпендикулярно оси заготовки, мм.



Рис. 1. Схемы основных видов обработки материалов резанием:

а — точение; б — строгание; в — долбление; г — сверление, зенкерование, развёртывание и зенкование; д — фрезерование; е — шлифование

Точение производят на станках токарной группы с использованием резцов, которые выбирают в зависимости от вида операции. Основные токарные операции представлены на рис. 2.

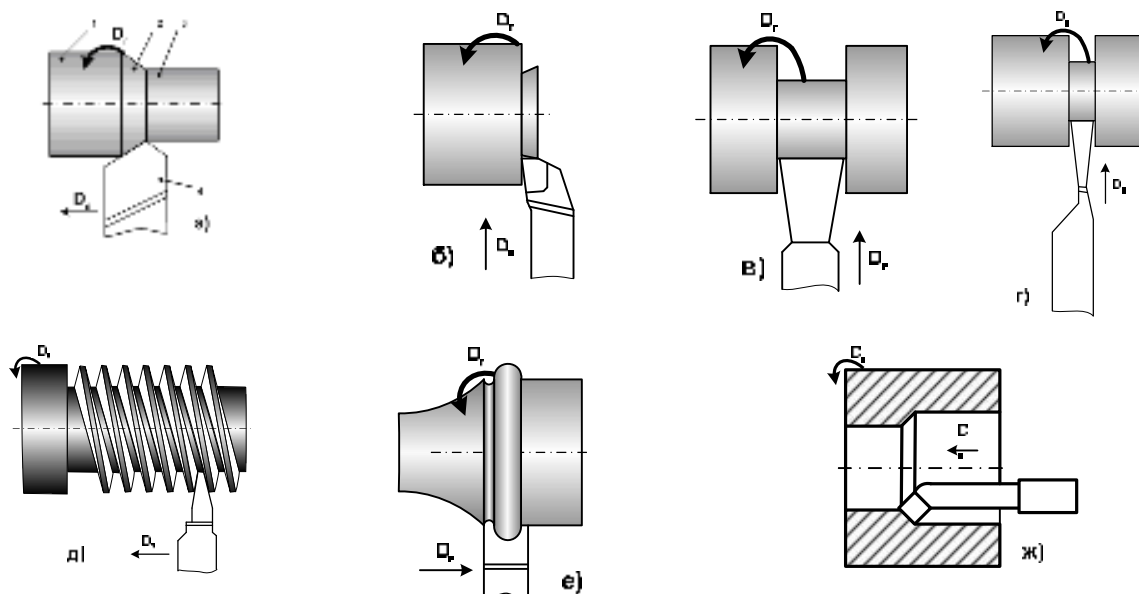


Рис. 2. Схемы основных технологических операций токарной обработки:

а - точение наружной цилиндрической поверхности; б - подрезание плоских торцевых поверхностей; в - точение канавок; г - отрезка; д - точение метрической резьбы резцом; е - точение фасонных поверхностей; ж - растачивание внутренних поверхностей; 1 - обрабатываемая поверхность; 2 - поверхность резания; 3 - обработанная поверхность.

**По виду выполняемых операций различают следующие токарные резцы:**

1) проходные, проходные упорные; 2) подрезные; 3) прорезные и отрезные; 4) резьбовые; 5) расточные; 6) фасонные. 7) резцы для чистовой обработки заготовок (3) и др.

В зависимости от направления подачи резцы разделяют на правые и левые; по форме режущей части — на прямые, отогнутые и оттянутые и изогнутые; по характеру обработки — на черновые, получистовые и чистовые; по конструкции — на цельные и сборные.

Для изготовления и обработки отверстий при точении применяют также свёрла, зенкеры и развёртки, а для нарезания резьбы — метчики, плашки и различные по типу резьбонарезные головки (рис.3).

