

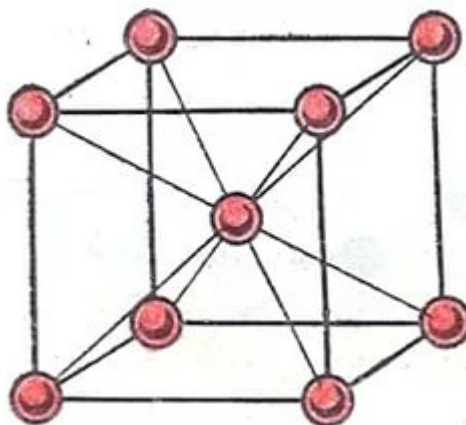
Министерство образования и науки Российской Федерации  
Филиал ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический  
университет» в пос. Яблоновском

Кафедра инженерных дисциплин и таможенного дела

**В.А. Хрисониди**

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Краткий курс лекций по дисциплине для всех форм обучения для  
направлений подготовки 21.03.01 - Нефтегазовое дело, 23.03.01 – Технология  
транспортных процессов, 21.03.02 - Землеустройство и кадастры и  
специальностей 20.05.01 - Пожарная безопасность,  
38.05.02 – Таможенное дело



пос. Яблоновский  
2016

Составитель: ст. преподав. В.А. Хрисониди

УДК [620.22 + 621.7](07)

ББК 30.3

М 34

**Материаловедение и технология конструкционных материалов:** краткий курс лекций по дисциплине для студентов для всех форм обучения для направлений подготовки 21.03.01 - Нефтегазовое дело, 23.03.01 – Технология транспортных процессов, 23.03.02 - Землеустройство и кадастры и специальностей 20.05.01 - Пожарная безопасность, 38.05.02 – Таможенное дело / Сост.: В.А. Хрисониди; Филиал Майкоп. гос. технол. ун-т в пос. Яблоновском. Кафедра инженерных дисциплин и таможенного дела – Яблоновский: Изд. Филиала МГТУ в пос. Яблоновском, 2016. – 43 с.

В учебном пособии излагаются краткий курс лекций по дисциплине необходимые для подготовки к рубежному контролю. Рассматриваются основные теоретические положения материаловедения и технологии конструкционных материалов и практические вопросы их реализации.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 21.03.01 - Нефтегазовое дело, 21.03.01 - Землеустройство и кадастры, 23.03.01 – Технология транспортных процессов и специальностям 20.05.01 - Пожарная безопасность, 38.05.02 – Таможенное дело.

Библиография: 12 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и автосервиса, ФГБОУ ВО «КубГТУ» Соколов Е.Г.;

д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой общей, неорганической химии и информационно-вычислительных технологий в химии, ФГБОУ ВО «КубГУ» Н.Н. Буков

Печатается по решению научно-методических советов направлений подготовки 21.03.01 – Нефтегазовое дело, 21.03.02 – Землеустройство и кадастры, 23.03.01 – Технология транспортных процессов и специальностям 20.05.01 - Пожарная безопасность, 38.05.02 – Таможенное дело протоколы от 26.08.2016 г. №1

©Филиал МГТУ в пос. Яблоновском, 2016

## Лекция 1

### СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

#### 1.1. Классификация металлов

Как правило, все металлы сочетают высокую твердость с хорошей пластичностью и вязкостью, имеют большую плотность, хорошую тепло- и электропроводность и сравнительно малую теплоту превращения.

Уникальное сочетание этих свойств, не встречающееся у других материалов, и явилось причиной использования металлов в качестве основного конструкционного материала во всех областях техники.

Каждый металл отличается строением и свойствами от другого, тем не менее по некоторым признакам их можно объединить в группы.

Прежде всего, все металлы подразделяются на черные и цветные.

Это, несомненно, условная классификация, которая сложилась исторически.

**Черные металлы** в свою очередь можно подразделить следующим образом:

1. Железные металлы – железо, кобальт, никель и близкий к ним по свойствам марганец. Они применяются как добавки к сплавам железа, а также в качестве основы для соответствующих сплавов.

2. Тугоплавкие металлы – температура плавления выше, чем железа (т.е. выше  $1539^{\circ}\text{C}$ ). Это титан, ванадий, хром. Их применяют как добавки к легированным сталям, а также в качестве основы для соответствующих сплавов.

3. Урановые металлы – актиниды – актиний, уран, торий, плутоний, имеющие преимущественное применение в сплавах атомной энергетики.

4. Редкоземельные металлы (РЗМ) – лантан, церий, неодим и др., объединяемые под названием лантоноидов, сюда же входит иттрий. Их применяют как присадки к сплавам других элементов. В природных условиях они встречаются вместе и вследствие трудностей разделения на отдельные элементы для присадки обычно применяют «смешанный сплав», так называемый «мишметалл».

5. Щелочноземельные металлы в свободном металлическом состоянии не применяются (литий, натрий, калий).

**Цветные металлы** подразделяются на три группы:

1. Легкие металлы (обладающие малой плотностью) – бериллий, магний, алюминий.

2. Благородные металлы – серебро, золото, платина, палладий, и др., обладающие высокой устойчивостью против коррозии.

3. Легкоплавкие металлы – цинк, ртуть, олово, свинец, сурьма.

#### 1.2 . Кристаллическое строение металлов

Все металлы и их сплавы – тела кристаллические.

Рассмотрим металлический тип связи, благодаря которому металлы приобретают присущие им свойства.

Кристаллическое строение металлов характеризуется закономерным размещением атомов в пространстве с образованием кристаллической решетки.

Кристаллическая решетка представляет собой воображаемую пространственную сетку, в узлах которой находятся положительные ионы, а внешние отрицательно заряженные электроны образуют так называемый электронный «газ» (рис.1.1).

Атомы в решетке связаны силами взаимного притяжения и отталкивания электрон - между положительно заряженными ионами и электронным «газом». Такая связь не является жесткой и направленной, поэтому атомы могут скользить друг относительно друга, разрушая сплошности материала, что и обеспечивает высокую пластичность металлов. Наличием данного электронного «газа» объясняются такие свойства металлов как электропроводность, теплопроводность, пластичность.

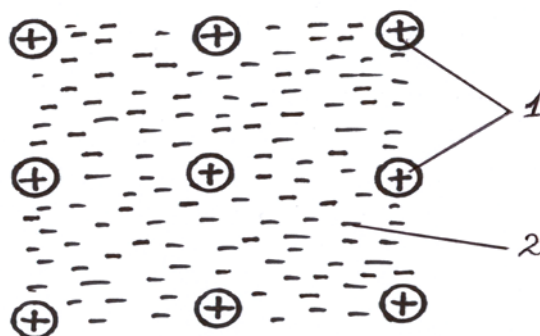


Рисунок.1.1. Металлический тип связи. 1 –положительно заряженные ионы;  
2 – отрицательно заряженные электроны.

Атомы (ионы) могут, располагаясь в узлах кристаллической решетки, образовывать правильные геометрические фигуры. Что такое кристаллическая решетка? Это воображаемая пространственная сетка, в узлах которой располагаются атомы, образующие металл. Металлы могут давать сравнительно небольшое число вариантов расположения атомов в пространстве (рис. 1.2).

Размеры элементарной ячейки называются параметрами решетки, они обозначаются а, в, с и измеряются в ангстремах ( $1\text{Å}=10^{-8}\text{ см}$ ).

У металлов наиболее часто встречаются следующие типы решеток:

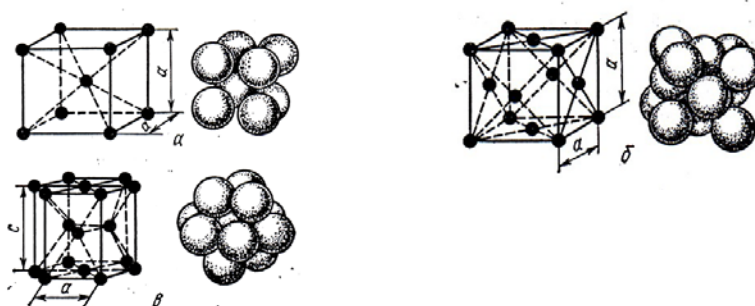


Рисунок. 1.2. Типы кристаллических решеток металлов, а - кубическая объемноцентрированная (ОЦК) (Mo, Fe, V, Na, Cr, Ta, K, Li, и др.), б - кубическая гранецентрированная (ГЦК) (Cu, Al, Pt, Fe, Erg, Au, и др.), в - гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (Mg, Be, Y, Co, и др.)

Из этих решеток (элементарных ячеек) строятся кристаллы металлов. Каждый кристалл состоит из большого количества мелких кристаллических решеток, в которых атомы расположены закономерно.

Однако, образовавшиеся реальные кристаллы не обладают строгой периодичностью в расположении атомов, они имеют те или иные несовершенства, т.н. дефекты кристаллического строения. Дефекты в кристаллах принято классифицировать по характеру их измерения в пространстве: точечные, линейные, поверхностные, объемные. К точечным дефектам относят вакансии (узлы в кристаллической решетке, свободной от атомов), межузельные атомы, примеси замещения.

У линейных дефектов длина на несколько порядков больше ширины. У поверхностных дефектов мала толщина, а ширина и длина больше ее на несколько порядков. Объемные дефекты (поры, трещины) имеют значительные размеры во всех трех направлениях.

### 1.3. Свойства материалов и способы их измерения

Существуют следующие свойства металлов: физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные.

**Физические** свойства: к ним относятся цвет, плотность, температура плавления, теплопроводность, тепловое расширение, теплоемкость, электропроводность, магнитные свойства.

**Химические** свойства характеризуют способность металлов и сплавов сопротивляться окислению или вступать в соединение с различными веществами: кислоты, щелочи и т.д. (т.н. химическая активность металлов)

**Технологические** свойства – эти свойства характеризуют способность металлов подвергаться обработке в холодном и горячем состояниях. К ним относятся: обрабатываемость резанием, свариваемость, ковкость, литейные свойства (жидкотекучесть, ликвация, усадка).

**Эксплуатационные** свойства – эти свойства определяют в зависимости от условий работы машины. Одним из главных является износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление износу. Сюда же относятся: хладостойкость, антифрикционность, жаропрочность.

**Механические** свойства – они характеризуются способностью металла сопротивляться воздействию внешних сил: прочностью, упругостью, пластичностью, ударной вязкостью, твердостью и выносливостью. Эти свойства определяют по результатам механических испытаний, при которых металлы подвергаются воздействию внешних сил.

Нагрузка вызывает в твердом теле напряжение и деформацию.

Рассмотрим, что это такое. Представим, что на образец, с поперечным сечением  $F_0$ , действует сила  $P$ .

**Напряжение** – величина нагрузки, отнесенная к единице площади поперечного сечения образца. Обозначается:  $\sigma = P/F$  Мпа.

**Деформация** – изменение формы и размеров твердого тела под влиянием приложенных внешних сил. Различают упругую деформацию, которая исчезает после снятия нагрузки, и пластическую деформацию, которая не исчезает после снятия нагрузки.

На базе их построены следующие понятия:

**Прочность** – способность материала сопротивляться разрушению под действием нагрузок. Определяется в результате статических испытаний на разрушение.

**Упругость** – способность материала восстанавливать первоначальную форму и размеры после прекращения действия нагрузки. Оценивается пределом упругости  $\sigma_{уп.}$ , под которым понимают такие напряжения, которые вызывают остаточную деформацию 0,005%.

**Пластичность** – способность материала принимать новую форму и размеры под действием внешних сил, не разрушаясь, характеризуется относительным удлинением

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} * 100\% \text{ и относительным сужением } \psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} * 100\% , \text{ где } l_0 \text{ и } l_k$$

- начальная и конечная длина образца;  $F_0$  и  $F_k$  - начальная и конечная площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

**Ударная вязкость** – способность материала сопротивляться динамическим нагрузкам. Оценивается при ударных испытаниях на маятниковом копре. Определяется как отношение затраченной работы  $A$  к площади поперечного сечения  $F$ .  $a_H = \frac{A}{F}$  (Дж/м<sup>2</sup>).

Работа определяется:

$$A = mgH - mgh = mg(H - h) = P(H - h) \text{ (Дж)}.$$

**Усталостью** называется процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящих к образованию трещин и разрушению.

