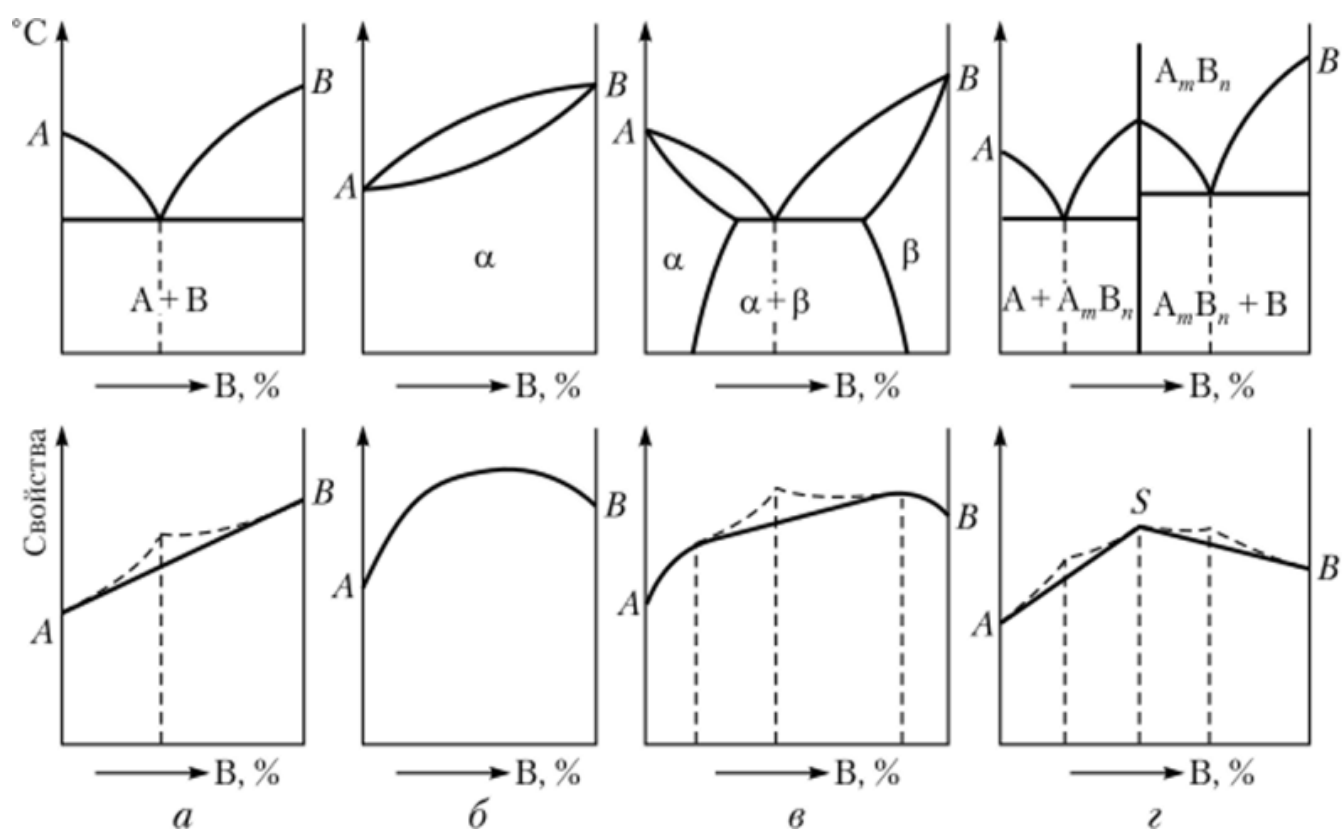


Д.Б. Рахимова, С.В. Елифанова

## ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



Костанай, 2022



Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Костанайский региональный университет им. А.Байтурсынова  
Кафедра машиностроения

Д.Б. Рахимова, С.В. Епифанова

**ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебно-методическое пособие

Костанай, 2022

**УДК 669-1 (075.8)**

**ББК 34.1 я73**

**Р 27**

**Составитель:**

Рахимова Динара Булатовна, старший преподаватель кафедры машиностроения инженерно-технического института имени А. Айтмухамбетова КРУ им. А. Байтурсынова

Епифанова Светлана Викторовна, старший преподаватель кафедры машиностроения инженерно-технического института имени А. Айтмухамбетова КРУ имени А. Байтурсынова

**Рецензенты:**

Шаяхметов Амангельды Булатович – к.т.н., ассоциированный профессор, проректор по науке и инновациям Костанайского инженерно-экономического университета имени М. Дулатова.

Рыспаев Куаныш Сабыржанович – доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры машиностроения, инженерно-технического института имени А. Айтмухамбетова КРУ им. А. Байтурсынова;

Салыков Булат Рахимжанович – к.т.н., заведующий кафедрой машин, тракторов и автомобилей, инженерно-технического института имени А. Айтмухамбетова КРУ им. А. Байтурсынова.

Рахимова Д.Б., Епифанова С. В.

**Р27** Технология конструкционных материалов. Учебно-методическое пособие. – Костанай: КРУ им. А. Байтурсынова, 2022.- 109 с.

ISBN 978-601-356-152-3

Учебно-методическое пособие предусматривают изучение основ производства, технологических свойств, фазовых превращений чугуна, стали, цветных металлов и сплавов, широко применяемых в машиностроении, основных способов горячей обработки металлов, ознакомление со свойствами материалов и применением их в различных отраслях машиностроительного производства.

Учебно-методическое пособие предназначены для студентов ВУЗа, изучающих дисциплину «Технология конструкционных материалов».

**ББК 34.1 я73**

**Р 27**

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского регионального университета имени А. Байтурсынова, 29.04.2022 г. протокол № 3

ISBN 978-601-356-152-3

## Содержание

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Введение.....</b>                                             | <b>4</b>   |
| <b>Практическая работа №1.</b>                                   |            |
| Изучение диаграммы состояния железо-углерод (стали).....         | 5          |
| <b>Практическая работа №2.</b>                                   |            |
| Изучение области чугунов диаграммы состояния железо-углерод..... | 13         |
| <b>Практическая работа №3.</b>                                   | 17         |
| Сплавы на основе двойных систем.....                             |            |
| <b>Практическая работа №4.</b>                                   | 29         |
| Изотермическое превращение аустенита.....                        |            |
| <b>Практическая работа №5.</b>                                   | 36         |
| Отжиг и нормализация.....                                        |            |
| <b>Практическая работа №6.</b>                                   | 46         |
| Закалка.....                                                     |            |
| <b>Практическая работа №7.</b>                                   | 56         |
| Отпуск закаленной стали.....                                     |            |
| <b>Практическая работа №8.</b>                                   | 68         |
| Химико-термическая обработка деталей.....                        |            |
| <b>Практическая работа №9.</b>                                   | 77         |
| Маркировка углеродистых и легированных сталей.....               |            |
| <b>Практическая работа №10.</b>                                  | 87         |
| Микроскопическое исследование структуры медных сплавов.....      |            |
| <b>Практическая работа №11.</b>                                  | 97         |
| Микроскопическое исследование структуры алюминиевых сплавов..... |            |
| <b>Заключение.....</b>                                           | <b>108</b> |
| <b>Список использованных источников.....</b>                     | <b>109</b> |

## **Введение**

Данное учебно-методическое пособие составлено в соответствии с рабочей учебной программой дисциплины «Технология конструкционных материалов» для студентов специальностей 6В07103-Технологические машины и оборудование, 6В07105-Машиностроение.

Дисциплина «Технология конструкционных материалов» является базовой дисциплиной вузовского компонента, которая дает основные понятия о строении металлов, способах термообработки, структурных составляющих и фазовых состояний сплавов.

Программа состоит из трех модулей: «Теоретические основы конструкционных материалов», «Термообработка и другие виды тепловой обработки» и «Промышленная маркировка материалов».

При изучении дисциплины особое внимание уделяется раскрытию физико-химической стороны технологических процессов, взаимосвязей между составом, структурой и свойствами материалов, их изменениям в процессе эксплуатации и мероприятиям по предотвращению ухудшения свойств материалов.

В разделе «Теоретические основы конструкционных материалов» изучаются диаграммы состояния сплавов, фазовые превращения, структурные составляющие и температурные изменения.

В разделе «Промышленная маркировка материалов». Особое внимание уделяется классификации и маркировке материалов по ГОСТам, а также их назначению, приводятся примеры, где и для каких целей используются подобные материалы и как изменяются их свойства в процессе эксплуатации.

В связи с тем, что дисциплина «Технология конструкционных материалов» является теоретической дисциплиной, рекомендуется самостоятельная подготовка обучающихся перед практическими занятиями, готовить конспект, а перед сдачей работы проработать контрольные вопросы.

Выбор варианта практической работы производится в соответствии со списком в электронном журнале преподавателя, представленного в «Платонусе».

## Практическая работа №1

### Тема: Изучение диаграммы состояния железо-углерод (стали)

**Цель занятия:** Научиться пользоваться диаграммой состояния железо-углерод при определении фазового состава, концентрации фаз, критических температур сталей. Изучить первичные и вторичные превращения сталей. Научиться определять структурные составляющие сталей, с различным содержанием углерода в них и знать их свойства.

#### 1.1 Теоретические основы.

Рассмотрим диаграмму состояния железо-цемент (рис. 1).