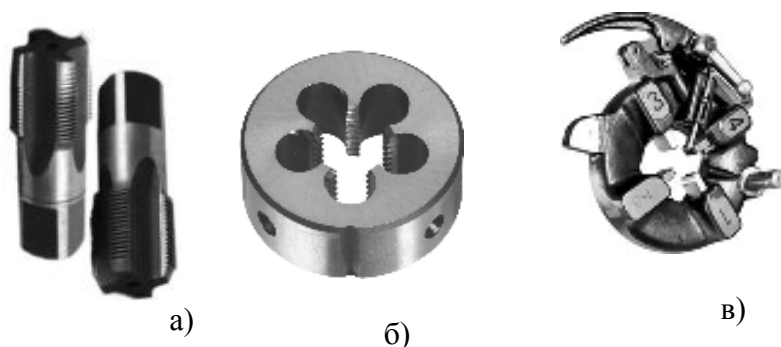


Рис. 3. Резьбонарезной

инструмент:

а - метчики;

б - плашка;

в - регулируемая резьбонарезная головка с плоскими (стержневыми) гребёнками.

**Строгание.** Процесс строгания (см. рис. 1б) — вид механической обработки плоских поверхностей резанием, при котором главное движение (скорость резания  $v$ ) сообщается резцу или заготовке и является возвратно-поступательным, а движение подачи  $s$  сообщается заготовке или резцу и является прерывистым. На рис. 20.1б главный вид движения осуществляет заготовка, а резец — движение подачи. Станки, на которых производятся операции строгания называют продольно-строгальными. Если на станках резец совершает

главное движение, а заготовка — движение подачи, то такие станки являются поперечно-строгальными. В некоторых случаях резец может осуществлять как главное движение  $v$ , так и движение подачи  $s$ . Вследствие того, что резец совершает рабочий и холостой ходы, процесс резания при строгании прерывистый. Снятие стружки происходит только во время прямого (рабочего) хода. При обратном (холостом) ходе резец работу резания не производит, что способствует его охлаждению.

Также строганием можно провести обработку фасонных поверхностей и выборку пазов и канавок.

**Долбление.** Эта операция является разновидностью строгания и производится на долбежных станках. На них главный вид движения  $v$  (возвратно-поступательный) осуществляет резец в вертикальной плоскости, а движение подачи  $s$  — заготовка в горизонтальной плоскости (см. рис. 16). Долбление применяют для получения канавок, плоских и фасонных поверхностей небольшой высоты, но значительных поперечных размеров.

**Сверление.** При сверлении (зенкеровании, развёртывании, зенковании) обычно главное движение  $v$  и движение подачи  $s$  сообщают режущему инструменту (рис. 12). Сверление применяют для получения сквозных и глухих цилиндрических отверстий.

*Зенкерование* — применяется для увеличения диаметра отверстия, предварительно полученного литьём, штамповкой или сверлением, и придания ему более правильной геометрической формы, достижения наименьшей шероховатости поверхности, чем при сверлении или рассверливании.

*Развёртывание* обеспечивает получение отверстий с высокой точностью размеров и высоким качеством поверхности; его применяют в основном для окончательной обработки отверстий.

*Зенкование* — получение отверстий под потайные и полупотайные головки болтов и заклёпок.

Сверление является самым распространённым способом получения сквозных и глухих отверстий в заготовке.

Различают *обычное* и *глубокое* сверление. При обычном сверлении для получения сквозных или глухих отверстий применяют спиральные свёрла с коническими или цилиндрическими хвостовиками. В зависимости от величины партии обрабатываемых деталей сверление производят *по разметке* или в *кондукторах* (специальных приспособлениях, изготавливаемых по форме обрабатываемой детали).

При обработке больших партий деталей сверление производят в кондукторах. Они позволяют вести сверление без предварительной разметки детали и получать более высокую точность обработки.