**Выносливость** – свойство материала противостоять усталости.

**Твердостью** называют способность материала сопротивляться проникновению в него другого более твердого тела. Высокой твердостью обладают режущие инструменты, а также поверхностно-упрочненные детали. Твердость сплавов определяют следующими способами: методом вдавливания, при царапании, методом упругого отскока бойка, при ударном вдавливании.

### Вопросы для самоконтроля

1. Классификация металлов.
2. Объясните, какие свойства относятся к физическим?
3. Объясните, какие свойства относятся к механическим? Какими показателями характеризуются: а)прочность; б)пластичность.
4. Какие свойства металлов относятся к технологическим? Приведите примеры.
5. Какие свойства металлов относятся к эксплуатационным? Приведите примеры.
6. Что такое твердость? Какие системы измерения твердости Вы знаете?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

#### Основная

1. **Дегтярев, М.Г.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007 г. – с.317.
2. Материаловедение и технология металлов / под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000 г. – с. 403.

3. **Оськин, В.А.** «Материаловедение. Технология Конструкционных Материалов» / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: КолосС, 2007 г. – с. 394.

4. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / А.А. Аникин, [и др.]. – Саратов: СГАУ, 2007 г. – с. 218.

*Дополнительная*

1. **Гиин Э.Ч.** Технология литейного производства / Э.Ч. Гиин, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005 г. – с. 267.

2. Технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам / А.А. Аникин, [и др.] Саратов. СГАУ. 2006 г. – с. 25.

3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / под ред. М.М. Федорченко. – М.: Машиностроение. 1985 г. – с. 264.

4. Технология металлов и материаловедение / под. ред. Л.Ф. Усовой. – М.: Металлургия, 1987 г. – с 799.

## Лекция 2

### ДИАГРАММА Fe – Fe<sub>3</sub>C.

#### 2.1. Аллотропия железа.

**Аллотропия (полиморфизм)** – это способность некоторых твердых тел изменять свою кристаллическую решетку при изменении внешних условий (температуры и давления).

Железо до  $t=911^{\circ}\text{C}$  имеет объемно-центрированную кубическую решетку (К8), плотность упаковки атомов в которой составляет 68%, обозначается такое железо Fe  $\alpha$ .

Параметр решетки альфа-железа  $a=2,86 \text{ \AA}$  [ $1\text{ \AA}^0=10^{-8}\text{ см}$  – рис. 2.1].

При нагреве выше  $911^{\circ}\text{C}$  железо изменяет кристаллическую решетку на гранецентрированную кубическую (К12), плотность упаковки атомов которой составляет 74%, обозначается такое железо Fe  $\gamma$ . Параметр решетки гамма-железа  $a=3,64 \text{ \AA}$  (рисунок 2.1.).

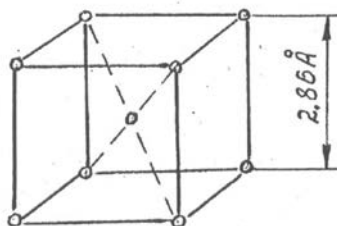


Рисунок 2.1. Элементарная ячейка кристаллической решетки Fe  $\alpha$ .

При изменении решетки изменяются все свойства железа:

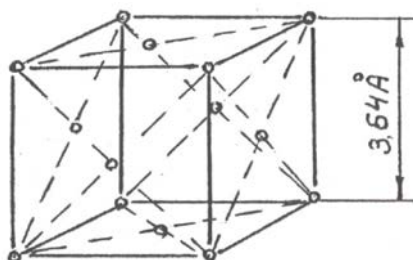


Рисунок. 2.2. Элементарная ячейка кристаллической решетки Fe  $\gamma$ .

- Fe  $\gamma$  растворяет углерод, а Fe  $\alpha$  почти не растворяет.
- Fe  $\alpha$  (до  $768^{\circ}\text{C}$ ) ферромагнитно, а Fe  $\gamma$  - немагнитно.
- Fe  $\gamma$  по сравнению с Fe  $\alpha$  имеет больше плоскостей скольжения (из-за большей плотности упаковки атомов), поэтому более пластичное и вязкое. Fe  $\gamma$  не имеет порога хладноломкости, а у Fe  $\alpha$  он имеется.
- При переходе Fe  $\alpha$  в Fe  $\gamma$  уменьшается объем.



- Fe  $\gamma$  имеет меньшую теплопроводность.

## 2.2. Фазы в железо-углеродистых сплавах.

**Сталь** – сплав железа с углеродом с содержанием углерода до 2,14%.

**Чугун** – сплав железа с углеродом с содержанием углерода от 2,14% до 5%.

Углерод может растворяться в решетке железа, создавая твердые растворы внедрения. Нерастворившийся углерод находится или в химически связанном состоянии цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), или в свободном состоянии графит.

В Fe  $\alpha$  углерод теоретически не может раствориться, т.к. для размещения атомов углерода в о.ц.к. – решетке нет достаточно больших пор. Из-за наличия дефектов кристаллического строения растворимость есть, но очень маленькая:

Fe  $\alpha$  содержит 0,006% C при комнатной температуре, при повышении температуры растворимость увеличивается и достигает максимума 0,02% C при 727<sup>0</sup>C.

Твердый раствор углерода в Fe  $\alpha$  называется ферритом (от слова Ferrum – железо).

Феррит – это почти чистое железо, он мягкий (HB60-80), пластичный ( $\delta = 50\%$ ) и непрочный  $\delta_g$  250-300 МПа (2530 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\delta_{0,2} = 12$  (120 МПа) кгс/мм<sup>2</sup>.

Решетка Fe  $\gamma$  хорошо растворяет углерод, т.к. в центре имеется пора диаметром 1,02 Å<sup>0</sup>, где и размещается атом углерода (рисунок 2.3), который имеет диаметр 1,54 Å<sup>0</sup>, решетка железа при этом искажается.

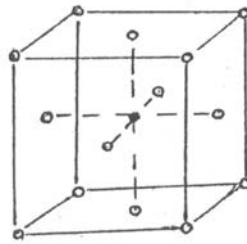


Рисунок 2.3 Кристаллическая решетка Fe (C) -  $\gamma$ -раствора (аустенита)

Наибольшая растворимость углерода в Fe  $\gamma$  составляет 2,14%, с понижением температуры растворимость падает и при 727<sup>0</sup>C составляет 0,8% C.

Наибольшая растворимость углерода в Fe  $\gamma$  составляет 2,14%, с понижением температуры растворимость падает и при 727<sup>0</sup>C составляет 0,8% C.

Твердый раствор углерода в гамма-железе называется аустенитом. Аустенит вязкий, пластичный, немагнитный. Твердость и прочность его зависят от температуры и содержания углерода.

Химическое соединение железа с углеродом  $\text{Fe}_3\text{C}$  (карбид железа) называется цементитом. Цементит содержит 6,67% C. Он очень твердый (HB800) и хрупкий (по механическим свойствам напоминает стекло, но более твердый). Цементит имеет сложную кристаллическую решетку, в которой атомы железа и углерода занимают определенные места. Если цементит выделяется из жидкого раствора, то он называется первичным, эти зерна обычно крупные. Если цементит выделяется из аустенита, то он называется вторичным и обычно располагается в виде сетки по границам аустенитных зерен. Цементит третичный выделяется в виде мелких включений по границам ферритных зерен.

Графит – чистый углерод, имеет гексагональную решетку Гб, где атомы в плоскости базиса связаны прочно, а межбазисные связи очень слабы, в результате чего графит легко расслаивается (рис. 2.4.). Твердость, прочность и пластичность графита близки к нулю.

Углерод в виде графита содержится обычно в чугунах. В зависимости от формы присутствия углерода в сплавах, существуют диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C (железо-цементит) и Fe-C (железо- графит).

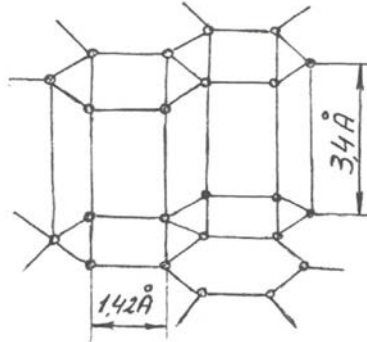


Рисунок 2.4. Кристаллическая структура графита

Углерод в виде графита содержится обычно в чугунах. В зависимости от формы присутствия углерода в сплавах, существуют диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C (железо-цементит) и Fe-C (железо- графит).

В сталях углерод обычно содержится в виде Fe<sub>3</sub>C, поэтому для них используется диаграмма Fe-Fe<sub>3</sub>C (см. рисунок 2.5).

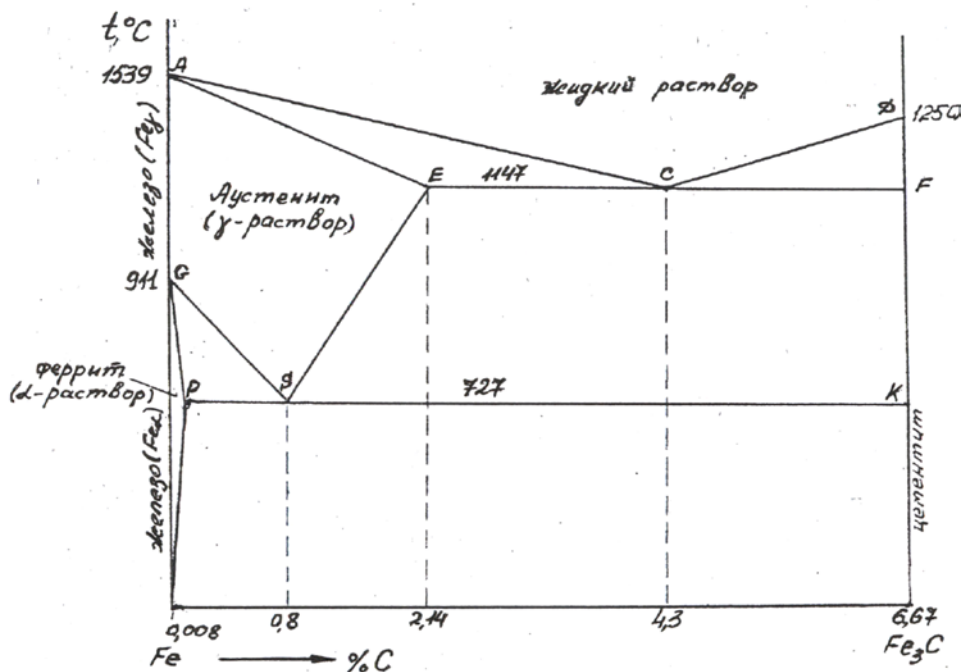


Рисунок. 2.5. Диаграмма Fe-Fe<sub>3</sub>C (указаны только однофазные области)

### 2.3. Классификация и маркировка углеродистых (нелегированных) сталей.

Два главных признака при классификации: назначение и качество стали. Качество стали зависит от степени чистоты по вредным примесям и точности химического состава по С, Mn и Si.

Назначение стали определяется, в основном, содержанием углерода, от которого зависит прочность, пластичность и твердость в стали.

По назначению стали делятся на две большие группы:

- 1) Конструкционные, содержащие до 0,8% С
- 2) Инструментальные (высокоуглеродистые), содержащие 0,7...1,3% С.

По качеству стали делятся на три группы:

- 1) Обыкновенного качества
- 2) Качественные
- 3) Высококачественные

1) Сталь обыкновенного качества содержит  $\leq 0,08\% S$  и  $\leq 0,09\% P$ , более широкие пределы по углероду, Si и Mn, чем качественные стали.

Стали обыкновенного качества поставляют трех групп, см. таблицу 2.1.

**Таблица 2.1. - Группы и основные марки стали обыкновенного качества**

Группа	Характеристика поставки	Марки
А	По механическим свойствам	Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6
Б	По химическому составу	БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6
В	По механическим свойствам и химическому составу	ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5

Сталь поставляют в виде проката: сортового, фасонного, толстолистового, тонколистового, широкополосного, а также в виде ленты, проволоки, метизов, труб.

Цифры в марках – порядковые номера в ГОСТе (не означают содержания углерода). С возрастанием цифры повышается прочность (увеличивается содержание углерода) и падает пластичность. Наибольшее содержание углерода в этих сталях (БСт6) не достигает 0,5%, так что это стали конструкционные, применяемые в строительстве, для деталей машин, станков, ширпотреба и др. при сравнительно неотвественном назначении конструкций и деталей.