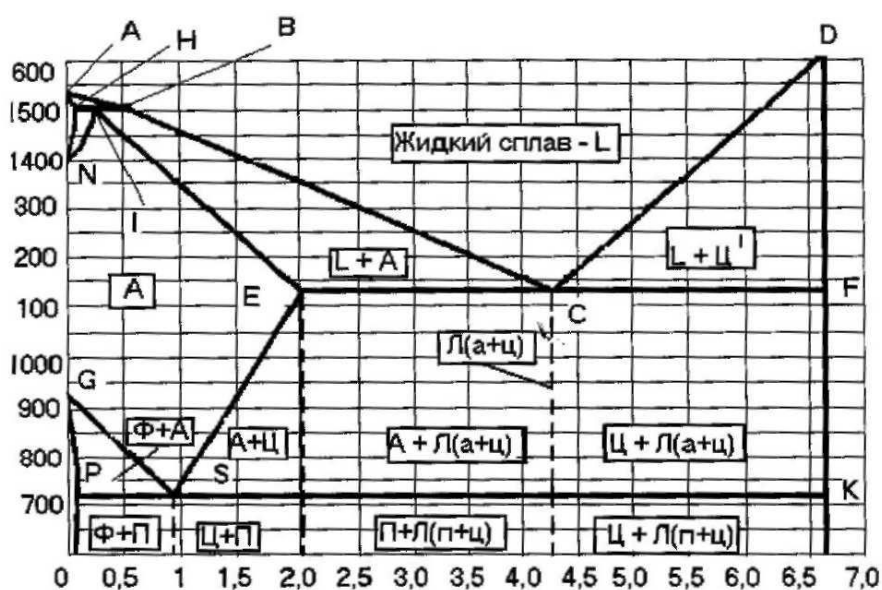


Рисунок 1 - Диаграмма железо - углерод

Линия ABCD - линия ликвидус. Линия AHIECF - солидус

Три горизонтальные линии на диаграмме (HIB, ECF, PSK) указывают на протекание трех невариантных реакций (происходящих при постоянной температуре). Остановимся подробнее на этих превращениях.

**Перитектическое превращение.** При температуре 1485°C (линия HB) протекает перитектическая реакция



Реакция эта имеет место только у сплавов, содержащих углерода от 0,1 до 0,5%. В результате реакции образуется аустенит с содержанием углерода 0,15%.

По линии АВ из жидкого раствора железа с углеродом кристаллизуется высокотемпературный феррит ( $\alpha$ -железо, которое благодаря высокой температуре может растворить до 0,1% углерода). Далее с понижением температуры кристаллизация заканчивается для четырех характерных сплавов по разному:

1. Сплав, содержащий до 0,1% углерода - по линии АН заканчивается процесс кристаллизации феррита и ниже линии АН существует одна кристаллическая фаза - феррит. По линии НН железо претерпевает аллотропическое превращение ОЦК в ГЦК (с понижением температуры способность ОЦК-решетки железа растворять углерод снижается и излишек углерода растворяется во вновь появившихся кристаллах аустенита), ниже линии IN феррит окончательно исчезает, уступая место аустениту.

2. Сплав, содержащий 0,15% углерода - поскольку из жидкости выпадают кристаллы феррита с предельной концентрацией углерода 0,1%, то в жидкости накапливается углерод и в точке I концентрация его в жидкости достигает 0,5% (концентрация точки В). Это происходит при температуре 1485°C. Такая жидкость кристаллизуется в виде аустенита с одновременным распадом феррита и превращением его в аустенит.

Одновременно концентрация углерода выравнивается по всему аустениту (0,15%). Степень свободы процесса:

$$C = k - f + 1 = 2 - 3 + 1 = 0 \quad (2)$$

а значит, реакция происходит при постоянной температуре.

3. Сплав с содержанием углерода от 0,1% до 0,15% - по линии Н I выпавший из жидкости ранее феррит остается без изменения, а жидкость (по мере выпадения кристаллов феррита в ней концентрация углерода повышалась) с концентрацией углерода 0,15% кристаллизуется в виде аустенита. Далее в области HIN идет постепенная перестройка решетки железа, и ниже линии HN остается аустенит.

4. Сплав с содержанием углерода от 0,15% до 0,5% - находящаяся в избытке жидкость в процессе перитектического превращения не вся кристаллизуется при температуре 1485°C, а окончательно превращается в аустенит по линии IE.

Следует отметить, что в любом случае в процессе перитектического превращения получается аустенит с содержанием углерода 0,15%.

Данное превращение не имеет какого-то практического значения и поэтому часто точки А, I, Н, N, В заменяются одной точкой А, т.е. диаграмма упрощается.

**Эвтектическое превращение.** По линии ЕСF, при температуре 1130°C происходит эвтектическое превращение. Чисто эвтектическое превращение происходит в сплавах, содержащих 4,3% углерода по формуле





где аустенито - цементитная смесь называется эвтектикой или ледебуритом, причем аустенит имеет предельную углерода 2%.

Степень свободы процесса:

$$C = 2 - 3 + 1 = 0 \quad (4)$$

где количество фаз равно трем: жидкость, аустенит и цементит.

$C = 0$  означает то, что процесс идет при постоянной температуре.

В сплавах с содержанием углерода от 2% до 4,3% в избытке над эвтектикой является железо и поэтому по линии ВС в первую очередь из жидкости выпадает богатая железом фракция - аустенит (2% углерода), а в жидкости по мере охлаждения накапливается углерод и когда в жидкости содержание углерода достигает 4,3%, эта жидкость (при температуре 1130°C) кристаллизуется в виде ледебурита. Ниже линии ЕС существуют две фазы - аустенит и ледебурит аустенитного происхождения.

В сплавах с содержанием углерода от 4,3% до 6,67% в избытке над эвтектикой является углерод и поэтому в результате первичной кристаллизации, по линии CD из жидкости выпадает цементит (богатая углеродом фракция). По мере выпадения цементита оставшаяся жидкость обедняется углеродом и при достижении концентрации 4,3% она кристаллизуется в виде ледебурита. В результате ниже линии CF существуют две фазы - цементит и ледебурит аустенитного происхождения.

Из рассмотренных процессов первичной кристаллизации можно сделать вывод о том, что у всех сплавов, содержащих углерода менее 2% получается структура аустенита, а у сплавов, содержащих более 2% углерода в структуре, присутствует ледебурит. Присутствие ледебурита в структуре придает сплавам характерные свойства и на этом основании все железоуглеродистые сплавы делятся на две большие группы: стали (до 2% углерода) и чугуны (более 2% углерода).

**Эвтектоидное превращение.** При охлаждении сплавов по линии PSK (при температуре 723°C) происходит аллотропическое превращение железа из ГЦК в ОЦК модификацию с соответствующим перераспределением углерода.

Чисто эвтектоидное превращение характерно для сплава с содержанием углерода 0,8% (точка S). Рассмотрим превращения в сплаве с содержанием углерода 0,8%.

Точка S (723°C) показывает минимальную температуру равновесного существования аустенита. При некотором переохлаждении ниже линии PSK аустенит оказывается в неустойчивом состоянии и его кристаллическая решетка начинает распадаться. Возникающие в аустенитном зерне зародыши феррита не могут растворить в своей решетке весь содержащийся в аустените углерод и поэтому при постройке своей кристаллической решетки (ОЦК), они оттесняют углерод на край кристаллического зерна.

Поскольку процесс вытеснения углерода связан с затратами энергии, то кристаллическая решетка надстраивается в первую очередь по острым краям (по

линии наименьшего сопротивления) и кристалл приобретает форму пластины. Оттесняемый на край пластины феррита углерод, накапливает там свою концентрацию и по достижении концентрации 6,67% образует соединение с железом - цементит. Таким образом, в процессе распада аустенитного зерна образуется мелкодисперсная смесь пластин феррита и цементита (рис. 2). Степень свободы эвтектоидного процесса:

$$C = k - f + l = 0 \quad (5)$$

где  $k=2$ ,  $f=3 - (A + \Pi_{(\phi + \psi)})$  а значит процесс также невариантный. Такая сталь называется эвтектоидной.

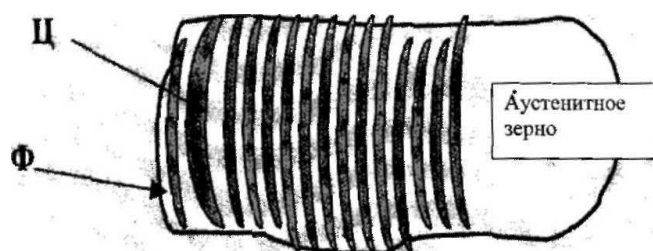


Рисунок 2 - Схема образования перлитного зерна

Сплав с концентрацией углерода от 0,02% до 0,8% имеет концентрацию углерода меньшую, чем в эвтектоидном, поэтому превращение аустенита начинается по линии GS с выделения богатой железом фракции - феррита (до 0,02% углерода). При этом зародыши феррита имеют возможность расти равноосно, т.к. им не мешает углерод, который имеется в небольших количествах и весь растворяется в аустените, а температура еще довольно высокая, что определяет интенсивное движение атомов. На микрошлифе ферритные кристаллы смотрятся как крупные равноосные пятна (рис 3).

В оставшемся аустените по мере роста кристаллов феррита концентрация углерода накапливается и когда достигает 0,8%, начинается эвтектоидная реакция с образованием перлита. В результате ниже линии PS существует структура феррит + перлит. Такая сталь называется доэвтектоидной.