При глубоком сверлении, когда длина отверстия превышает его диаметр в 5 раз и более, обычно применяют специальные свёрла:

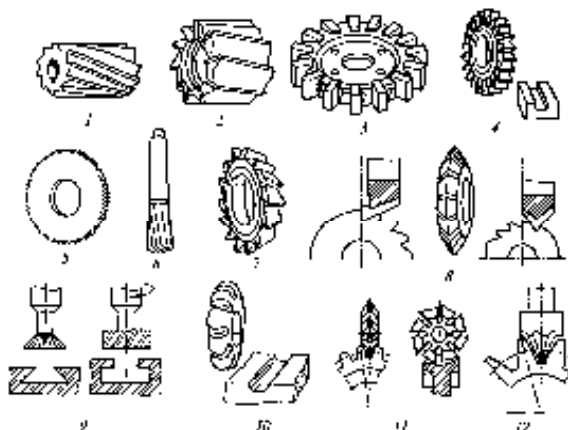
- 1) ружейные для сверления отверстий диаметром до 25 мм в сплошном материале;
- 2) пушечные одностороннего резания для сверления отверстий диаметром более 25 мм.

*Рассверливание* — применяют для отверстий диаметром более 25 мм. Свёрла больших диаметров имеют перемины значительных размеров, поэтому при их применении необходимы увеличенные усилия подачи. Кроме того, такие свёрла часто отклоняются от оси сверления.

*Сверление отверстий под резьбу* — важный вид сверлильных работ. Эти отверстия сверлятся спиральным сверлом в сплошной заготовке, или рассверливают в отливках и поковках.

*Зенкерование и развёртывание* — этим процессам подвергают отверстия, полученные в заготовках сверлением, литьём, штамповкой с целью получения большей точности размеров и чистоты поверхности. Зенкерование применяется для окончательной обработки отверстий или для предварительной обработки под развёртывание.

**Фрезерование.** При фрезеровании главное движение  $v$  сообщается многолезвийному режущему инструменту — фрезе, а движение подачи  $s$  — заготовке (рис. 20.1б). Существуют схемы фрезерования, когда главное движение и движение подачи сообщают фрезе. Фрезерование применяют при обработке горизонтальных, вертикальных и наклонных плоскостей, фасонных поверхностей, пазов и канавок различного профиля, при изготовлении зубчатых колес. Особенность процесса фрезерования заключается в прерывистости резания каждым зубом фрезы. Зуб фрезы вступает в контакт с заготовкой и выполняет работу только на некоторой части своего оборота. Затем зуб фрезы, продолжая движение, не касается заготовки до следующего врезания; в этот момент он охлаждается, что увеличивает срок службы фрезы. Каждый зуб фрезы имеет такие же элементы и углы, что и токарный резец. Поэтому фрезу можно рассматривать как набор токарных резцов.



В зависимости от назначения и вида обрабатываемых поверхностей различают следующие наиболее распространённые типы фрез (рис. 4): цилиндрические 1; торцевые 2; дисковые 3, 4; дисковые пилы 5; концевые 6; одноугловые 7; двухугловые 8; пазовые 9; фасонные 10; модульные дисковые 11; пальцевые 12.

Рис. 4. Наиболее распространённые типы фрез.

**Шлифование.** Процесс шлифования (рис. 1е) применяют как отделочно-доводочную операцию с получением размеров деталей с точностью по 6 – 7-му квалитетам и шероховатостью поверхности  $R_a = 0,08 - 0,32$  мкм.

Как обдирочную операцию шлифование используют при очистке литья, поковок и т. д.

**Шлифование** — это обработка поверхностей изделия шлифовальными абразивными кругами. Для обдирочной обработки применяют крупнозернистые абразивы, а для чистового шлифования — мелкозернистые. Используют абразивы естественные — наибольшее применение получили минерал корунд и алмаз, и искусственные — электрокорунд с различными добавками, карбид кремния, нитрид бора и др. Абразивные зёрна в зависимости от их размера делятся на шлифзёрна (№ 200-16, размер зерна 2500 – 160 мкм), шлифпорошки (№ 12-4, размер зерна 160 – 20 мкм) и микропорошки (№ М63-М5, размер зерна 63 – 5 мкм). Зернистость алмазных порошков от АМ1 (размер зерна менее 1 мкм) до АМ50 (размер зерна до 630 мкм). Абразивные зёрна скреплены друг с другом с помощью цементирующего вещества — связки. Широко применяются шлифовальные круги на керамической, бакелитовой и вулканитовой (эбонитовой) связке.