Стали группы А используются в том случае, если в процессе изготовления деталей или конструкций сталь не нагревается. В этом случае свойства ( $\sigma_B, \delta$ ) будут соответствовать марке стали.

Стали группы Б используются в том случае, если детали подвергают горячей обработкой давлением (ковка, штамповка и т.д.). Для назначения режима горячей обработки нужно знать химический состав стали, а исходные механические свойства изменятся, поэтому стали поставляются только по химическому составу.

Стали группы В подвергаются сварке (часть детали нагревается, а другая часть – нет). В этом случае надо знать и химический состав, и механические свойства стали.

2) Качественные стали содержат приблизительно в 2 раза меньше вредных примесей, чем стали обыкновенного качества ( $S \leq 0,04$ ;  $P \leq 0,04$ ) имеют более узкие пределы содержания углерода в каждой марке и более высокий процент Si и Mn.

В зависимости от назначения стали подразделяются на конструктивные и инструментальные.

Конструкционные качественные стали содержат 0,85% С и маркируются по процентному содержанию углерода (сотые доли процента, через 0,05% С): сталь 05, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85.

Эти стали подразделяются на подгруппы: 1) низкоуглеродистые (цементуемые), содержащие до 0,25% С (марки 10, 15, 20, 25), обладающие высокой пластичностью; 2) среднеуглеродистые (улучшаемые), содержащие от 0,3 до 0,55% С (марки 30, 35, 40, 45, 50, 55), обладающие повышенной прочностью; 3) высокоуглеродистые (пружинно-рессорные), содержащие от 0,60 до 0,85% С (марки 60, 65, 70, 75, 80, 85).

Эти стали применяются для изготовления ответственных деталей машин и конструкций. Каждая марка имеет точный химический состав и механические свойства в состоянии поставки. Эти стали подвергаются всем видам обработки, включая термическую, химико-термическую и термомеханическую обработку.

Стальные отливки изготавливают из конструкционной стали марок 15Л, 25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 50Л и 55Л, где допускается несколько повышенное (по сравнению с качественными) содержание  $S \leq 0,06\%$  и  $P \leq 0,08\%$ .

Инструментальные качественные стали содержат повышенное количество С (0,7...1,3% С). Из инструментальных сталей изготавливают режущий, измерительный и штамповый инструмент. Высокое содержание углерода обеспечивает в инструментальной стали высокую твердость, износостойкость, но пониженную пластичность и вязкость. Марки У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13 – цифра в марке – десятые доли процента углерода.

3) Высококачественные стали – содержат приблизительно в 2 раза меньше S и P, чем качественные. Они маркируются как качественные, в марке ставится буква А: сталь У8А, У10А, У12А.

Кроме сталей общего назначения, существуют специализированные стали: автоматные (А12, А20, А30 и др., где цифры – сотые доли процента углерода), для криогенной техники, для холодной штамповки, пониженной прокаливаемости и др.

### Вопросы для самоконтроля

1. Чем отличается  $Fe_\gamma$  от  $Fe_\alpha$ ?
2. Влияние Si и Mn на свойства стали.
3. Теория графитизации.
4. По диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C разобрать кристаллизацию стали 40. Что такое феррит и аустенит, их свойства?
5. По диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C разобрать кристаллизацию стали У8. Что такое перлит, каковы его свойства?
6. По диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C разобрать кристаллизацию стали У13. Что такое цементит, каковы его свойства?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### *Основная*

1. **Дегтярев, М.Г.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007 г. – с.317.
2. Материаловедение и технология металлов / под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000 г. – с. 403.
3. **Оськин, В.А.** «Материаловедение. Технология Конструкционных Материалов» / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: КолосС, 2007 г. – с. 394.
4. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / А.А. Аникин, [и др.]. – Саратов: СГАУ, 2007 г. – с. 218.

### *Дополнительная*

1. **Гиин Э.Ч.** Технология литейного производства / Э.Ч. Гиин, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005 г. – с. 267.
2. Технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам / А.А. Аникин, [и др.] Саратов. СГАУ. 2006 г. – с. 25.
3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / под ред. М.М. Федорченко. – М.: Машиностроение. 1985 г. – с. 264.
4. Технология металлов и материаловедение / под. ред. Л.Ф. Усовой. – М.: Металлургия, 1987 г. – с 799.

## Лекция 3

### ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

#### 3.1. Критические точки в стали

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах, называются критическими точками. Критические точки в сплавах системы Fe-Fe<sub>3</sub>C имеют условные обозначения. Все критические точки обозначаются буквой А. Основные критические точки следующие. На линии PSK лежит первая критическая точка А<sub>1</sub> (727°), соответствующая превращению П → А при нагревании, или А → П при охлаждении; на линии GS лежат критические точки А<sub>3</sub>, обозначающие начало выделения феррита из аустенита при охлаждении или конец растворения феррита в аустените при нагревании. На линии ES лежат критические точки А<sub>сm</sub> (читать А<sub>цm</sub>). В точке А<sub>сm</sub> при охлаждении стали из аустенита начинают выделяться кристаллы Ц<sub>п</sub>, а при нагревании в этой точке Ц<sub>п</sub> до конца растворится в аустените.

#### 3.2. Превращения в стали при нагреве

Теорию термообработки стали принято разбирать на эвтектоидной стали, т.к. эта сталь имеет только одну критическую точку (А<sub>1</sub>). В равновесном состоянии (при комнатной температуре) эта сталь имеет структуру перлита. В точке А<sub>1</sub> при нагреве происходит переход перлита в аустенит по реакции: П (Ф+Ц) → А, т.е. Fe α + Fe<sub>3</sub>C → Fe γ (C).

Прохождение этой реакции складывается из 3-х процессов:

- 1) Аллотропическое изменение кристаллической решетки железа Fe α → Fe γ.
- 2) Растворение цементита в Fe γ с получением аустенита.
- 3) Гомегенезация аустенита (выравнивание концентрации электронов по объему), т.к. в первый момент получается неоднородный раствор.

Там, где были включения цементита, концентрация углерода в аустените будет повышенная, а где были пластины феррита – пониженная. Для выравнивания химического состава обычно при температуре нагрева проводится выдержка.

Превращение перлита в аустенит является кристаллизационным процессом и имеет закономерности этого процесса. Вначале на границах ферритных и цементитных включений возникают центры перекристаллизации – мелкие кристаллики аустенита. Затем эти центры растут за счет перехода атомов от феррито-цементитной структуры к новой кристаллической решетке (Fe γ (C)). В первую очередь в аустенит переходит феррит, а цементитные включения растворяются не сразу. Выдержка при температуре нагрева приводит к окончательному растворению цементита и гомогенизации аустенита.

#### 3.3. Измельчение и рост аустенитного зерна при нагреве

В тот момент, когда полностью завершится переход перлита в аустенит при нагреве выше точки А<sub>1</sub>, зерно аустенита получается мелким. Такое зерно называется начальным. Причина сильного измельчения зерна заключается в том, что при переходе перлита в аустенит возникает большое количество центров перекристаллизации.

Известно, что зародыши новой фазы легче всего возникают в участках с неравновесным состоянием атомов, чаще всего на границах зерен, дислокациях и других дефектных местах в структуре.

В перлитной структуре кроме границ зерен между отдельными колониями перлита имеет место межфазовая граница феррит-цементит внутри зерен перлита. Эти границы имеют тем большую протяженность, чем мельче феррито-цементитная смесь. Центры аустенитных кристаллов образуются и на межзеренных границах, и внутри зерен на границах феррит-цементит, поэтому центров получается во много раз больше, чем при обратной перекристаллизации аустенита в перлит. Таким образом, при перлитно-аустенитном превращении происходит сильное измельчение зерна. На этом явлении основываются все виды термообработки, предназначенные для измельчения зерна в стальных изделиях. Размер зерна аустенита оказывает большое влияние как на механические, так и технологические свойства стали.

Стали разного химического состава имеют различную склонность к росту аустенитного зерна при нагреве. Если в структуре стали есть устойчивые частицы, препятствующие росту зерна при нагреве, такие стали называются природно- или наследственно-мелкозернистыми. В отличие от них обычные стали, у которых зерно начинает расти при перегреве сразу, называется наследственно- (природно-) – крупнозернистыми.

Для получения наследственной мелкозернистости в сталь при раскислении добавляют алюминий, который образует оксиды и нитриды, очень устойчивые при нагреве.

Легирование стали сильными карбидообразующими элементами (Ti, Cr, V, Mo, W) также приводит к наследственной мелкозернистости. Самая высокая температура, до которой карбиды не растворяются, составляет 1050-1100<sup>0</sup>С. При более высоких температурах, когда частицы, сдерживавшие рост зерен, растворяются, у наследственно мелкозернистых сталей начинается укрупнение структуры. За наследственное зерно аустенита условно принимается размер, который получается после выдержки при температуре 930<sup>0</sup>С, 3 часа.

Свойства изделий зависят от действительного, а не наследственного зерна аустенита. Но стали с мелким наследственным зерном более технологичны, т.к. допускают при горячей обработке (обработка давлением, термообработка) нагрев до более высоких температур, что более технологично и производительнее.

Величину зерна определяют баллами. Между номером зерна (баллом) «N» и количеством зерен «n», помещающихся на 1 мм<sup>2</sup> шлифа, существует следующая зависимость  $n = 2^{N+3}$ . Стали с зерном N 1-5 относят к группе крупнозернистых, а с зерном 6-15 к мелкозернистым.

### 3.4. Превращения в стали при охлаждении.

Вначале, как всегда, рассмотрим превращения в эвтектоидной стали. Выше точки Ас<sub>1</sub> эта сталь имеет структуру аустенита. При медленном охлаждении в аустените происходит превращение, описываемое реакцией:  $Fe \gamma (C) \rightarrow Fe \alpha + Fe_3C$ , т.е. аустенит превращается в феррито-цементитную смесь. Сущность этого превращения заключается в следующем. Ниже 727<sup>0</sup>С (А<sub>1</sub>) должно произойти аллотропическое изменение кристаллической решетки железа:  $Fe \gamma \rightarrow Fe \alpha$ . Это приводит к скачкообразному падению растворимости углерода в железе. Следовательно, углерод должен выделиться из раствора, и он выделяется в виде цементита. Таким образом,

превращение аустенита в перлит состоит из двух процессов, которые зависят друг от друга: 1)  $Fe \gamma \rightarrow Fe \alpha$ , 2) Диффузионное выделение углерода из решетки железа в виде  $Fe_3C$ . Обычно перлит, полученный при охлаждении непосредственно из аустенита, имеет пластинчатую структуру. Растет перлит в виде колоний из отдельных центров. Зародышем перлитной колонии чаще всего является цементит, зарождение которого облегчено на границе аустенитных зерен. К растущей пластинке цементита из соседних областей подходят атомы углерода, и обедненные углеродом области железа испытывают аллотропическое превращение, превращаясь в феррит. Обычно перлит растет колониями от границ аустенитного зерна. Эти колонии при разрушении стали ведут себя как самостоятельные зерна. Размер фасеток в изломе в среднем равен размеру перлитных колоний. С уменьшением размера перлитных колоний, называемых также эвтектоидными зернами, ударная вязкость стали растет. Перлитные колонии зарождаются на границах аустенитных зерен. Поэтому с уменьшением аустенитного зерна сокращается и размер перлитных колоний.

При ускоренном охлаждении аустенит имеет свойство переохлаждаться до температур, значительно ниже точки  $A_1$ , в результате из переохлажденного аустенита получаются неравновесные структуры, более твердые и прочные.

Кинетику превращения переохлажденного аустенита изображают на диаграмме изотермического превращения аустенита, которую строят экспериментально для каждой марки стали.

Межпластиночное расстояние – очень важная характеристика. С увеличением степени дисперсности феррито-цементитной структуры твердость, пределы прочности, текучести и выносливости возрастают, а относительное удлинение, относительное сужение, и вязкость снижаются. Твердость перлитных структур указана на диаграмме. Резких границ между перлитом, сорбитом и троститом нет, это условная классификация феррито-цементитных смесей по дисперсности, удобная в практике термообработки.