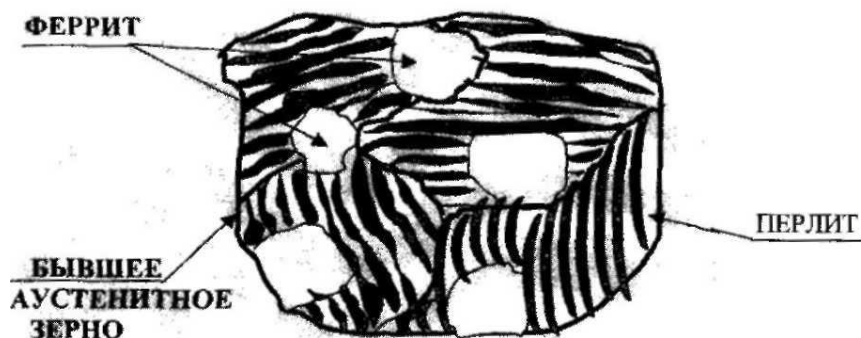


Рисунок 3 - Схема микроструктуры доэвтектоидной стали

Сплав с содержанием углерода от 0,8% до 2% имеет концентрацию углерода большую, чем в эвтектоидном и поэтому со снижением температуры от линии SE распад аустенита начинается с выделения из его кристаллической решетки лишнего углерода (2% углерода в аустените может содержаться только при температуре 1130°C). Поскольку температура сплава еще высокая, атомы двигаются интенсивно, образуются области сгущения углерода и он обособляется в виде цементита. Внешние условия позволяют цементиту расти равноосно, поэтому зерна цементита имеют довольно крупные размеры и на микроструктуре смотрятся как крупные темные пятна.

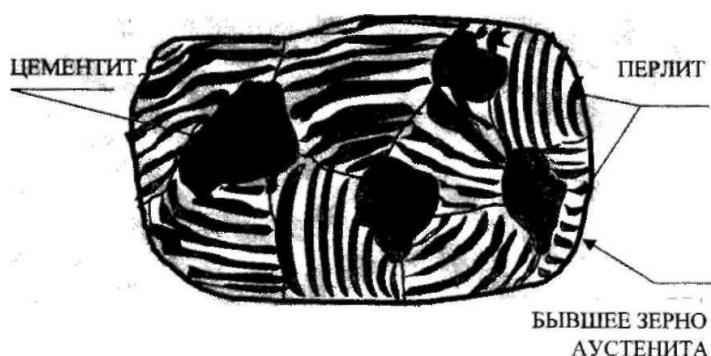


Рисунок 4 - Схема микроструктуры заэвтектоидной стали

В связи с процессом обособления углерода в оставшемся аустените снижается концентрация углерода до 0,8%. Когда эта концентрация достигается, оставшийся аустенит превращается в перлит и ниже линии PSK структура стали состоит из цементита и перлита. Выделившийся при перекристаллизации цементит называют вторичным в отличие от цементита первичного, выпадающего непосредственно из жидкости. Стали, имеющие вышеуказанные концентрации углерода называют заэвтектоидными. Стали, имеющие вышеуказанные концентрации углерода называют заэвтектоидными (рис. 4).

## **1.2 Методические указания к построению кривых охлаждения железо-углеродистых сплавов (сталей).**

Для построения кривой охлаждения заданного сплава на стальной части диаграммы железо-углерод необходимо на оси концентрации найти заданную концентрацию углерода и из этой точки восстановить перпендикуляр (область существования заданного сплава во всем диапазоне температур) до жидкой области (примерно 1600°C).

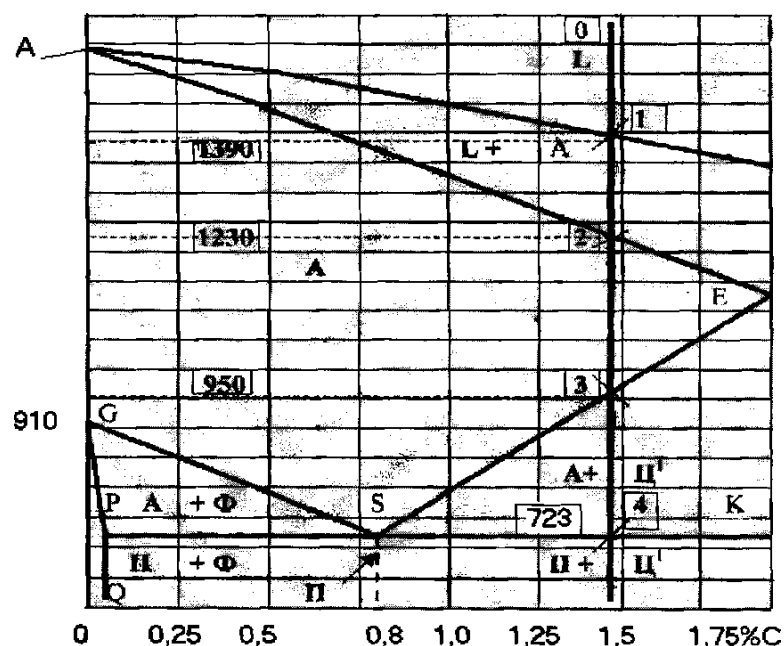


Рисунок 5 - Стальная часть диаграммы железо-углерод

Обозначить точки пересечения перпендикуляра с линиями на диаграмме цифрами (критические точки для заданного сплава), начиная сверху (точка, лежащая в области существования жидкого сплава, обозначается 0). Спроектировать точки пересечения на ось ординат (температур) и определить температуры критических точек. Возьмем для примера сплав с содержанием углерода 1,45% (рис. 5), найдем область его существования на диаграмме (перпендикуляр 0-1-2-3-4), обозначим критические точки цифрами и определим их температуры:

- 1 - 1390°C,
- 2 - 1230°C,
- 3 - 950°C,
- 4 - 723°C.

Температуры критических точек перенесем в координаты «температура-время» в виде пунктирных линий (рис. 6), Правильность построения кривой охлаждения контролируется правилом фаз. Это делается следующим образом: на каждом из участков кривой охлаждения определяется количество фаз (для данной кривой охлаждения количество компонентов равно двум) и определяется степень свободы по формуле:

$$C = k - f + 1 \quad (6)$$

Если на проверяемом участке кривой охлаждения  $C = 0$ , то этот участок будет горизонтальным (процесс невариантный), если степень свободы  $C = 1$ , то процесс охлаждения будет замедленным (угол наклона отрезка к горизонтали равен примерно 30°), если степень свободы  $C = 2$ , то интенсивность охлаждения максимальная (угол наклона отрезка кривой охлаждения равен примерно 60° к горизонтали).

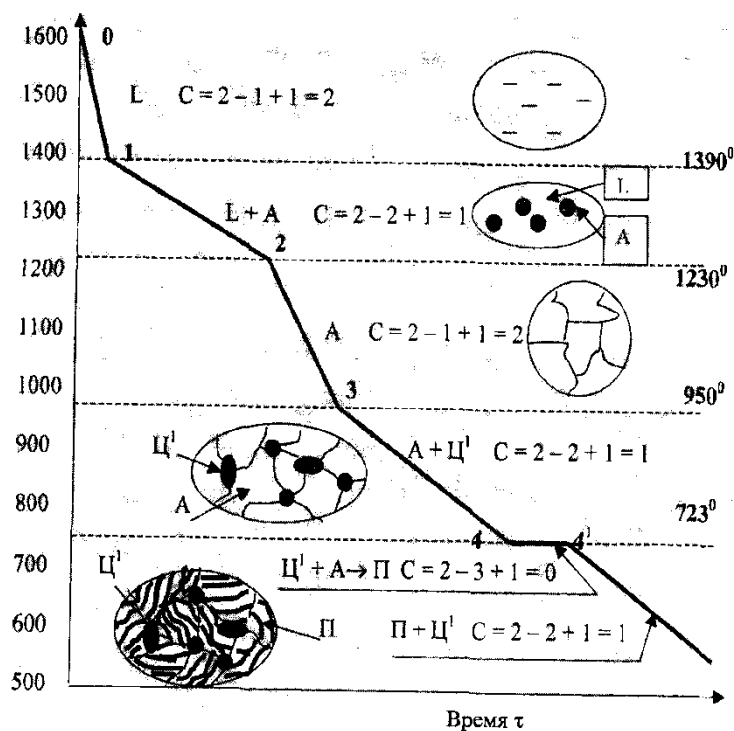


Рисунок 6 - Кривая охлаждения сплава с содержанием углерода 1,45%

На рис. 6 приведен пример построения кривой охлаждения для сплава с содержанием углерода 1,45%. Схема микроструктуры на участке 4-4<sup>1</sup> кривой охлаждения приведена на рис.2.

Заданный сплав это заэвтектоидная высокоуглеродистая сталь. Процесс кристаллизации начинается в точке 1 при температуре 1390°C (точка ликвидус), при этом из жидкости выпадает аустенит. Заканчивается кристаллизация в точке 2 при температуре 1230°C (точка солидус). В температурном диапазоне от 1230°C до 950°C (отрезок 2-3) существует фаза аустенит. При температуре 950°C (точка 3) твердый раствор углерода в  $\gamma$  железе (аустенит) становится пересыщенным (уменьшение температуры приводит к уменьшению параметра кристаллической решетки и, соответственно к уменьшению полостей между атомами) и углерод начинает выделяться из кристаллической решетки железа, а поскольку температура достаточно высокая и тепловое движение атомов достаточно интенсивное, углерод образует с железом химическое соединение цементит, который обособляется на границах аустенитных зерен в виде крупных блоков.

**Описание процесса охлаждения сплава с 1,45% С.** Процесс выделения цементита заканчивается при температуре 723°C (точка 4), в аустените содержание углерода понизилось до 0,8%. Температура точки 4 является для аустенита критической. При небольшом переохлаждении начинается перекристаллизация  $\gamma$  в  $\alpha$  аллотропическую модификацию, сопровождающуюся перераспределением углерода, т.е. происходит невариантная эвтектоидная реакция. В результате на отрезке 4-4<sup>1</sup> такое же содержание углерода. Окончательная фазовая структура представляет собой смесь зерен цементита и перлита. Значительное количество цементита определяет повышенную твердость стали и эта сталь может использоваться в качестве инструментальной.