### Физико-химические и механические основы процесса резания

Развитие науки о резании материалов постоянно сопровождалось новыми теоретическими и экспериментальными положениями, объясняющими физическую сущность многочисленных явлений, сопровождающих процесс резания.

### Влияние смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) на процесс обработки материалов резанием

Известно, что при воздействии на зону резания различных технологических сред происходит ряд сложных взаимосвязанных и взаимозависимых физико-химических процессов: адсорбция, коррозия под напряжением, возникновение поверхностных трещин, газонасыщение, изменение температурного поля в зоне резания, облучение элементарными

частицами, электрические и другие явления и пр. Следовательно, среда может оказывать значительное влияние на интенсификацию процессов обработки материалов. С этой целью для более эффективной обработки различных материалов могут быть применены ультразвуковые колебания, поданы различные СОТС, также может быть произведена обработка в электрических и магнитных полях, в вакууме и нейтральных средах и т. д.

Следовательно, СОТС является одним из наиболее важных переменных факторов состояния технологической системы. За счёт изменения состава и состояния СОТС можно эффективно осуществить многосторонние изменения параметров функционирования технологической системы, что позволяет оптимизировать режимы обработки резанием.



## Литература:

### а) основная литература

1. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. Репринтное издание. – М.: Альянс, 2013. – 528 с.
2. Шигорин, С.А. Материаловедение и технология материалов: учебник для обучающихся в вузах МЧС России по специальностям направления «Безопасность жизнедеятельности»/ С.А. Шигорин, П.В. Пучков. - 1-е изд. – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России, 2012 г. – 542 с.: ил. (Гриф «Допущено» МЧС России).

### б) дополнительная литература

3. Пучков, П.В. Материаловедение и технология материалов (Лабораторный практикум): Учебное пособие / П.В.Пучков, В.В. Киселёв. – Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2011. – 166 С. (Гриф «Допущено» МЧС России)
4. Пучков, П.В. Коррозия конструкционных материалов (междисциплинарный лабораторный практикум): учебное пособие для слушателей, курсантов и студентов всех форм обучения по специальности 280705.65 «Пожарная безопасность» и направлению подготовки 280700.62 «Техносферная безопасность»/ П.В. Пучков, С.В. Тимофеева, Д.Г. Снегирёв. – Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2012. - 214 С.
5. Пучков, П.В. Методы защиты от коррозии: электронное пособие. / П.В. Пучков, Д.А. Ульев, С.В. Тимофеева. 379 Мб, формат: exe, системные требования: Windows 98, NT, 2000, XP, Vista, Seven; Adobe Flash Player; 256 Мб оперативной памяти; Браузер Internet Explore.
6. Пучков, П.В. Материаловедение и технология материалов: учебно - методическое пособие для самостоятельной работы обучающихся по специальности 280705.65 – «Пожарная безопасность» и по направлению подготовки 280700.62 – «Техносферная безопасность» / П.В. Пучков, В.В. Киселёв, А.В. Топоров, В.А. Полетаев. – Иваново: ООНИ ЭКО ФГБОУ ВПО ИВИ ГПС МЧС России, 2014. – 106 с.
7. Пучков П.В., Механические свойства материалов: электронное учебное пособие/ Кропотова Н.А., Полетаев В.А. 313 Мб, формат: exe, Операционная система Windows XP-10, Браузер Internet Explorer версии 8 и выше, кодеки для воспроизведения видео в форматах mp4 и avi. Процессор 2-х ядерный intel или Amd, 2Гб ОЗУ.
8. Пучков П.В., Материаловедение и технология материалов. Часть 1. «Материаловедение»: электронное учебное пособие/ Киселев В.В., Кропотова Н.А., Овчинников В.В., Гришина Е.Ю. 348 Мб, формат: exe, Операционная система Windows XP-10, Браузер Internet Explorer версии 8 и выше, кодеки для воспроизведения видео в форматах mp4 и avi. Процессор 2-х ядерный intel или Amd, 2Гб ОЗУ, 348 Мб.