### 3.5. Мартенситное превращение

Если аустенит очень быстро охладить до низких температур, где диффузия не идет, то наступает мартенситное превращение, когда перестраивается кристаллическая решетка железа бездиффузионным путем, а перераспределение углерода не происходит, т.е. углерод не выделяется из решетки  $\alpha$  - железа:  $A \rightarrow M$ , т.е.  $Fe \gamma (C) \rightarrow Fe \alpha (C)$

Таким образом, из аустенита получается пересыщенный раствор углерода в  $\alpha$  -Fe, называемый мартенситом. Углерода в мартенсите столько же, что и в исходно аустените. Кроме углерода, аустенит и соответственно мартенсит может содержать легирующие элементы.

Атомы углерода занимают поры в решетке  $\alpha$  -Fe и сильно искажают ее (см. рис. 1.10): один параметр у кубической решетки увеличивается (высота «с»), а размеры ее основания уменьшаются. Такое искажение объясняется тем, что пора имеет размеры значительно меньше, чем диаметр атома углерода (диаметр атома углерода в свободном состоянии равен  $1,54^{\circ}A$ , а диаметр свободного места в о.ц.к. решетке железа, так называемой поры, равен  $0,62^{\circ}A$ ). Такая вытянутая решетка называется тетрагональной, а отношение  $c/a$  – степенью тетрагональности. Чем больше в мартенсите углерода, тем больше отношение  $c/a$ .



Перестройка решетки железа происходит путем сдвига рядов атомов по определенным кристаллографическим направлениям. Каждый атом сдвигается при этом на расстояние, меньшее межатомного. Кристаллы мартенсита имеют вид тонких пластин, они в процессе превращения сопряжены с аустенитом по определенным кристаллографическим плоскостям, и межфазная граница не образуется (когерентная связь). Под микроскопом эти тонкие пластины имеют вид иголок.

Мартенсит имеет больший удельный объем, чем аустенит, вследствие этого в процессе превращения в структуре стали возрастают упругие напряжения. Когда эти напряжения достигнут критической величины, сопряженность решеток мартенсита и аустенита нарушается, рост кристалла мартенсита прекращается. Мартенситные пластины растут с огромной скоростью (~ 100 м/с). Величина первой пластины определяется размером аустенитного зерна, т.к. при переходе границы нарушается сопряженность кристаллических решеток. Дальнейшее превращение протекает путем зарождения новых кристаллов мартенсита в оставшемся аустените по определенным кристаллографическим направлениям.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое критические точки, укажите их на диаграмме Fe<sub>γ</sub> от Fe<sub>α</sub>?
2. Что такое аустенитное зерно и какие факторы влияют на изменение его размеров?
3. Какие процессы происходят в стали при охлаждении и как изменяются свойства перлита?
4. Что такое мартенсит, каковы его свойства, в чем сущность мартенситного превращения?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

#### *Основная*

1. **Дегтярев, М.Г.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007 г. – с.317.
2. Материаловедение и технология металлов / под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000 г. – с. 403.
3. **Оськин, В.А.** «Материаловедение. Технология Конструкционных Материалов» / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: КолосС, 2007 г. – с. 394.
4. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / А.А. Аникин, [и др.]. – Саратов: СГАУ, 2007 г. – с. 218.

#### *Дополнительная*

1. **Гиин Э.Ч.** Технология литейного производства / Э.Ч. Гиин, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005 г. – с. 267.
2. Технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам / А.А. Аникин, [и др.] Саратов. СГАУ. 2006 г. – с. 25.
3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / под ред. М.М. Федорченко. – М.: Машиностроение. 1985 г. – с. 264.
4. Технология металлов и материаловедение / под. ред. Л.Ф. Усовой. – М.: Металлургия, 1987 г. – с 799.

## Лекция 4

### ПРАКТИКА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Основными видами термической обработки стали являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

#### 4.1. Отжиг

**Отжиг** назначается для устранения химической и физической неоднородности (ликвации), снятия внутренних напряжений, смягчения структуры, исправления зерен (получения более благоприятной и мелкозернистой структуры), т.е. приведения стали в равновесное состояние. В результате в доэвтектоидной стали получается структура Ф+П, в эвтектоидной стали – П, в заэвтектоидной – П+Ц<sub>II</sub>.

#### 4.2. Отжиг I рода

**Отжиг I-го рода** частично или полностью устраняет отклонения от равновесного состояния, причем его проведение не обусловлено фазовыми превращениями.

Главными видами этого отжига являются диффузионный и рекристаллизационный. Отжиг I рода применяется и для цветных сплавов.

#### 4.3. Диффузионный отжиг

**Диффузионному** отжигу подвергают слитки и крупные отливки из легированной стали с целью уменьшения дендритной или внутрикристаллитной ликвации. Дендритная ликвация понижает пластичность и вязкость легированной стали. При прокате слитков с ликвацией возникает полосчатость и анизотропность свойств, а также трещины (места скоплений легирующих элементов имеют повышенную хрупкость).

Температура нагрева при диффузионном отжиге должна быть высокой (1100-1200<sup>0</sup>С), выдержка 8-20 ч. и медленное охлаждение. Общая продолжительность больших садок металла достигает 50-100 ч. При таком высоком нагреве сильно вырастает аустенитное зерно, поэтому фасонные отливки после гомогенизации для измельчения зерна подвергают полному отжигу или нормализации.

#### 4.4. Рекристаллизационный отжиг

Под **рекристаллизационным** отжигом понимают нагрев холоднодеформированной стали выше температуры рекристаллизации, выдержку при этой температуре с последующим охлаждением. При этом отжиге снимается наклеп (нагартовка), полученный сталью после холодной обработки давлением. Этот вид отжига применяют перед или после холодной обработки давлением и как промежуточную операцию для разупрочнения между операциями холодного деформирования.

#### 4.5. Отжиг II-го рода

**Отжиг 2-го** рода заключается в нагреве стали до температур выше точек  $A_{c3}$  или  $A_{c1}$ , выдержке и последующем, как правило, медленном охлаждении (со скоростью 50-200<sup>0</sup>/час).

Различают следующие виды отжига II рода: полный, неполный и изотермический.

#### 4.6. Полный отжиг

Этот отжиг назначается для доэвтектоидных сталей и заключается в нагреве на 30-50<sup>0</sup>С выше температуры, соответствующей точке  $A_{c3}$ , выдержке при этой температуре и последующем медленном охлаждении (вместе с печью).

При таком отжиге происходит полная фазовая перекристаллизация: перлит и феррит перекристаллизовываются в аустенит, при этом исправляется исходное зерно, измельчается, устраняется крупнозернистая структура.

Охлаждение проводится медленное, вместе с печью, чтобы распад аустенита происходил при малых степенях переохлаждения, в результате получается равновесная структура Ф+П, наиболее мягкая, вязкая и пластичная.

Полному отжигу обычно подвергают сортовой прокат, поковки и фасонные отливки для исправления зерна и улучшения обрабатываемости резанием.

#### 4.7. Неполный отжиг

**Неполный** отжиг проводится с нагревом выше точки  $A_{c1}$  на 30-50<sup>0</sup>С, после выдержки охлаждение проводится медленное (вместе с печью). При таком отжиге получается так же как при полном, наиболее мягкая и пластичная структура, но происходит только частичная перекристаллизация (П→А), поэтому полного исправления структуры не наблюдается.

Для доэвтектоидных сталей неполный отжиг применяют для улучшения обрабатываемости резанием, когда не надо исправлять в стали зерно.

Для заэвтектоидных сталей применяют только неполный отжиг, причем при этом происходит сфероидизация цементита. Такой отжиг еще называется отжигом на зернистый перлит. При таком отжиге не следует сильно превышать точку  $A_{c1}$ , когда растворяется большая часть цементита и происходит гомогенизация аустенита. В этом случае получится пластинчатый, а не зернистый перлит. При более низком нагреве частицы цементита полностью не растворяются и служат центрами кристаллизации для цементита, принимающего зернистую форму.

#### 4.8. Изотермический отжиг

Отличие **изотермического** отжига от полного или неполного заключается в режиме охлаждения, когда непрерывное медленное охлаждение заменяют изотермической выдержкой при температурах намного ниже точки  $A_1$  в районе перлитного превращения. Обычно из печи, где проводился нагрев, металл переносят в другую печь, нагретую на 650-680<sup>0</sup>С, и выдерживают в этой печи до тех пор, пока не закончится превращение аустенита в перлит, а затем охлаждают на воздухе.

#### 4.9. Закалка

Цель **закалки** – получить в стали мартенсит. Закалка – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше критической точки  $A_{c3}$  для доэвтектоидной и  $A_{c1}$  для заэвтектоидной стали, выдержке и последующем охлаждении со скоростью, превышающей критическую. При этом в доэвтектоидной стали – мартенсит и карбиды.

После закалки обязательно назначают отпуск для снятия внутренних напряжений, снижения хрупкости и получения нужного комплекса механических свойств.

#### 4.10. Выбор температуры закалки

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку. При полной закалке нагрев проводят выше верхних критических точек  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$  на 30-50<sup>0</sup> до чисто аустенитного состояния. При неполной закалке нагрев проводят выше точки  $A_{c1}$  на 30-50<sup>0</sup>С.

Для доэвтектоидной стали правильной является полная закалка, при которой получается мартенсит. Если для этой стали применить неполную закалку, то получится структура мартенсит плюс феррит. Ферритные зерна в закаленной стали нежелательны, поэтому неполная закалка для доэвтектоидной стали не применяется.

Для заэвтектоидной стали правильной является неполная закалка, при которой получается структура мартенсит и цементит вторичный. Такая структура лучше чисто мартенситной, т.к. цементит повышает твердость и износостойчивость стали.

#### 4.11. Отпуск

Закаленная углеродистая сталь характеризуется не только высокой твердостью, но и очень большой склонностью к хрупкому разрушению. Для увеличения вязкости и уменьшения закалочных напряжений после закалки применяют отпуск.

Отпуск – термическая обработка, заключающаяся в нагреве закаленной стали до температуры ниже критической точки  $A_{c1}$ , выдержке и последующем охлаждении на воздухе.

#### 4.12. Нормализация

**Нормализация** заключается в нагреве доэвтектоидной стали до температуры, превышающей точку  $A_{c3}$  на 30-50<sup>0</sup>С, а заэвтектоидной стали – выше  $A_{cm}$  ( до аустенитного состояния), выдержке и последующего охлаждения на спокойном воздухе. Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию стали и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье, прокате, ковке или штамповке.

В связи с этим нормализацию широко применяют для измельчения аустенитного зерна вместо полного отжига, т.к. нормализация более дешевая термическая операция. В заэвтектоидной стали полным отжигом нельзя устранить цементитную сетку, поэтому применяют нормализацию, в процессе которой цементит выделяется в виде отдельных мелких включений.

В средне и высокоуглеродистой стали нормализация повышает твердость и прочность на 10-15% по сравнению с отжигом, т.к. охлаждение на воздухе (более ускоренное, чем с печью при отжиге) приводит к распаду аустенита при более низких

температурах, что повышает дисперсность феррито-цементитной смеси, в результате получается структура сорбита закалки. По сравнению с улучшенным состоянием (со структурой сорбита отпуска) нормализованная сталь имеет меньшую пластичность и вязкость, поэтому для ответственных деталей следует все же применять улучшение.

Для легированных сталей нормализация приводит к получению структуры троостита и даже мартенсита. Высоколегированные стали, получающие закалку при охлаждении на воздухе, называются самокалами.

Таким образом, нормализацию чаще всего применяют как промежуточную операцию для смягчения стали перед обработкой резанием, устранения пороков строения и общего улучшения структуры перед закалкой. Нормализацию используют и как окончательную обработку средне и высокоуглеродистых доэвтектоидных сталей, если требования к свойствам умеренные и необязательна закалка с высоким отпуском.

Скорость охлаждения на воздухе зависит от массы изделия и отношения его поверхности к объему, вследствие чего эти факторы сказываются на получаемой структуре

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое отжиг и каково его назначение?
2. Что такое закалка и какова ее цель?
3. Что такое отпуск и каково его назначение?
4. Что такое нормализация, и для чего ее проводят?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

#### *Основная*

1. **Дегтярев, М.Г.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007 г. – с.317.
2. Материаловедение и технология металлов / под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000 г. – с. 403.
3. **Оськин, В.А.** «Материаловедение. Технология Конструкционных Материалов» / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: КолосС, 2007 г. – с. 394.
4. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / А.А. Аникин, [и др.]. – Саратов: СГАУ, 2007 г. – с. 218.