### 1.3 Задание.

1. Начертить диаграмму состояния сплавов железо-углерод (область сталей).
2. Построить кривую охлаждения для сплава с заданной концентрацией углерода и проверить правильность построения этой кривой правилом фаз.
3. Описать процесс охлаждения заданной стали по кривой охлаждения, изобразить схемы микроструктур на каждом из участков кривой охлаждения.

### 1.4 Варианты задания

Таблица 1 - Варианты задания для индивидуального решения

|                     |     |     |     |      |     |      |     |      |      |      |
|---------------------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|
| Вариант             | 1   | 2   | 3   | 4    | 5   | 6    | 7   | 8    | 9    | 10   |
| Содержание углерода | 0,2 | 1,1 | 0,3 | 1,0  | 0,4 | 1,3  | 0,5 | 1,4  | 0,6  | 1,6  |
| Вариант             | 11  | 12  | 13  | 14   | 15  | 16   | 17  | 18   | 19   | 20   |
| Содержание углерода | 0,7 | 0,8 | 1,8 | 0,45 | 1,9 | 0,25 | 0,9 | 0,35 | 1,15 | 0,95 |

### 1.5 Контрольные вопросы:

1. Основные аллотропические формы железа?
2. Механические свойства фазовых составляющих стали?
3. Что такое аустенит и его свойства?
4. Что такое перлит и его свойства?
5. Предельная растворимость углерода в аустените?
6. Предельная растворимость углерода в феррите?
7. Причины вторичных превращений в стали?
8. Что может происходить в стали при  $C = O$ ?
9. Причина образования феррита при температуре выше  $723^{\circ}C$  в доэвтектоидной стали, хотя аустенит может существовать при этой температуре?
10. Что такое цементит и его свойства?
11. В чем заключается неустойчивость цементита?
12. В каких случаях наблюдается явление перенасыщения аустенита углеродом?

## Практическая работа № 2

### Тема: Изучение области чугунов диаграммы состояния железо-углерод

**Цели работы:** Научиться пользоваться диаграммой железо - углерод при определении фазового состава, концентрации фаз, критических температур железоуглеродистых сплавов. Изучить первичные и вторичные превращения в чугунах. Научиться определять структурные составляющие чугунов.

#### 2.1 Теоретические основы.

Разделение железоуглеродистых сплавов на стали и чугуны определяется диаграммой состояния железо-углерод. Область диаграммы с концентрацией углерода более 2% отличается наличием эвтектического превращения и называется областью чугунов.

Чугун вследствие более низкой температуры плавления обладает лучшими литейными свойствами. Ввиду наличия эвтектики (ледебурита) чугун отличается малой способностью к пластической деформации, нековкостью.

В зависимости от состояния углерода в чугуне различают: Белые чугуны, в которых весь углерод находится в виде цементита. Серые чугуны, в которых углерод находится в виде графита пластинчатой формы (низкопрочные чугуны). Высокопрочные чугуны (модифицированные), в которых углерод находится в виде графита шарообразной формы. Ковкие чугуны, в которых углерод находится в виде хлопьевидного графита.

При остывании жидкого чугуна процесс кристаллизации происходит поразному, в зависимости от концентрации углерода. Эвтектический чугун (углерода 4,3%) кристаллизуется при температуре 1130°C в виде эвтектики (этот процесс описан в предыдущем задании), которая представляет собой смесь аустенита предельной концентрации углерода и цементита.

Доэвтектические сплавы, имеющие в избытке над эвтектикой железо, в первую очередь кристаллизуются в виде богатой железом фракции -аустенита (по линии BC), а заэвтектические сплавы, имеющие в избытке над эвтектикой углерод, в первую очередь кристаллизуются в виде богатой углеродом фракции - цементита (по линии CF). В любом случае жидкий чугун стремится к концу кристаллизации получить концентрацию углерода 4,3%. И в доэвтектическом и в заэвтектическом сплавах оставшаяся жидкость при температуре 1130°C приобретает эвтектический состав и кристаллизуется в виде ледебурита. В результате кристаллизации доэвтектический чугун имеет фазовый состав  $A + L_{(A+C)}$ , эвтектический состоит из аустенитного ледебурита, а заэвтектический чугун состоит из  $C' + L_{(A + C)}$  (Рис. 7).



Рисунок 7 - Схема микроструктуры доэвтектического чугуна

При остывании чугуна от температуры  $1130^{\circ}\text{C}$  с аустенитом происходит то же, что и в заэвтектоидной стали, т.е. происходит обособление излишков углерода (излишки появляются при термической деформации кристаллической решетки аустенита - сжатии) в виде цементита.

Этот процесс идет как в первичном аустенитном зерне, так и аустените ледебурита. При температуре  $723^{\circ}\text{C}$  концентрация углерода в аустените достигает 0,8% и такой аустенит подвергается эвтектоидному превращению. В результате ниже линии PSK доэвтектический чугун имеет структуру: перлит + цементит (вторичный) + ледеburит (перлит + цементит вторичный + цементит первичный). Эвтектический чугун имеет структуру перлитного ледебурита, а заэвтектический чугун имеет структуру: цементит (первичный) + ледеburит (перлит + цементит). Схемы микроструктур этих чугунов приведены на рис. 7, 8, 9.

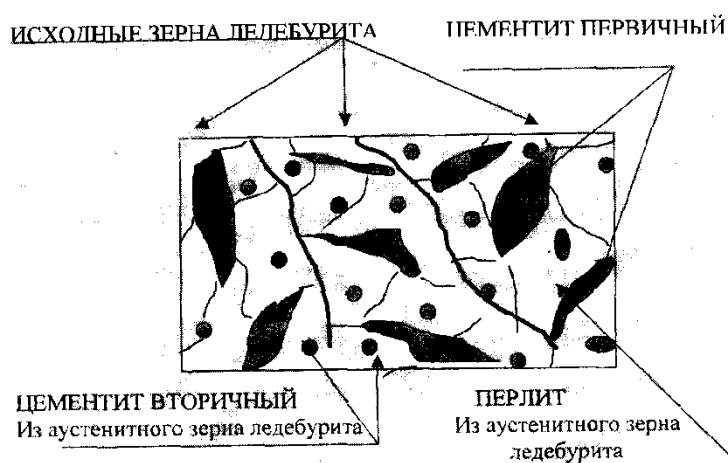


Рисунок 8 - Схема микроструктуры эвтектического чугуна



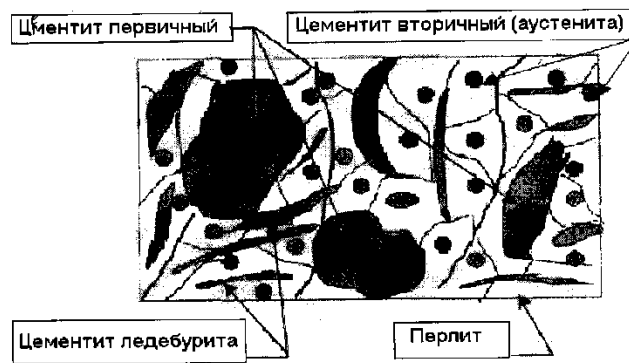


Рисунок 9 - Схема микроструктуры заэвтектического чугуна

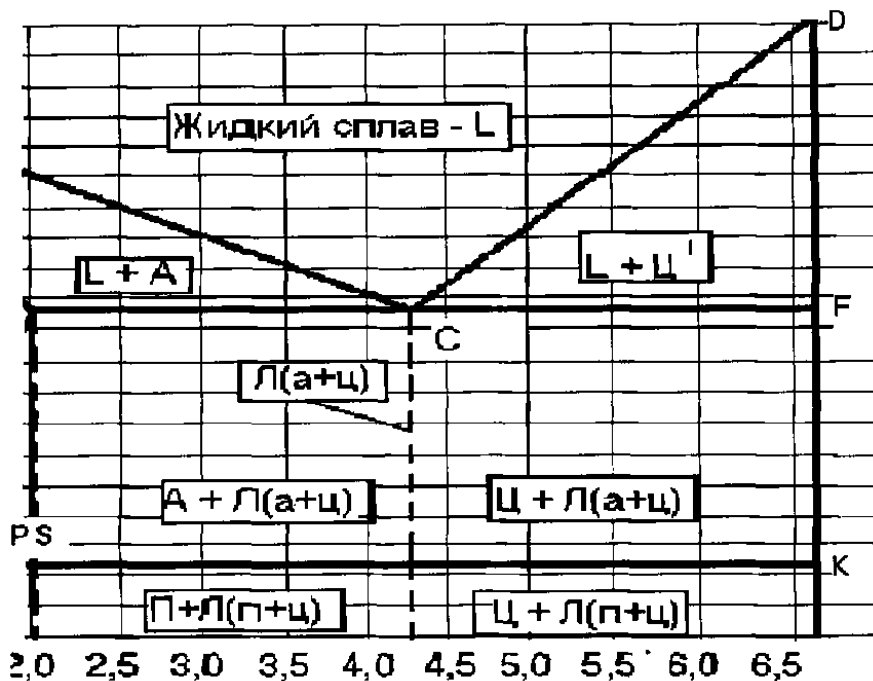


Рисунок 10 - Диаграмма состояния железо-углерод (чугунная часть)

Таким образом, из рассмотрения диаграммы железо-углерод выяснилось, что все железоуглеродистые сплавы можно разбить на несколько классов, которые отличаются друг от друга структурой и, соответственно свойствами.

1. Техническое железо (Армко - железо), имеющее углерода менее 0,02% и состоящее из феррита.

2. Доэвтектоидная сталь, имеющая углерода от 0,02% до 0,8% и состоящая из перлита и феррита (наиболее применяемый класс сталей).

3. Эвтектоидная сталь, имеющая углерода 0,8% и состоящая из перлита

4. Заэвтектоидная сталь, имеющая углерода от 0,8% до 2% и состоящая из перлита и цементита.

5. Доэвтекктический чугун, имеющий углерода от 2% до 4,3% и состоящий из перлита и ледебурита перлитного происхождения.

6. Эвтекктический чугун, имеющий углерода 4,3% и состоящий из ледебурита перлитного происхождения.

7. Заэвтектический чугун, имеющий углерода от 4,3% до 6,67% и состоящий из цементита и ледебурита перлитного происхождения. Каждый из перечисленных классов железоуглеродистых сплавов имеет свои области применения, определяемые их механическими, электротехническими, технологическими и др. свойствами.

## 2.2 Задание:

1. Начертить диаграмму состояния сплавов железо-углерод (область чугунов).
2. Построить кривую охлаждения для сплава с заданной концентрацией углерода и проверить правильность построения этой кривой правилом фаз.
3. Описать процесс охлаждения заданной стали по кривой охлаждения, изобразить схемы микроструктур на каждом из участков кривой охлаждения.

## 2.3 Варианты задания

Таблица 2 – Варианты задания для индивидуального решения

| Вариант             | 1   | 2    | 3   | 4    | 5   | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|---------------------|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Содержание углерода | 2,2 | 3,1  | 4,3 | 5,0  | 4,4 | 5,3  | 4,5  | 6,4  | 4,6  | 5,6  | 4,7  | 5,8  |
| Вариант             | 13  | 14   | 15  | 16   | 17  | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| Содержание углерода | 4,8 | 3,45 | 3,9 | 6,25 | 3,9 | 4,35 | 5,15 | 3,55 | 4,65 | 5,65 | 2,75 | 4,85 |

## 2.4 Контрольные вопросы:

1. Чем отличаются чугуны от сталей?
2. Чем отличаются белые чугуны от серых?
3. Какие свойства придает чугунам ледебурит?
4. Почему в заэвтектических чугунах кристаллизуется в первую очередь цементит?
5. Почему в доэвтектических чугунах кристаллизуется в первую очередь аустенит?

## Практическая работа № 3

### Тема: Сплавы на основе двойных систем

**Цели работы:** Ознакомиться с основными видами диаграмм состояния сплавов на основе двойных систем, научиться определять фазы и структурные составляющие в областях двойных диаграмм, закрепить правило фаз и построение кривых охлаждения.

#### 3.1 Теоретические основы.

**Основные виды диаграмм состояния. Понятие о сплавах и методах их получения.** Сплав – это вещество, которое получается при сплавлении двух и более элементов. Существуют также вещества, называемые псевдосплавами. Они готовятся при помощи спекания, возгонки, электролиза и т.д.

«Сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами, называется металлическим сплавом. Сплавы обладают более разнообразным комплексом свойств, которые изменяются в зависимости от состава и метода обработки.» [1]

#### **Основные понятия в теории сплавов.**

**Система** – «группа тел выделяемых для наблюдения и изучения.» [1]

Металловедение определяет системами металлы и металлические сплавы. Чистый металл является однокомпонентной системой, сплав – сложной системой, состоящей из двух и более компонентов.

**Компоненты** – «вещества, образующие систему. В качестве компонентов выступают чистые вещества и химические соединения, если они не диссоциируют на составные части в исследуемом интервале температур.» [1]

**Фаза** – «однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностного раздела, при переходе через которую структура и свойства резко меняются.» [1]

**Вариантность  $C$  (число степеней свободы)** – «это число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация), которые можно изменять без изменения количества фаз в системе.

Если вариантность  $C = 1$  (моновариантная система), то возможно изменение одного из факторов в некоторых пределах, без изменения числа фаз.

Если вариантность  $C = 0$  (инвариантная система), то внешние факторы изменять нельзя без изменения числа фаз в системе

Существует математическая связь между числом компонентов  $K$ , числом фаз  $\Phi$  и вариантностью системы  $C$ .» Это закон Гиббса (правило фаз):

$$C = K - \Phi + 2 \quad (7)$$

Если превращения происходят при постоянном давлении, то число переменных уменьшится:

$$C = K - \Phi + 1$$

(8)

где: С - число степеней свободы,

К - число компонентов,

Φ - число фаз,

1 - учитывает возможность изменения температуры.

Процессы кристаллизации сплавов изучаются по диаграммам состояния.

Диаграмма состояния «представляет собой графическое изображение состояния системы в зависимости от концентрации и температуры.

Диаграммы состояния показывают устойчивые состояния, т.е. состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии, и поэтому ее также называют диаграммой фазовых равновесий, так как она показывает, какие при данных условиях существуют равновесные фазы.

Построение диаграмм состояния наиболее часто осуществляется при помощи термического анализа. В результате получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называют критическими точками. Некоторые критические точки имеют названия, например, точки отвечающие началу кристаллизации называют точками *ликвидус*, а концу кристаллизации - точками *солидус*.

По кривым охлаждения строят диаграмму состава в координатах: по оси абсцисс - концентрация компонентов, по оси ординат - температура.

По диаграмме состояния можно определить температуры фазовых превращений, изменение фазового состава, приблизительно, свойства сплава, виды обработки, которые можно применять для сплава.»

Если не считать систем с полиморфными превращениями компонентов, то основными видами диаграмм можно считать четыре, изображённые на рис. 1:

- диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси (рис. 11 а);

- диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (рис. 11 б);

- диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (рис. 11 в);

- диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение (рис. 11 г);

Кроме того, на рисунке 11 д и рис. 11 е приведены диаграммы, предлагаемые в контрольной работе № 1, - с ограниченной растворимостью компонентов «слева» (рис. 11 д) или «справа» (рис. 11 е).

**Анализ диаграмм состояния.** «К анализу диаграмм состояния относятся: определение фаз и структурных составляющих во всех областях диаграммы, определение состава и количества фаз, находящихся в равновесии при данной температуре, построение кривых охлаждения сплавов и др.»

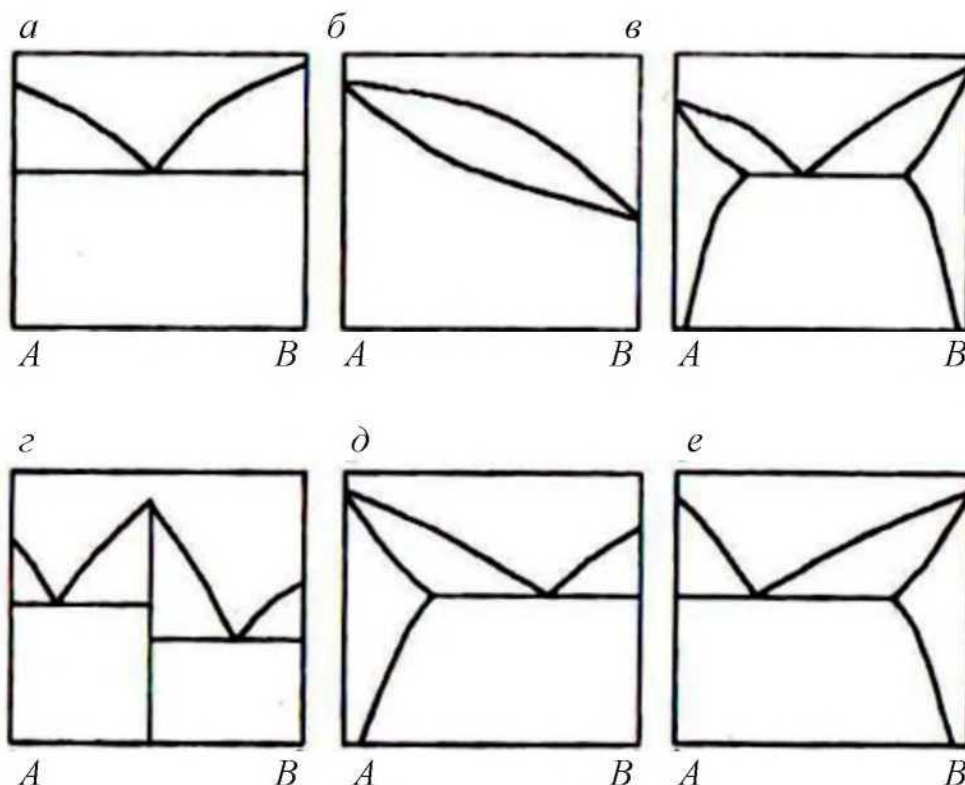


Рисунок 11 - Основные виды диаграмм состояния сплавов

Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (рис. 11 а)

Оба компонента (А и В) в жидком состоянии неограниченно растворимы друг в друге, а в твердом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений (рис. 12 а), где:

- 1) А - температура плавления компонента А;
- 2) В - температура плавления компонента В.

«Верхняя линия диаграммы АСВ является линией ликвидус, выше которой любой сплав находится в жидком состоянии. Линия ДСЕ - линия солидус и одновременно линия эвтектического превращения. На линии АС при охлаждении начинают выделяться кристаллы компонента А, а на линии ВС - кристаллы В. На линии ДСЕ из жидкости концентрации С одновременно выделяются кристаллы А и В. У эвтектического сплава (соответствующего концентрации точки С) нет температурного интервала кристаллизации, как у доэвтектических и заэвтектических сплавов. Ниже линии солидус любой сплав находится в твердом состоянии.» [1]

Указать фазы на диаграмме состояния можно двумя способами.