#### *Дополнительная*

1. **Гиин Э.Ч.** Технология литейного производства / Э.Ч. Гиин, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005 г. – с. 267.
2. Технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам / А.А. Аникин, [и др.] Саратов. СГАУ. 2006 г. – с. 25.
3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / под ред. М.М. Федорченко. – М.: Машиностроение. 1985 г. – с. 264.
4. Технология металлов и материаловедение / под. ред. Л.Ф. Усовой. – М.: Металлургия, 1987 г. – с 799.

## Лекция 5

### ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ

Наиболее важной частью деталей машин и инструментов являются поверхностные слои, от качества которых зачастую зависит срок их службы. Существует 3 главных способа упрочнения поверхности стали:

1. Поверхностная закалка.
2. Поверхностный наклеп.

#### 5.1. Поверхностная закалка

Основное назначение **поверхностной закалки**: повышение твердости, износостойкости и предела выносливости обрабатываемого изделия. Сердцевина остается вязкой и воспринимает ударные нагрузки.

Поверхностной закалке подвергают обычно углеродистые стали с содержанием углерода 0,4% и выше (при меньшем содержании углерода поверхностный слой не получит необходимой твердости). Для легированных сталей поверхностную закалку применять, как правило, не следует, т.к. глубокая прокаливаемость, которая достигается легированием, здесь не нужна.

Сущность любого способа поверхностной закалки состоит в том, что поверхностные слои детали быстро нагреваются выше критических точек, затем следует охлаждение со скоростью  $\geq V$  кр. В результате, мартенситная структура получается только в поверхностном слое. Закаленный слой обязательно подвергается низкому отпуску.

Существует 2 главных вида поверхностной закалки в зависимости от способа нагрева:

- 1) Индукционный нагрев токами высокой частоты (ТВЧ)
- 2) Газопламенный нагрев.

В последнее время стала применяться лазерная закалка.

#### 5.2. Закалка ТВЧ

Для поверхностной закалки изделие устанавливают в индуктор (соленоид), по которому течет переменный ток. Индуктор представляет собой один или несколько витков пустотелой водоохлаждаемой медной трубки или шины. Внутри индуктора помещают нагреваемую деталь. Вокруг индуктора создается переменное магнитное поле. Которое индуцирует в детали вихревые токи, при этом распределение переменного тока по сечению проводника неравномерно.

Чем больше частота, тем меньше глубина закалки (нагрева). При индукционном нагреве проявляется также эффект близости: чем ближе деталь к индуктору, тем выше температура нагрева. После разогрева деталь охлаждается с помощью душирующего устройства (спрейера).

Источником электропитания служат чаще всего машинные и, реже, ламповые генераторы. Когда глубина закалки 1-3 мм и более, применяют машинный генератор, имеющий диапазон рабочих частот 500-8000 Гц и мощность 12-500 кВт. При глубине закалки до 1 мм используют ламповые генераторы с частотой до 450000 Гц и мощностью 10-200 кВт.

При индукционном нагреве скорость нагрева составляет 30-300<sup>0</sup>/с по сравнению с 1,5-3<sup>0</sup>/с при печном нагреве.

Такой скоростной нагрев приводит к особенностям фазовых превращений.

1. Критические точки, т.е. температуры закалки, смещаются вверх на 50÷150<sup>0</sup> в зависимости от скорости нагрева.

2. При быстром нагреве возникает большое количество центров перекристаллизации, получается мелкое аустенитное зерно, которое не вырастает, т.к. продолжительность нагрева и выдержка очень малы. После закалки получается структура мелкоигльчатого или безигльчатого мартенсита.

3. Твердость мартенсита, полученного при закалке ТВЧ, на 3-6 HRC выше, чем после печной закалки.

При поверхностной закалке сильно повышается сопротивление усталостному разрушению, т.к. в закаленном слое образуются остаточные напряжения сжатия в связи с тем, что мартенситная структура в закаленном слое имеет самый большой удельный объем среди всех структур.

Преимущества высокочастотного нагрева: 1) Высокая производительность; 2) Отсутствие обезуглероживания и заметного окисления поверхности;

3) Минимальное коробление; 4) Возможность автоматизации; установки ТВЧ можно встраивать в автоматические поточные линии.

Отпуск часто делают также на установке ТВЧ, когда охлаждение в процессе закалки прерывают с таким расчетом, чтобы оставшееся в детали тепло нагрело закаленный слой до температуры отпуска (150-170<sup>0</sup>С), т.е. проводят самоотпуск.

Недостаток метода индукционного нагрева состоит в том, что для единичных деталей его применить нельзя, т.к. стоимость индуктора и подбор режимов в этом случае слишком удорожает процесс. Второй недостаток – значительная стоимость всей установки. Но в условиях массового и серийного производства эти недостатки отсутствуют.

### **5.3. Закалка с газопламенным нагревом**

Поверхность детали нагревают газовым пламенем, имеющим высокую температуру (~ 3000<sup>0</sup>С). Газопламенную закалку применяют в мелкосерийном, индивидуальном производстве, при ремонте, при закалке очень крупных деталей, деталей с криволинейной, сложной поверхностью, а также при закалке чугунных, стальных отливок, т.е. в таких случаях, когда закалка ТВЧ невозможна или нерентабельна. Кроме того, при газопламенной закалке возникают меньшие напряжения, чем при закалке ТВЧ, т.к. нагрев медленнее и нет резкого перепада температур, поэтому чугунные детали, а также детали из высоколегированных сталей лучше подвергать газопламенной закалке.

### **5.4. Поверхностный наклеп**

Упрочнение деталей пластическим деформированием поверхности применяют, в основном, для повышения их усталостной прочности. А также контактной выносливости и износостойкости. Глубина наклепа составляет 0,2 – 0,4 мм. В результате наклепа повышается не только твердость, прочность, но и создаются остаточные напряжения сжатия, что приводит к повышению предела усталости и увеличению долговечности деталей. Упрочнение наклепом осуществляется, главным

образом, двумя способами: дробеструйной обработкой и обработкой роликами. Виды упрочнения пластическим деформированием представлены на рисунок 5.1.

При дробеструйной обработке на поверхность детали из специальных дробеметов с большой скоростью направляют поток дроби из белого чугуна  $\phi 0,4 \div 2$  мм. Дробеструйной обработке подвергают изделия типа пружин и рессор, звенья цепей, гусениц, гильзы, поршни, зубчатые колеса и др.

При обработке роликами деформация осуществляется давлением ролика из твердого металла. Для осуществления обкатки роликами можно использовать обычные станки (токарный, строгальный), а вместо резца в суппорт закрепляется приспособление с роликом. Обкаткой роликами обрабатывают, например, шейки валов.

В некоторых случаях проводят комплексное упрочнение: закалка ТВЧ плюс дробеструйная обработка; цементация плюс дробеструйная обработка и т.д.

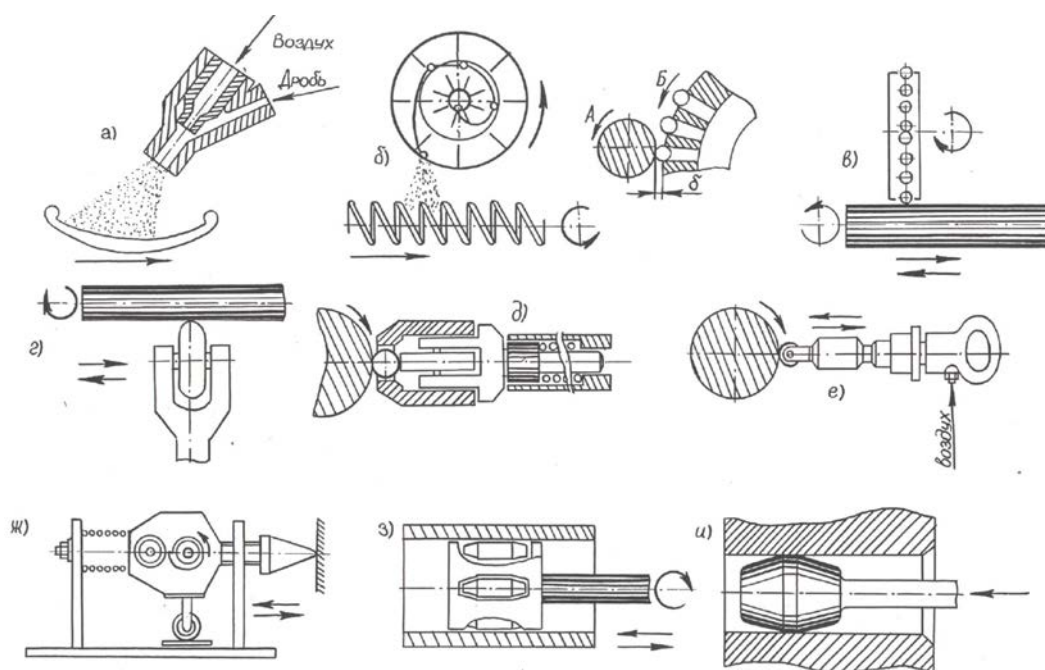


Рисунок 5.1. Основные виды упрочнения поверхности пластическим деформированием.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие Вы знаете способы поверхностного упрочнения стали и в чем заключается сущность каждого из них?
2. Расскажите о пламенной поверхностной закалке.
3. Расскажите о принципе закалке ТВЧ. Преимущества и недостатки закалки ТВЧ.
4. Что такое поверхностный наклеп?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

#### Основная

1. Дегтярев, М.Г. *Материаловедение. Технология конструкционных материалов* / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007 г. – с.317.



2. *Материаловедение и технология металлов* / под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000 г. – с. 403.

3. **Оськин, В.А.** «Материаловедение. Технология Конструкционных Материалов» / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: КолосС, 2007 г. – с. 394.

4. *Технология конструкционных материалов: учебное пособие* / А.А. Аникин, [и др.]. – Саратов: СГАУ, 2007 г. – с. 218.

*Дополнительная*

1. **Гиин Э.Ч.** *Технология литейного производства* / Э.Ч. Гиин, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005 г. – с. 267.

2. *Технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам* / А.А. Аникин, [и др.] Саратов. СГАУ. 2006 г. – с. 25.

3. *Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения* / под ред. М.М. Федорченко. – М.: Машиностроение. 1985 г. – с. 264.

4. *Технология металлов и материаловедение* / под. ред. Л.Ф. Усовой. – М.: Металлургия, 1987 г. – с 799.

## Лекция 6

### ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ. ВИДЫ ДИФФУЗИОННОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ.

#### 6.1. Химико-термическая обработка

При химико-термической обработке (ХТО) происходит изменение химического состава металла или сплава с поверхности на определенную глубину.

Для изменения химического состава изделие нагревают в активной среде. Во время выдержки изделие диффузионно обогащается элементами из внешней среды.

Можно выделить три одновременно идущих процесса, обеспечивающих обогащение изделия элементами из внешней среды.

1. Образование химического элемента в активированном состоянии. Чаще всего выделение активного атомарного элемента происходит в результате различных реакций.

2. Адсорбация атомов поверхностью изделия. Адсорбация может быть физическая (благодаря действию ван-дерваальсовых сил притяжения) или химическая с возникновением сильных химических связей между адсорбируемыми атомами металлической поверхности детали.

3. Диффузия адсорбированных атомов от поверхности в глубь изделия.

Первый процесс (создание активной среды) можно регулировать, второй процесс (адсорбация) протекает быстро, а третий процесс (диффузия) – наиболее длительный, от него зависит глубина зоны и распределение в ней насыщающего элемента.

Скорость диффузии в решетке железа различных элементов неодинакова. Если элемент образует с железом раствор внедрения, диффузия протекает намного быстрее, чем в случае образования раствора замещения. Растворы внедрения образуют, например, С, N, а растворы замещения Cr, Al, Si и др.

Кроме того, скорость диффузии сильно зависит от температуры – коэффициент диффузии экспоненциально растет с повышением температуры.

Зависимость толщины диффузионного слоя от продолжительности выдержки носит обычно параболический характер, т.е. с течением времени скорость увеличения толщины слоя непрерывно уменьшается.

В зависимости от того, каким элементом насыщают поверхностный слой, различают цементацию (насыщение углеродом, азотирование (насыщение азотом), нитроцементацию (комбинированное насыщение углеродом и азотом), диффузионную металлизацию (насыщение хромом, алюминием и др.).