**Первый способ** указан на рисунке 12 б. Выше линии ликвидус АСВ любой сплав находится в жидком состоянии. «Эта область диаграммы обозначается буквой Ж (жидкость). Ниже линии солидус ДСЕ любой сплав состоит из механической смеси компонентов А и В, так как компоненты А и В в твердом состо-

янии нерастворимы друг в друге. Область диаграммы ниже линии солидус обозначается (А+В). В области АСД идет процесс кристаллизации компонента А из жидкости. Область АСД - двухфазная и обозначается (А+Ж). В области ВСЕ идет процесс кристаллизации компонента В из жидкости. Область ВСЕ тоже двухфазная и обозначается (В+Ж)» [1]

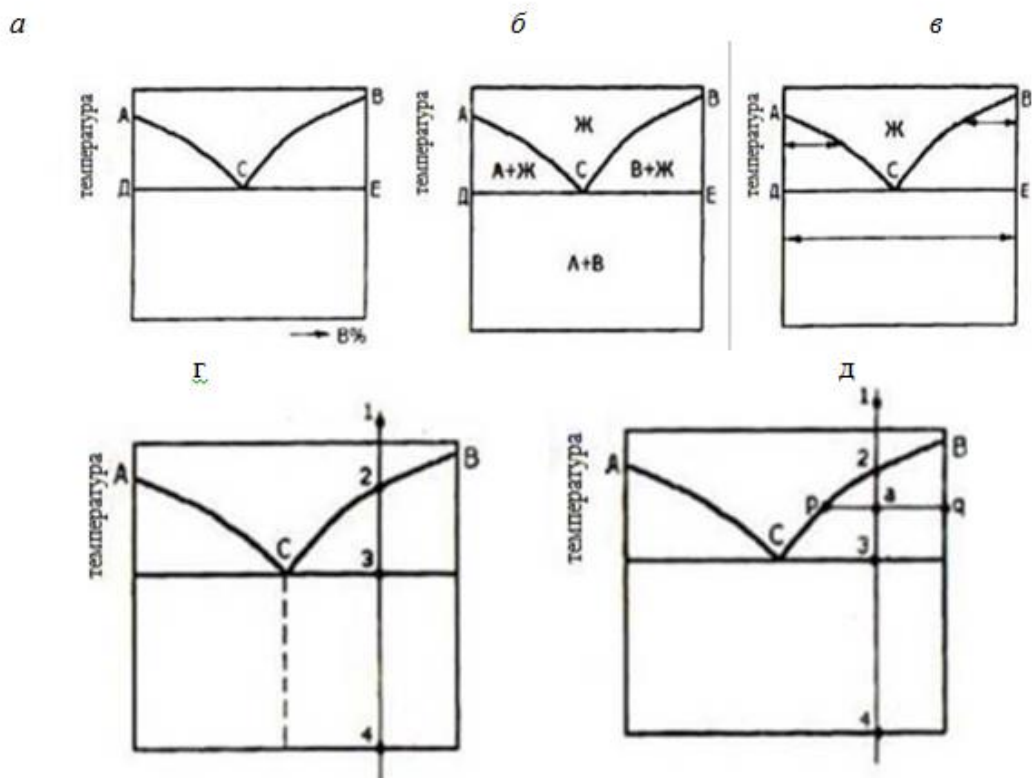


Рисунок 12 - Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси:

а - общий вид диаграммы; б - фазовый состав; в - определение фаз; г - выбор сплава; д - определение состава фаз

**Второй способ** предусматривает определение фаз на диаграмме с помощью горизонтальных отрезков - изотерм (рис. 12 в). «Горизонтальный отрезок проводится в области, где требуется определить фазовый состав, до пересечения с линиями диаграммы. Концы отрезка укажут фазы, находящиеся в равновесии в данной области и при данной температуре. Так в области АСД горизонтальный отрезок упирается в вертикальную линию чистого компонента А и в линию ликвидуса АС (однофазную область Ж на диаграмме). Отсюда делается заключение, что в области АСД присутствуют две фазы - А и Ж. Аналогично в области ВСЕ - фазы В и Ж. В области ниже линии ДСЕ горизонтальный отрезок упирается в линии, соответствующие чистым компонентам А и В. Следовательно, фазовый состав этой области (А+В).» [1]

Для того чтобы указать на этой диаграмме структурные составляющие,

разделим все сплавы на доэвтектические (до концентрации точки С), заэвтектические (за точкой С), как это сделано на рисунке 12 г. Выберем какой-либо сплав (например, заэвтектический) и проведем вертикальную линию, соответствующую концентрации выбранного сплава. Обозначим точки пересечения линии сплава с линиями диаграммы цифрами 1, 2, 3, 4 (характерные точки). Из них точки 2 и 3, находящиеся на линиях ликвидуса и солидуса, будут критическими для выбранного сплава.

Построим кривую охлаждения для выбранного сплава в координатах «температура - время» и проследим за процессами структурообразования (рис. 3).

«При построении кривой охлаждения сплава используется правило фаз Гиббса, которое устанавливает зависимость между числом фаз  $\Phi$ , количеством компонентов  $K$  и числом степеней свободы системы  $C$ . Использование правила фаз позволяет предсказать процессы, проходящие в сплавах при нагреве и охлаждении, и определить число фаз в системе при данных условиях.

Для металлических сплавов внешним фактором равновесия является только температура. Поэтому для металлических систем правило фаз записывается в виде:

$$C = K - \Phi + 1 \quad (9)$$

Рассмотрим кристаллизацию выбранного нами сплава.» [1]

Выше точки 2 сплав находится в однофазном (жидком) состоянии. В интервале температур 1-2 сплав охлаждается без изменения числа фаз с какой-то скоростью, которую характеризует наклон участка кривой охлаждения 1-2 к оси времени (рис. 13). В точке 2 из жидкости начинают выделяться кристаллы компонента В.

Для того чтобы определить ход кривой охлаждения в интервале 2-3, применим правило фаз.

Число компонентов:  $K = 2$  (А и В)

Число фаз, находящихся в равновесии в интервале температур 2-3:  $\Phi = 2$  (Ж и В)

Следовательно, число степеней свободы системы:  $C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$ .

Исходя из полученного, можно сказать, что кристаллизация компонента В из жидкости будет происходить при изменяющейся температуре. Однако, кривая охлаждения изменит свой ход из-за выделения скрытой теплоты кристаллизации. Таким образом, на кривой охлаждения в точке 2 будет наблюдаться перегиб.

В процессе охлаждения в интервале температур 1-2 из жидкости будет выделяться чистый компонент В. Оставшаяся жидкость обедняется компонентом В, и ее состав при температуре эвтектического превращения будет соответствовать эвтектическому, т.е. точке С диаграммы (рис. 12 д). Таким образом, при температуре точки 3 в нашей системе в равновесии будут находиться кристаллы компонента В и жидкость эвтектического состава, которая при температуре точки 3 будет претерпевать превращение в механическую смесь - эвтектику по реакции

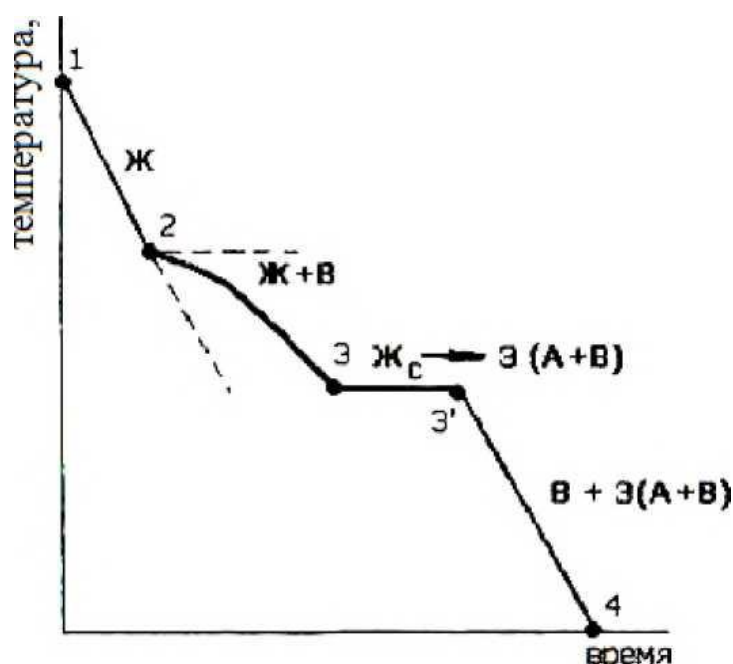


Рисунок 13 – Кривая охлаждения

Чтобы определить дальнейший ход кривой охлаждения, применим правило фаз.

Число компонентов:  $K = 2(A \text{ и } B)$ .

Число фаз, находящихся в равновесии при температуре точки 3:  $\Phi = 3(Ж, A, B)$ .

Следовательно, число степеней свободы системы:  $C = K - \Phi + 1 = 2 - 3 + 1 = 0$

Из полученного следует, что превращение жидкости эвтектического состава в механическую смесь будет происходить при постоянной температуре ( $C = 0$ , система невариантна).

На кривой охлаждения при этом будет наблюдаться горизонтальная площадка 3-3', соответствующая эвтектическому превращению.

После завершения эвтектического превращения в точке 3' сплав будет находиться в твердом состоянии.

Интервал температур 3'-4 соответствует охлаждению сплава в твердом состоянии.

Число компонентов:  $K = 2(A \text{ и } B)$ .

Число фаз:  $\Phi = 2(A \text{ и } B)$ .

Число степеней свободы системы в интервале температур 3'-4:  $C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$ .

Ход кривой охлаждения в интервале температур 3'-4 определяется скоростью охлаждения.

Процесс структурообразования выбранного сплава показан на рисунке 14.



После охлаждения и кристаллизации в сплаве будут следующие структурные составляющие:

- первичные кристаллы компонента В, выделившиеся из жидкости в интервале температур 2-3 (рис. 4 а);
- эвтектика Э (А + В), образовавшаяся из жидкости эвтектического состава при температуре точки 3 (рис. 4 б).

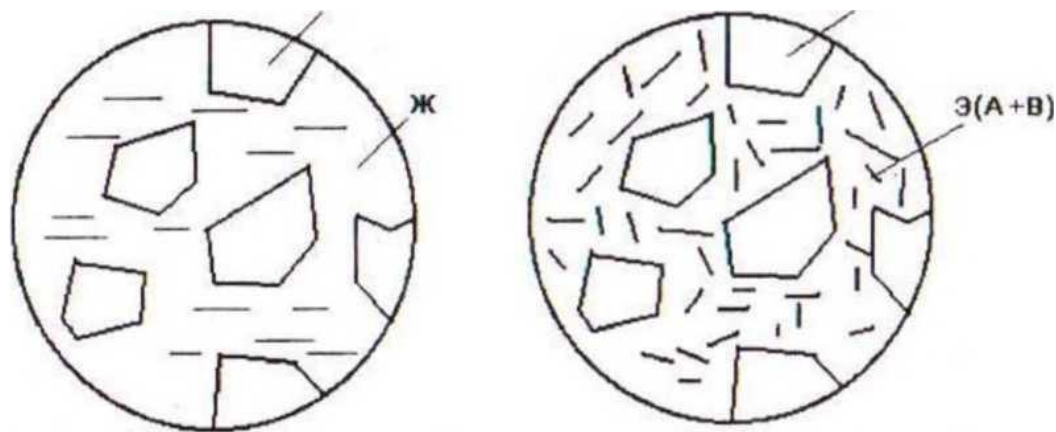


Рисунок 14 - Схема процесса структурообразования заэвтектического сплава: а-в интервале температур 2-3; б - окончательная структура

Структура доэвтектических сплавов будет состоять из первичных кристаллов компонента А и эвтектики Э (А + В).

Количество эвтектики в обоих случаях будет увеличиваться с приближением сплавов к эвтектическому составу. Количество первичных кристаллов А и В при этом будет уменьшаться.

В процессе кристаллизации изменяются как количество каждой фазы, так и их состав. В любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы, можно определить количество обеих фаз и их концентрацию. Для этого служит правило рычага, или правило отрезков.

Рассмотрим это на примере диаграммы состояния сплавов, образующих механические смеси (рис. 5). Для конкретности возьмем сплав, содержащий 50 % В, и определим для произвольно взятой точки а состав и количество фаз.

Чтобы определить концентрации компонентов в фазах, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями диаграммы, ограничивающими данную область; проекции точек пересечения на ось концентраций показывают состав фаз.

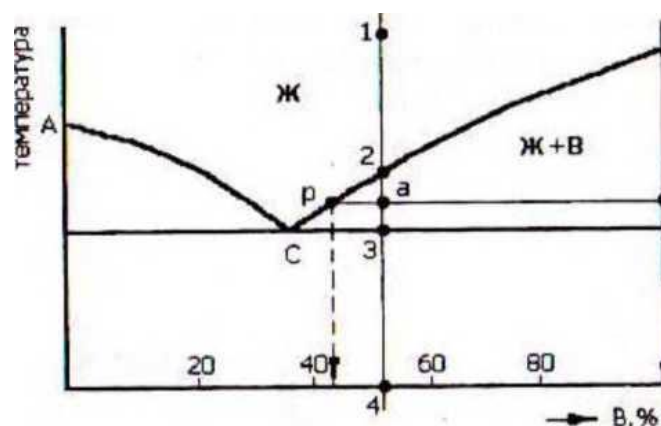


Рисунок 15 - Определение состава фаз и их количества по правилу отрезков

Следовательно, для нашего сплава при температуре точки а состав жидкой фазы будет соответствовать точке р диаграммы (а именно - 42 % В); состав твердой фазы - точке q (а именно - 100 % В).

Для того чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

В нашем случае количество каждой из фаз определяется по формулам:

$$O_{\text{ж}} = aq / pq \times 100 = \dots \quad (12)$$

$$Q_{\text{в}} = pa / pq \times 100 = \dots \quad (13)$$

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (рис. 11 б)

«Оба компонента неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях и не образуют химических соединений.

Если два компонента неограниченно растворяются в жидком и твердом состояниях, то возможно существование только двух фаз: жидкого раствора - Ж, находящегося на диаграмме выше линии ликвидус, и твердого раствора -  $\alpha$ , находящегося на диаграмме ниже линии солидус. Между линиями ликвидус и солидус осуществляется кристаллизация твердого раствора из жидкости, и в этой области существуют в равновесии две фазы - Ж и  $\alpha$ .» [1]

**Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (рис. 11 в)**

Данный вид диаграммы включает две рассмотренные ранее диаграммы (рис. 11 а, 11 б). Более подробно она изображена на рисунке 16

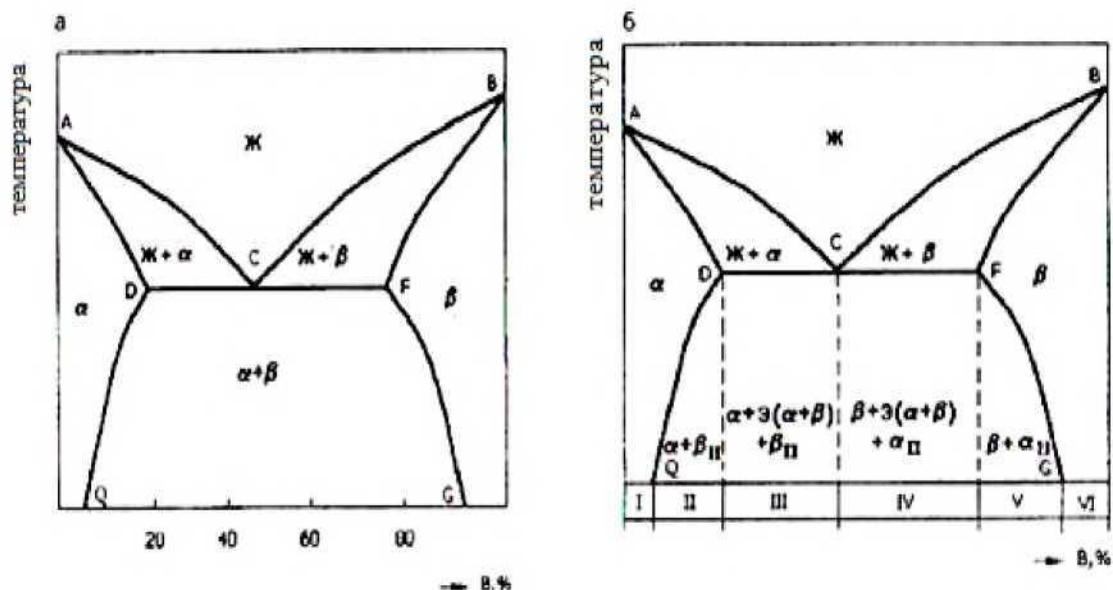


Рисунок 16 - Диаграмма состояния для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии: а - фазовый состав; б - структурный состав

«а - ограниченный твердый раствор компонента В в кристаллической решетке А (ограниченный твердый раствор на базе компонента А);

β - ограниченный твердый раствор компонента А в кристаллической решетке В (ограниченный твердый раствор на базе компонента В).

Ограниченную растворимость компонентов в твердом состоянии показывают линии DQ (предельная растворимость компонента В кристаллической решетке компонента А) и FG (предельная растворимость компонента А в кристаллической решетке компонента В).

Ниже указанных линий из ограниченных твердых растворов αиβ выделяются вторичные фазы - αц и βц.

Для расшифровки данной диаграммы обозначим сначала на ней однофазные области:

- выше линии ликвидус ACB - жидкость Ж;
- в области, ограниченной линиями AD и DQ, - твердый раствор α;
- в области, ограниченной линиями BF и FG, - твердый раствор β;

С помощью метода горизонтальных отрезков, описанного ранее, определим фазы в двухфазных областях.

- между линиями ликвидус AC и солидус DC - Ж + α;
- между линиями ликвидус CB и солидус CF - Ж + β;
- в области QDFG - β + α.

На диаграмме с ограниченной растворимостью компонентов слева и справа (рис. 6 б) можно отметить шесть характерных областей:

- I и VI - структура состоит из твердых растворов αиβ соответственно;
- II и V - ниже линий предельной растворимости происходит выделение вторичных фаз:

- в области II из  $\alpha$  - твердого раствора выделяется  $\beta_{\text{п}}$ ;

- в области V из  $\beta$  - твердого раствора выделяется  $\alpha_{\text{ц}}$ ;

Структура в областях II и V состоит из  $(\alpha + \beta_{\text{п}})$  и  $(\beta + \alpha_{\text{ц}})$  соответственно;

Под эвтектической линией DF образуются структуры, содержащие эвтектику  $(\alpha + \beta)$ .» [1]

«В доэвтектических сплавах сначала образуются избыточные кристаллы  $\alpha$  - твердого раствора; в процессе кристаллизации состав жидкости изменяется в сторону обогащения компонентом B, и при температуре, соответствующей точке C, происходит эвтектическое превращение:  $J_{\text{с}} \rightarrow \text{Э} (\alpha_{\text{д}} + \beta_{\text{ф}})$ . Таким образом, структура доэвтектических сплавов при температуре эвтектического превращения будет состоять из избыточных кристаллов  $\alpha$  - твердого раствора и эвтектики (область III). Количество эвтектики возрастает с приближением состава сплава к эвтектическому.»