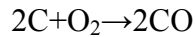
#### 6.2. Цементация стали

При цементации осуществляется насыщение углеродом поверхностного слоя изделий из вязкой малоуглеродистой стали с 0,1..0,25% С. На поверхности должно получиться после насыщения 0,8..1% С. После цементации обязательно назначают термическую обработку, в результате которой на поверхности создается структура высокоуглеродистого мартенсита (иногда с карбидами), который обеспечивает высокую твердость, износостойкость и выносливость поверхности при сохранении высокой вязкости сердцевины.

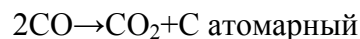
Различают два основных вида цементации: в твердой и газовой средах.

### 6.2.1. Твердая цементация

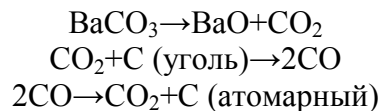
Детали укладывают в металлические ящики и пересыпают карбюризатором, который состоит из древесного угля с добавками углекислых солей  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Ящик закрывают, щели замазывают огнеупорной глиной, ставят в печь и выдерживают при температуре  $900-950^\circ\text{C}$  (структура стали должна быть аустенитной, т.к. углерод хорошо растворяется только в  $\text{Fe}\gamma$ , т.е. выше точки  $\text{Ac}_3$ ). За счет кислорода воздуха происходит неполное сгорание угля:



На поверхности детали происходит разложение CO по реакции:



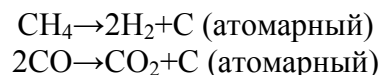
Образующиеся атомы углерода адсорбируются поверхностью изделий. Углекислые соли в карбюризаторе активируют процесс, пополняя количество атомарного углерода, например, по схеме:



Глубина цементованного слоя обычно составляет  $0,5 \div 1,5$  мм. Цементация в твердом карбюризаторе – малопроизводительный процесс: на каждые  $0,1-0,12$  мм требуется 1 час выдержки.

### 6.2.2. Газовая цементация

Процесс осуществляется в печах с герметической камерой, наполненной газовым карбюризатором, содержащим метан  $\text{CH}_4$  и окись углерода CO. Атомарный углерод выделяется при диссоциации этих газов:



Газовая цементация осуществляется в условиях высокой механизации и автоматизации процесса и является основным способом при массовом производстве. При этом возможно управлять процессом путем поддержания требуемого углеродного потенциала печной атмосферы. Для ускорения процесса иногда стремятся проводить цементацию при более высоких температурах  $1000-1050^\circ\text{C}$ , что возможно при использовании наследственно-мелкозернистой стали, тогда как для обычной стали такие высокие температуры допускать нельзя из-за сильного роста аустенитного зерна. Кроме того, высокая температура снижает стойкость кладки и жароупорных элементов печи.

После медленного охлаждения с температуры цементации в диффузионном слое наблюдаются три структурные зоны, т.к. содержание углерода плавно уменьшается с  $\sim 1\%$  на поверхности до  $0,1-0,2\%$  в сердцевине: от поверхности в глубь детали сначала

будет заэвтектоидная зона со структурой П+Ц<sub>п</sub>, содержащая углерода > 0,8%; затем эвтектоидная зона со структурой П+Ф, содержащая < 0,8% С.

### 6.2.3. Термическая обработка цементированной стали

**Цель термической обработки** – получить высокую твердость поверхностного слоя и вязкость сердцевины. После цементации в детали возникает структура перегрева (крупное аустенитное зерно), получающаяся из-за многочасовой выдержки при температуре цементации. Содержание углерода в сердцевине и на поверхности изделия разное, поэтому оптимальные температуры нагрева под закалку и для исправления структуры будут различные, в связи с этим для ответственных деталей после твердой цементации проводят двойную закалку.

При первой закалке нагревают до 850-900<sup>0</sup>С (выше верхних критических точек для сердцевины и поверхностного слоя), чтобы произошла полная перекристаллизации аустенита с измельчением зерна и растворением цементитной сетки. Охлаждение проводят в масле или на воздухе (нормализацию). Ускоренное охлаждение необходимо, чтобы в поверхностном слое цементит выделился не в виде сетки по границам зерен, а мелкими включениями. Таким образом, первая закалка назначается для измельчения зерна в сердцевине и устранения цементитной сетки на поверхности, но поверхностный слой при этом оказывается перегретым (крупнозернистым). Поэтому применяют вторую закалку (неполную) с температуры 760-780<sup>0</sup>С, оптимальную для заэвтектоидной стали поверхностного слоя. После второй закали цементованный слой состоит из мелкоигольчатого высокоуглеродистого мартенсита и глобулярных включений вторичного карбида.

Если сталь нелегированная, то из-за низкой прокаливаемости малоуглеродистой стали сердцевина остается сырая со структурой феррита и небольшого количества перлита.

В легированных сталях сердцевина прокаливается насквозь, поэтому в сердцевине получается низкоуглеродистый, вязкий мартенсит. Для легированных сталей чаще всего проводят одинарную закалку с температуры 850-870<sup>0</sup>С. Природномелкозернистые стали можно закалывать сразу с температуры цементации, предварительно подстуживая изделия до температуры 840-860<sup>0</sup>С.

После закали цементованные изделия всегда подвергают низкому отпуску (160-180<sup>0</sup>С) для снятия закалочных напряжений.

После газовой цементации, когда время пребывания при высокой температуре сокращается в 1,5-2 раза, обычно проводят упрощенную термическую обработку: закалку с цементационного нагрева. В последнее время все шире применяется закалка ТВЧ с последующим самоотпуском.

Цементации подвергают качественные стали 08, 10, 15, 20, 25 и легированные 18ХГТ, 12ХНЗА, 18Х2Н4В и др. В легированных сталях после закали в цементированном слое может остаться большое количество остаточного аустенита, который снижает твердость и некоторые другие свойства. Для устранения Аост. Иногда применяется обработка холодом или другая, более сложная, термообработка. Наличие остаточного аустенита приводит к нестабильности размеров, что недопустимо для точных деталей и измерительного инструмента. Цементованные детали после закали имеют в поверхностном слое значительные остаточные напряжения сжатия, что приводит к повышению предела выносливости стали.

Недостатком цементации является повышение себестоимости деталей в 2,5-3 раза по сравнению с деталями, упрочненными закалкой ТВЧ, поэтому, где это возможно, цементацию устраняют, применяя другие стали с закалкой ТВЧ.

### 6.3. Азотирование

**Азотированием** стали называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных изделий азотом при нагревании их в среде, содержащей аммиак. Азотирование производят для повышения поверхностной твердости и износостойкости изделий или защиты их поверхностей от коррозии. Поэтому различают прочностное и декоративное (антикоррозионное) азотирование. При азотировании стали образуются следующие фазы:  $\alpha$  - фаза – твердый раствор азота в  $\alpha$  - железе;  $\gamma'$  – нитрид железа  $Fe_4N$ ;  $\epsilon$  - нитрид  $Fe_3N$ . После медленного охлаждения с температуры азотирования в диффузионном слое фазы располагаются в следующей последовательности от поверхности к сердцевине:  $(\epsilon + \gamma') \rightarrow (\gamma') \rightarrow (\alpha + \gamma')$  – сердцевина (сорбит или Ф+П). Аммиак при нагреве диссоциирует:  $2NH_3 \rightarrow 6H + 2N$ .

#### 6.3.1. Технология процесса азотирования

1. Предварительная термическая обработка заготовки: закалка и высокий отпуск (улучшение) для получения повышенной прочности и вязкости в сердцевине изделия. Структура после такой обработки – сорбит отпуска.

2. Механическая обработка деталей, включающая шлифование, с получением окончательных размеров изделия.

3. Защита участков, не подлежащих азотированию, тонким слоем олова, жидкого стекла или других веществ.

4. Азотирование.

5. Окончательная доводка изделия.

Азотированию подвергают гильзы цилиндров, шпиндели, ходовые винты, червяки, валики, втулки, шестерни, детали, работающие в условиях изнашивания в коррозионной среде. Азотирование применяется для повышения износостойкости и уменьшения схватывания трущихся деталей из титановых сплавов.

#### 6.3.2. Азотирование в тлеющем разряде

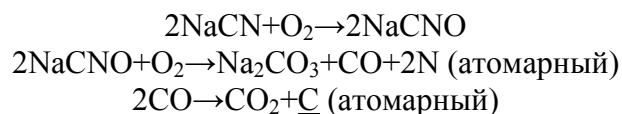
Анодом является контейнер установки, а катодом – детали. Между ними возбуждается тлеющий разряд, и ионы газа, бомбардируя поверхность катода, нагревают ее до температуры насыщения. Атмосфера, где находятся детали, содержит азот. При этом ускоряются диффузионные процессы в 1,5 – 2 раза, отмечается незначительная деформация изделий, уменьшается продолжительность процесса.

### 6.4. Цианирование (нитроцементация)

Диффузионное насыщение поверхностного слоя стальных изделий одновременно углеродом и азотом в газовой среде называется итроцементацией, а в расплаве, содержащем цианистые соли – цианированием.

И цианирование, и нитроцементация бывают высокотемпературные и низкотемпературные.

При цианировании используют ванны с расплавленными цианистыми солями, например, NaCN с добавками солей NaCl, BaCl<sub>2</sub> и др. При цианировании от взаимодействия ванны с кислородом происходят реакции:



В качестве газовой среды при нитроцементации применяют смесь, состоящую из аммиака и науглероживающих газов (метан, эндогаз).

### **6.5. Диффузионная металлизация и диффузионное насыщение другими элементами**

Диффузионное насыщение металлами и некоторыми другими элементами производится с целью упрочнения или придания особых физико-химических свойств поверхностному слою изделия.

Металлы растворяются в железе по способу замещения и поэтому медленнее, чем неметаллы, диффундируют в изделие. Как правило, диффузионное насыщение металлами проводят при более высоких температурах, чем цементацию или азотирование.

Наиболее широкое применение нашли процессы алитирования (насыщение Al), хромирования (насыщение Cr), силицирования (насыщение Si), борирования (насыщение B), а также комбинированные процессы – хромоалитирование (насыщение Cr и Al), сульфацианирование (насыщение S, N, C) и др.

Не надо путать диффузионную металлизацию с электролитическим нанесением покрытий. Например, есть диффузионное и электролитическое хромирование. Диффузионная металлизация может быть твердой, газовой, реже жидкой ( в расплавах легкоплавких металлов – Al, Zn и др.).

При твердой металлизации изделия чаще всего упаковывают в порошкообразную среду, состоящую из ферросплавов (ферроалюминия при алитировании, ферросилиция при силицировании и т.д.) и 0,5-5% NH<sub>4</sub>Cl. При высокой температуре в результате взаимодействия с хлористым алюминием получают летучие хлориды (AlCl<sub>3</sub>, CrCl<sub>2</sub>, SiCl<sub>4</sub> и т.д.). Между хлоридами и железом протекает обменная реакция, в результате которой образуется элемент в атомарном виде, например, AlCl<sub>3</sub>+Fe→FeCl<sub>3</sub>+Al (атомарный).

При газовом методе отдельно получают газы (хлориды), которые в баллонах доставляют для диффузионной металлизации.

### **6.6. Алитирование**

Проводится с целью повышения окалиностойкости. Нелегированная сталь становится жаростойкой до 850-900<sup>0</sup>С. Температура алитирования 950-1000<sup>0</sup>С. Образующийся атомарный алюминий диффундирует в металл, образуя в поверхностном слое твердый раствор алюминия с железом. Толщина алитированного слоя 0,2...0,5 мм получается за 3-16 часов, при этом концентрация Al достигает 40-50%. После алитирования проводят диффузионный отжиг, при котором увеличивается

толщина диффузионного слоя, уменьшается концентрация алюминия до 30% и слой становится менее хрупким.

Алитуванию подвергаются топливники газогенераторных машин, чехлы термопар, клапаны и другие детали, работающие при высокой температуре.

### **6.7. Диффузионное хромирование**

Применяется для повышения окалиностойкости (до 800<sup>0</sup>С), коррозионной стойкости в среде пара, в пресной и морской воде и в кислотах, особенно азотной. Хромирование углеродистой стали повышает твердость и износостойкость. Диффузионный слой состоит из твердого раствора хрома в  $\alpha$  - железе, а если сталь содержит углерода 0,3 – 0,4%, образуются карбиды хрома  $(Fe, Cr)_7C_3$ ;  $(Fe, Cr)_{23}C_6$ . Твердость слоя доходит до 1200-1300 HV. Толщина хромированного слоя 0,1 – 0,2 мм.

### **6.8. Силицирование**

Применяется для повышения коррозионной стойкости в морской воде, в азотной и соляной кислотах. Силицированные детали обладают окалиностойкостью при температурах 700-750<sup>0</sup>С. Силицированный слой состоит из твердого раствора кремния в  $\alpha$  - железе.

Силицированию подвергают детали, используемые в оборудовании химической, бумажной и нефтяной промышленности.

### **6.9. Борирование**

Создает очень высокую твердость (HV 1800-2000 износостойкость и устойчивость против коррозии в различных средах. На поверхности образуются высокотвердые бориды, противостоящие абразивному износу. Борированию подвергают детали, применяемые в оборудовании нефтяной промышленности (втулки грязевых нефтяных насосов), борируют штампы. Борированию можно подвергать любые стали.

Сульфидирование – этот процесс применяется для упрочнения металлических фрикционных деталей, которые быстро выходят из строя из-за схватывания и задиоров контактирующих поверхностей при работе. После сульфидирования наружный слой состоит из сульфидов железа с нитридными включениями и графитом, обладающий малой твердостью. Далее следует слой из карбонитридов с твердостью 1000-1300 HV. Сульфидированные фрикционные детали имеют высокий коэффициент трения (около 0,4) и очень высокую износостойкость, т.к. не происходит образования задиоров и схватывания материалов трущихся деталей.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. ХТО (основные параметры, процессы, виды)
2. Какие стали и с какой целью подвергают цементации (назовите несколько марок).
3. Какова структура цементированного слоя в равновесном состоянии? Объясните, почему такая структура?
4. Термическая обработка после цементации. Какие структуры могут быть в цементованном слое и в сердцевине готовой детали?
5. Какие преимущества газовой цементации в сравнении с твердой?

6. Как и для каких целей проводится азотирование? В какое взаимодействие вступает азот с железом?
7. Какие существуют виды цианирования? В чем преимущества и недостатки жидкого цианирования перед газовым?
8. Диффузионная металлизация ( виды, назначение).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### *Основная*

1. **Дегтярев, М.Г.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007 г. – с.317.
2. Материаловедение и технология металлов / под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000 г. – с. 403.
3. **Оськин, В.А.** «Материаловедение. Технология Конструкционных Материалов» / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: КолосС, 2007 г. – с. 394.
4. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / А.А. Аникин, [и др.]. – Саратов: СГАУ, 2007 г. – с. 218.

### *Дополнительная*

1. **Гиин Э.Ч.** Технология литейного производства / Э.Ч. Гиин, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005 г. – с. 267.
2. Технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам / А.А. Аникин, [и др.] Саратов. СГАУ. 2006 г. – с. 25.
3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / под ред. М.М. Федорченко. – М.: Машиностроение. 1985 г. – с. 264.
4. Технология металлов и материаловедение / под. ред. Л.Ф. Усовой. – М.: Металлургия, 1987 г. – с 799.



## Лекция 7

### ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

#### 7.1. Классификация легированных сталей по составу.

Легирующие элементы – это элементы, специально вводимые в сталь с целью изменения ее строения и свойств.

В зависимости от ЛЭ стали классифицируются на никелевые, хромистые, хромо-никелевые, марганцовистые и т.д.

#### 7.2. Классификация легированных сталей по назначению.

-

Конструкционные ( $C \leq 0,8\%$ )

- Инструментальные ( $C \geq 0,6-0,7\%$ )

- Стали (и сплавы) с особыми свойствами (высоколегированные)

#### 7.3. Маркировка легированных сталей

По качеству легированные стали могут быть только качественными или высококачественными.

Каждый ЛЭ в марке обозначается буквой:

Х – хром ;Г – марганец ;Ф – ванадий ;Б – ниобий;

М – молибден ;С – кремний ;Ю - алюминий ;Р – бор;

К – кобальт ;В – вольфрам ;Т – титан ;Ч - редкоземельные металлы;

Д – медь; Н – никель; Ц – цирконий.

Первые цифры в обозначении марки показывают содержание углерода:

одна цифра – десятые доли

две цифры – сотые доли процентов углерода. Например, 30ХГС – 0,30% углерода; 9ХС – 0,9% углерода.

Цифры, идущие после буквы, указывают на примерное содержание данного легирующего элемента в процентах. Например, 12Г2 – 0,12%С, 2% Мп; 1Х18Н9Т – 0,1%С; 18% Cr; 9% Ni; Ti < 1%.

Если за буквой цифра не стоит, то этого легирующего элемента 1% или менее. В инструментальных сталях, имеющих углерода 1% и более, впереди марки цифра опускается. Например, Х6Ф4М содержит 1,7-1,85%С. В некоторых случаях содержание углерода указывается, например, сталь 110Г13 содержит 1,1%С.

Высококачественные стали обозначаются буквой «А», помещенной в конце марки, например, 12ХНЗА. Особовысококачественная сталь, полученная электрошлаковым переплавом, обозначается буквой «Ш», стоящей за буквой «А», например, 30ХГСА-Ш.

Маркировка сталей, принятая в России, наглядна, удобна и значительно превосходит в этом отношении принятую в других странах (США, Англия и др.).

#### 7.4. Конструкционные легированные стали.

Добавка легирующих элементов в конструкционные стали приводит к повышению прокаливаемости, дает возможность закаливать в масле и даже на воздухе, что

позволяет подвергать термической обработке детали крупных сечений и сложной конфигурации, получая по всему сечению нужную структуру. Наиболее дешевыми элементами, повышающими прокаливаемость, являются Cr, Mn, V, более дорогие – Ni и Mo.

В то же время легирующие элементы повышают порог хладноломкости (только никель его снижает), поэтому надо брать минимальную концентрацию легирующих элементов, обеспечивающих прокаливаемость данного сечения. Кроме того, высоколегированные стали обладают плохой обрабатываемостью резанием, давлением, низкой свариваемостью.

Никель дорогой и дефицитный, поэтому его добавляют только в те стали, которые идут для изготовления деталей, испытывающих значительные ударные и знакопеременные нагрузки; 2-4% Ni обеспечивают глубокую прокаливаемость.

Небольшие количества сильных карбидообразующих элементов (V, Ti, Nb, Zr) измельчают зерно, что положительно влияет на вязкость, прокаливаемость эти элементы уменьшают.

Легирование Mo, устраняет отпускную хрупкость II рода, что важно для крупных деталей, которым невозможно обеспечить быстрое охлаждение с температуры высокого отпуска (способствующее подавлению обратимой хрупкости).

Легирующие элементы упрочняют сталь, растворяясь в феррите и увеличивая дисперсность карбидных частиц.

Легирующие элементы задерживают отпуск стали, т.е. легированная закаленная сталь до более высоких температур нагрева сохраняет прочность, твердость и износостойкость. Особенно интенсивно влияют в этом направлении W, Mo, Cr, Si. Кремний очень полезен в деталях, которые должны обладать высоким пределом упругости, и часто подвергаются изотермической закалке на нижний бейнит. Кремний вытесняет углерод из  $Fe_{\alpha}$  и растворяется в нем; при этом возрастает количество высокоуглеродистого остаточного аустенита, что придает бейниту вязкость и повышает предел усталости пружин, рессор и других упругих элементов машин.

## **7.5. Конструкционные легированные стали**

Подразделяются на три группы:

1. Строительные;
2. Стали для холодной штамповки;
3. Машиностроительные.

### **7.5.1. Строительные низколегированные стали.**

Из строительных сталей изготавливают сварные конструкции перекрытий и покрытий, пролетные строения и опоры, колонны, стойки, опорные плиты, мосты для автотранспорта, резервуары больших объемов, магистральные газопроводные трубы и т.д.

Требования к строительным сталям: сочетание прочности, вязкости, надежности с хорошими технологическими свойствами: хорошей свариваемостью, обрабатываемостью резанием и давлением. В связи с этим строительные стали имеют пониженное содержание углерода (не более 0,22%). Исключение составляют арматурные стали (для железобетонных конструкций) и стали клепанных конструкций, содержащие до 0,37% C.

Легируют эти стали дешевыми легирующими элементами в небольших количествах. Это позволяет упрочнять их термообработкой (нормализация, закалка + отпуск). Применение в строительстве термически обработанных профилей и листов из низколегированной стали позволяет экономить от 15 до 50% металла.

Для сварных конструкций применяют стали, легированные Mn и Si; эти элементы оказывают, кроме упрочняющего, еще и раскисляющее воздействие при сварке (09Г2С, 10Г2С1). Легируют стали, добавляя также в малых количествах Cu, Ni, V, Cr (15ХСНД, 15Х2СФ).

Освоены стали 14Г2АФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ, т.е. марганцовистые стали, легированные 0,07-0,15% V и 0,015-0,025 N. При взаимодействии ванадия с азотом образуется карбонитрид ванадия – дисперсные твердые частицы, делающие сталь мелкозернистой и прочной за счет дисперсионного твердения. Эти стали после нормализации имеют  $\sigma_B$  до 600 МПа,  $\sigma_{0,2}$  до 450 МПа,  $\delta=20\%$ , КСЧ (при  $-40^\circ\text{C}$ )=0,4 МДж/м<sup>2</sup>.

### 7.5.2. Стали для холодной штамповки

В автотракторной и многих других отраслях промышленности для изготовления деталей широко применяют холодную штамповку из листовой стали.

Углерод, а также кремний и марганец делают сталь более упругой, снижают штампуемость. Поэтому для штамповки чаще используют стали с 0,05-0,08% С, а для изделий повышенной прочности – до 0,16% С.

Часто используются кипящие стали (с минимальными добавками раскислителей Si и Mn). Например, 05 кп; 08 кп; 08 Фкп. Особенностью малоуглеродистых сталей является старение феррита, когда на его границах скапливаются примеси внедрения (атомы с малым атомным размером - N, C, H), что приводит к снижению вязкости и пластичности изделий (межкристаллитное разрушение). Для предотвращения старения феррита стали микролегируют алюминием и ванадием. Стали 08Ю и 08Фкп – нестареющие.

### 7.5.3. Машиностроительные стали

подразделяются на 3 группы:

- цементуемые малоуглеродистые (С до 0,3%)
- улучшаемые (среднеуглеродистые, С от 0,3 до 0,55%)
- пружинные (с повышенным содержанием углерода от 0,55 до 0,85%)

С добавлением легирующих элементов содержание углерода может быть сдвинуто к меньшим значениям.

Цементуемые (нитроцементуемые) легированные стали.

Цементацию (нитроцементацию) широко применяют для упрочнения среднеразмерных зубчатых колес, валов коробки передач автомобилей, валов быстроходных станков, шпинделей и многих др. деталей.

Применяются стали, содержащие 0,10-0,25% С и N. Для получения наследственной мелкозернистости, чтобы не росло зерно при высоких температурах и длительных выдержках в процессе насыщения С и N, сталь микролегируют V, Ti, Nb, Zr и Al. Образуются дисперсные карбиды, нитриды или карбонитриды, препятствующие росту зерна.

Степень легированности другими элементами (Cr, Mn, Ni, Mo) определяется теми нагрузками, которые должна выдерживать деталь в процессе эксплуатации. Легированные стали подбирают так, чтобы они имели сквозную прокаливаемость, и полученный мартенсит в сердцевине будет тем прочнее, чем больше в нем легирующих элементов. Поэтому цементуемые стали подразделяются на 3 группы:

- 1) С неупрочняемой сердцевиной (нелегированные)
- 2) Со слабоупрочняемой сердцевиной (малолегированные)
- 3) С сильно упрочняемой сердцевиной (высоколегированные).

Хромистые стали 15Х, 20Х предназначаются для изготовления небольших изделий простой формы. В сердцевине при закалке получается бейнит, поэтому по сравнению с нелегированными сталями хромистые стали более прочные.

Для крупных деталей ответственного назначения, испытывающих при эксплуатации значительные динамические нагрузки, применяют хромоникелевые стали, иногда с добавками молибдена или вольфрама (12ХН3А, 20Х2Н4А, 18Х2Н4МА, 18Х2Н4ВА). Они малочувствительны к перегреву при цементации, имеют очень высокую прокаливаемость, что позволяет использовать при закалке охлаждающую среду масло и даже воздух. Например, сталь 18Х2Н4МА закаливается на воздухе сечением 150-200 мм, при этом в сердцевине получается структура малоуглеродистого легированного мартенсита или нижнего бейнита, что приводит к значительному упрочнению при высокой вязкости и низком пороге хладноломкости ( $-80^{\circ}\text{C}$ ). Недостаток этих сталей – большое количество остаточного аустенита в поверхностном цементованном слое, который снижает твердость и прочность. Устраняется аустенит обработкой холодом (до  $-120^{\circ}\text{C}$ ) или сложной термической обработкой. К недостаткам этих сталей можно отнести и плохую обрабатываемость резанием.

Для замены дорогого и дефицитного никеля используется марганец, поэтому хромомарганцевые стали используются вместо хромоникелевых. Для уменьшения склонности к перегреву их легируют титаном. В автомобильной и тракторной промышленности, в станкостроении применяют стали 18ХГТ и 25ХГТ. Эти стали при цементации подвержены «внутреннему окислению», т.к. Cr и Mn (а также Si) более активно соединяются с кислородом, чем железо, и при цементации в сталь может диффундировать не только углерод, но и кислород. Окисление легирующих элементов приводит к тому, что при закалке в цементованном слое образуются трооститная сетка и оксиды, что понижает твердость и прочность стали. Поэтому для ответственных случаев применяется сталь 25ХГМ, а также стали, дополнительно легированные Ni. Например, на ВАЗе широко применяют стали 20ХГНМ, 19ХГН, 14ХГН.

Новые стали для цементации: 25ХГНМТ, 25ХГНМАЮ, 20ХГН2МБФ имеют высокие показатели прочности и выносливости.

Легирование бором (0,001-0,005%) увеличивает прокаливаемость и прочность стали, поэтому для не очень ответственных деталей (износ при трении) используются марки 20ХГР, 20ХГНР кА более дешевые.

## **7.6. Улучшаемые легированные стали**

Многие ответственные детали машин (коленчатые валы, оси, штоки, шатуны, детали турбин и т.д.) изготавливают из среднеуглеродистых (0,3-0,5%) сталей и подвергают улучшению (закалка плюс высокий отпуск на сорбит отпуска). При полной прокаливаемости эти стали после термического улучшения имеют достаточно высокий

предел текучести, низкий порог хладноломкости, высокую трещиностойкость и ударную вязкость.

Хромистые стали 30Х, 40Х, 50Х применяют для средненагруженных деталей. Их недостатком является невысокая прокаливаемость и склонность к отпускной хрупкости. Лучшие свойства имеют стали 40ХФА (повышенная вязкость, т.к. мельче зерно и более чистая сталь), 35ХР (40ХР) – повышенная прокаливаемость.

Хромомарганцевые стали (40ХГ) обладают лучшей прокаливаемостью, для уменьшения склонности к перегреву (марганец способствует росту зерна) легируют Т.

Стали хромансил (30ХГС) обладают высокой прочностью и хорошей свариваемостью (20ХГС, 25ХГС). Для повышения прокаливаемости добавляют Ni (1,4-1,8%). Высокопрочные и вязкие стали 30ХГСНА и 30ХГСНМА широко применяют для ответственных деталей, в том числе сварных.

Для изготовления крупных деталей сложной конфигурации с повышенной прочностью и вязкостью применяют хромоникелевые стали, содержащие не более 3% Ni, т.к. никель вызывает появление большого количества остаточного аустенита (40ХН, 45ХН, 50ХН). Добавка Mo (40ХН2МА) или вольфрама устраняет отпускную хрупкость II рода. Дополнительное легирование V способствует мелкозернистости (38ХЗМФ, 36Х2Н2МФА). Недостатком высоколегированных сталей является трудность обработки резанием и большая склонность к образованию флокенов. Эти стали применяют для изготовления крупных ответственных деталей (поковки, валов, цельнокованные роторы турбин, валы турбовоздуходувных машин и т.д.).

### **7.7. Рессорно-пружинные стали**

Стали для упругих элементов машин должны обладать высоким пределом упругости ( $\sigma_{0,2}$ ) и усталости ( $\sigma_{-1}$ ). Для получения упругости сталь должна содержать не менее 0,5% С и структуру троостита отпуска с твердостью 42-48 НR С; при более высокой твердости предел усталости снижается.

Для пружин малого сечения с невысокими нагрузками применяют углеродистые стали 65, 70, 75, 85.

Кремнистые стали 55С2, 60С2А, 70С3А применяют для изготовления пружин вагонов, многих автомобильных рессор, для торсионных валов и др. Кремний повышает прокаливаемость, задерживает падение твердости при отпуске (можно проводить отпуск при более высокой температуре, что приводит к повышению пластичности и вязкости), упрочняет феррит, поэтому кремнистые стали имеют высокие пределы упругости и текучести.

Дополнительное легирование кремнистых сталей Cr, Mn, W, Ni увеличивает их прокаливаемость, уменьшает склонность к обезуглероживанию и графитизации. Стали 60С2ХФА и 65С2ВА применяют для изготовления крупных высоконагруженных пружин и рессор, а если упругие элементы работают в условиях сильных динамических нагрузок, применяют сталь с никелем 60С2Н2А.

Для клапанных пружин рекомендуется сталь 50ХФА, но она имеет малую прокаливаемость и применяется для пружин диаметром не более 5-6 мм. Для увеличения прокаливаемости сталь легируют марганцем (50ХГФА).

Для автомобильных рессор применяют сталь 50ХГА.

Сильно снижается долговечность пружин, рессор, если поверхность обезуглерожена или на поверхности имеются дефекты (царапины, риски, неметаллические включения), которые являются зародышами усталостных трещин при знакопеременной нагрузке.

Срок службы рессор повышается за счет поверхностного наклепа (дробеструйная обработка, обкатка роликами и т.д.), при этом заклепываются риски и царапины в поверхностных слоях образуются очень полезные остаточные напряжения сжатия, понижающие рабочие напряжения растяжения в наружных волокнах. После дробеструйной обработки срок службы рессоры (пружины) повышается в 1,5-2 раза.

Кроме перечисленных, существуют пружинные стали со специальными свойствами (нержавеющие, жаропрочные и т.д.).

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Как маркируются легированные стали, свойства, применение ?
2. Расскажите о сталях для режущего инструмента Приведите марки сталей.
3. Пружинно-рессорные стали (свойства, применение, маркировка)
4. Цементируемые стали (свойства, применение, маркировка).
5. Улучшаемые стали (свойства, применение, маркировка).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

#### *Основная*

1. **Дегтярев, М.Г.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007 г. – с.317.
2. Материаловедение и технология металлов / под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000 г. – с. 403.
3. **Оськин, В.А.** «Материаловедение. Технология Конструкционных Материалов» / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: КолосС, 2007 г. – с. 394.
4. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / А.А. Аникин, [и др.]. – Саратов: СГАУ, 2007 г. – с. 218.

#### *Дополнительная*

1. **Гиин Э.Ч.** Технология литейного производства / Э.Ч. Гиин, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005 г. – с. 267.
2. Технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам / А.А. Аникин, [и др.] Саратов. СГАУ. 2006 г. – с. 25.
3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / под ред. М.М. Федорченко. – М.: Машиностроение. 1985 г. – с. 264.
4. Технология металлов и материаловедение / под. ред. Л.Ф. Усовой. – М.: Металлургия, 1987 г. – с 799.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дегтярев, М.Г.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007 г. – с.317.
2. **Фетисова, Г.П.** Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисова. - М.: Высшая школа, 2000 г. – с. 510.
3. **Оськин, В.А.** Материаловедение. Технология Конструкционных Материалов / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: КолосС, 2007 г. – с. 394.
4. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / А.А. Аникин, [и др.]. – Саратов: СГАУ, 2007 г. – с. 218.
5. **Гини Э.Ч.** Технология литейного производства / Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005 г. – с. 267.
6. Технология конструкционных материалов : методические указания к лабораторным работам / А.А. Аникин, [и др.] Саратов. СГАУ. 2006 г. – с. 25.
7. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / под ред. М.М. Федорченко. – М.: Машиностроение. 1985 г. – с. 264.
8. Технология металлов и материаловедение / под. ред. Л.Ф. Усовой. – М.: Металлургия, 1987 г. – с 799.
9. **Дальский, А.И.** Технология конструкционных материалов / **А.И. Дальский.** - М.: Машиностроение, 1985г. – с. 367.
10. **Явойский, В.И** Металлургия стали / В.И Явойский. – Металлургия, 1983г.- с. 254.
11. **Титов Н.Д.** Технология литейного производства / Н.Д Титов, Ю.А.Степанов. – М., Машиностроение, 1985г.- с. 458.
12. **Соколов, И.И.** Газовая сварка и резка металлов / И.И Соколов. - М., Высшая школа, 1986г. – с. 335.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>Лекция 1. Строение и свойства металлов</b> .....	4
1.1. Классификация металлов .....	4
1.2. Кристаллическое строение металлов .....	4
1.3. Свойства материалов и способы их измерения .....	6
Вопросы для самоконтроля .....	7
Список литературы .....	7
<b>Лекция 2 Диаграмма Fe – Fe<sub>3</sub>C</b> .....	9
2.1. Аллотропия железа .....	9
2.2. Фазы в железо-углеродистых сплавах .....	10
2.3. Классификация и маркировка углеродистых (нелегированных) сталей .....	12
Вопросы для самоконтроля .....	13
Список литературы .....	14
<b>Лекция 3. Основы теории термической обработки</b> .....	15
3.1. Критические точки в стали .....	15
3.2. Превращения в стали при нагреве .....	15
3.3. Измельчение и рост аустенитного зерна при нагреве .....	15
3.4. Превращения в стали при охлаждении .....	16
3.5. Мартенситное превращение .....	17
Вопросы для самоконтроля .....	18
Список литературы .....	18
<b>Лекция 4 Практика термической обработки</b> .....	19
4.1. Отжиг .....	19
4.2. Отжиг I рода .....	19
4.3. Диффузионный отжиг .....	19
4.4. Рекристаллизационный отжиг .....	19
4.5. Отжиг II-го рода .....	20
4.6. Полный отжиг .....	20
4.7. Неполный отжиг .....	20
4.8. Изотермический отжиг .....	20
4.9. Закалка .....	21
4.10. Выбор температуры закалки .....	21
4.11. Отпуск .....	21
4.12. Нормализация .....	21
Вопросы для самоконтроля .....	22
Список литературы .....	22
<b>Лекция 5 Поверхностное упрочнение стали</b> .....	23
5.1. Поверхностная закалка .....	23
5.2. Закалка ТВЧ .....	23
5.3. Закалка с газопламенным нагревом .....	24
5.4. Поверхностный наклеп .....	24
Вопросы для самоконтроля .....	25
Список литературы .....	26
<b>Лекция 6 Химико-термическая обработка сталей. Виды диффузионной металлизации</b> .....	27
6.1. Химико-термическая обработка .....	27



6.2. Цементация стали .....	27
6.2.1. Твердая цементация .....	28
6.2.2. Газовая цементация .....	28
6.2.3. Термическая обработка цементированной стали .....	29
6.3. Азотирование .....	30
6.3.1. Технология процесса азотирования .....	30
6.3.2. Азотирование в тлеющем разряде .....	30
6.4. Цианирование (нитроцементация) .....	30
6.5. Диффузионная металлизация и диффузионное насыщение другими элементами	31
6.6. Алитирование.....	31
6.7. Диффузионное хромирование .....	32
6.8. Силицирование .....	32
6.9. Борирование .....	32
Вопросы для самоконтроля .....	32
Список литературы .....	33
<b>Лекция 7 Легированные стали</b> .....	34
7.1. Классификация легированных сталей по составу. ....	34
7.2. Классификация легированных сталей по назначению. ....	34
7.3. Маркировка легированных сталей .....	34
7.4. Конструкционные легированные стали. ....	34
7.5. Конструкционные легированные стали.....	35
7.5.1. Строительные низколегированные стали. ....	35
7.5.2. Стали для холодной штамповки. ....	36
7.5.3. Машиностроительные стали .....	36
7.6. Улучшаемые легированные стали. ....	37
7.7. Рессорно-пружинные стали .....	38
Вопросы для самоконтроля .....	39
Список литературы .....	39
<b>Библиографический список</b> .....	40
<b>Содержание</b> .....	41