«Аналогичным образом можно проанализировать процесс структурообразования в заэвтектических сплавах. Структура заэвтектических сплавов при температуре эвтектического превращения будет состоять из избыточных кристаллов  $\beta$  - твердого раствора и эвтектики (область IV).

По мере охлаждения сплавов до комнатной температуры растворимость компонента  $\alpha$  в  $\beta$  - твердом растворе и компонента B в  $\alpha$  - твердом растворе будет снижаться в соответствии с линиями предельной растворимости DQ и GF, что вызовет выделение из твердых растворов вторичных фаз: из  $\alpha$  - твердого раствора выделяется  $\beta_{\text{п}}$ , а из  $\beta$  твердого раствора выделяется  $\alpha_{\text{ц}}$ . Структура сплавов в области III будет  $\alpha + \text{Э} (\alpha + \beta) + \beta_{\text{п}}$ , а в области IV -  $\beta + \text{Э} (\alpha + \beta) + \alpha_{\text{ц}}$ .

«Диаграмма состояния сплавов, образующих устойчивые химические соединения.» [1]

«Рассмотрим простейший случай таких диаграмм, когда оба компонента образуют одно устойчивое химическое соединение АВ, причем и это соединение, и чистые компоненты не образуют в твердом состоянии растворов (нерастворимы друг в друге). Внешний вид такой диаграммы приведен на рисунке 11. Химическое соединение устойчиво, поэтому оно может быть нагрето без разложения до своей температуры плавления.» [1] В этом случае данную диаграмму можно рассматривать как совокупность двух простых диаграмм и изучить каждую часть диаграммы отдельно. Краткое рассмотрение указанной диаграммы также приведено на рисунке 11 (вариант 4).

### 3.2 Задание

1. Изучить теоретическую часть сплавов на основе двойных систем. Ознакомиться с принципами анализа этих сплавов, структурные составляющие.

2. Построить диаграмму состояния сплавов, заданную вариантом.

3. Указать во всех областях диаграммы фазовый состав и структурный состав.

5. Построить кривую охлаждения сплава, заданного вариантом, с указанием всех процессов, происходящих в заданном температурном диапазоне.;

6. Определить состав фаз в заданном сплаве для всех точек между линией

ликвидус и линией солидус;

8. Написать, процессы, происходящие по линиям ликвидус и солидус (по заданию в таблице 3).

9. Указать какой из компонентов сплава является самым тугоплавким (или самым легкоплавким).

### 3.3 Варианты задания

Таблица 3 – Варианты задания для индивидуального решения

| Вариант | Тип диаграммы                                                                               | % В | Процесс по линиям       | Вопрос 10    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------|--------------|
| 1       | диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси                                  | 60  | ликвидус при нагреве    | тугоплавкий  |
| 2       | диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение                               | 65  | ликвидус при охлаждении | легкоплавкий |
| 3       | диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии   | 20  | солидус при охлаждении  | тугоплавкий  |
| 4       | диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси                                  | 80  | ликвидус при нагреве    | легкоплавкий |
| 5       | диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии | 60  | солидус при охлаждении  | тугоплавкий  |
| 6       | диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии | 70  | ликвидус при охлаждении | легкоплавкий |
| 7       | диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии   | 55  | солидус при нагреве     | тугоплавкий  |
| 8       | диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение                               | 65  | ликвидус при нагреве    | легкоплавкий |
| 9       | диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси                                  | 80  | ликвидус при охлаждении | тугоплавкий  |
| 10      | диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии   | 20  | солидус при охлаждении  | легкоплавкий |
| 11      | диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии | 20  | солидус при нагреве     | тугоплавкий  |
| 12      | диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение                               | 40  | ликвидус при нагреве    | легкоплавкий |
| 13      | диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии | 60  | солидус при охлаждении  | тугоплавкий  |

### Продолжение таблицы 3

|    |                                                                                             |    |                         |              |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------------------------|--------------|
| 14 | диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси                                  | 80 | ликвидус при охлаждении | легкоплавкий |
| 15 | диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии | 20 | солидус при нагреве     | тугоплавкий  |
| 16 | диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение                               | 80 | ликвидус при нагреве    | легкоплавкий |
| 17 | диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии | 65 | солидус при нагреве     | тугоплавкий  |
| 18 | диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии   | 60 | ликвидус при охлаждении | легкоплавкий |
| 19 | диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии | 80 | солидус при охлаждении  | тугоплавкий  |
| 20 | диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии   | 20 | ликвидус при нагреве    | легкоплавкий |

### 3.4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение диаграммы состояния. В каких координатах строится диаграмма состояния?
2. Какое определение имеет твёрдый раствор, механическая смесь, химическое соединение.
3. Определение диаграммы состояния первого, второго, третьего, четвёртого и пятого родов.
4. Дайте определение линий ликвидус и солидус.
5. Какие виды диаграмм состояния на основе двойных сплавов существуют?
6. Что происходит по линии ликвидус?
7. Что происходит по линии солидус?

## Практическая работа № 4

### Тема: Изотермическое превращение аустенита

**Цель:** Ознакомиться с диаграммой изотермического распада аустенита и изучить возможности применения этой диаграммы в технике.

#### 4.1 Теоретические основы.

**Изотермическое превращение аустенита** - это превращение переохлаждённого аустенита при постоянной температуре.

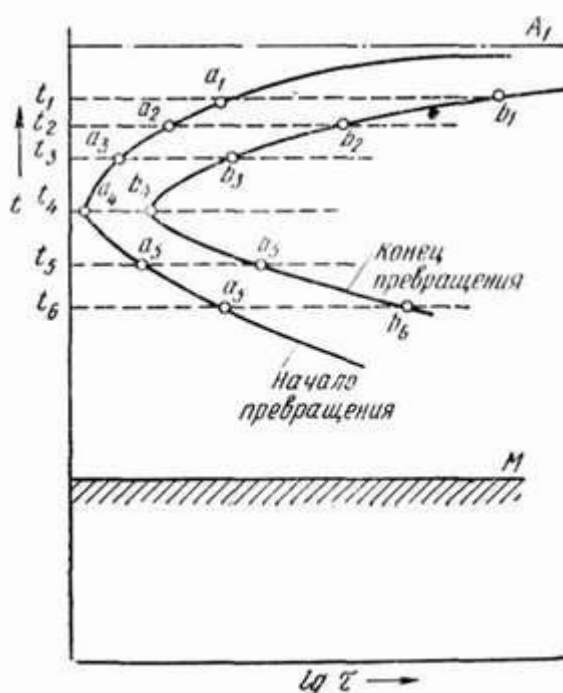


Рисунок 17 – Диаграмма изотермического превращения аустенита

Превращение аустенита в перлит заключается в распаде аустенита - твёрдого раствора углерода в  $\gamma$ -железе, на почти чистое  $\alpha$ -железо и цементит.

Реакция изотермического превращения аустенита:



При температуре равновесия  $A_1$  превращение аустенита в перлит невозможно, так как при этой температуре свободные энергии исходного аустенита и конечного перлита равны. Превращение может начаться лишь при некотором переохлаждении.

На рисунке 18 показано время превращения аустенита в перлит в зависимости от степени переохлаждения, т.е. превращение переохлаждённого аустенита при постоянной температуре. Поэтому такие диаграммы обычно называют диаграммами изотермического превращения аустенита.

**В доэвтектоидной стали превращению аустенита в перлит предшествует выделение из аустенита феррита.**

**В заэвтектоидной стали превращению аустенита в перлит предшествует выделение из аустенита цемента.**

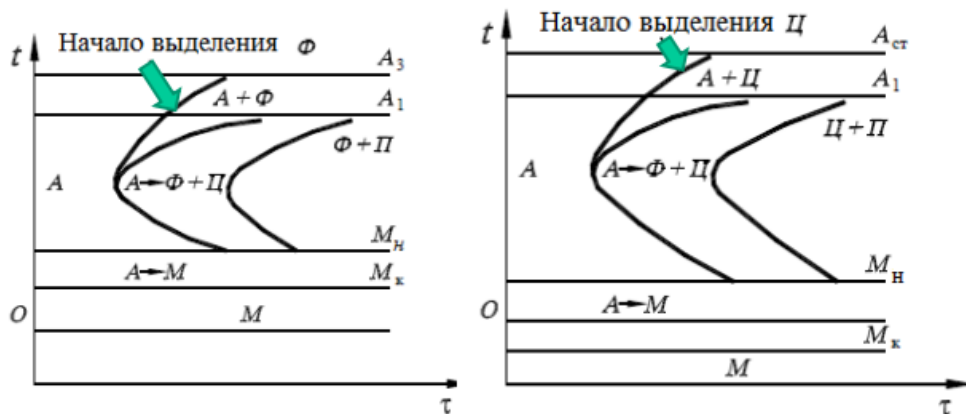


Рисунок 18 – Диаграммы изотермического превращения аустенита для до- и заэвтектоидных сталей.

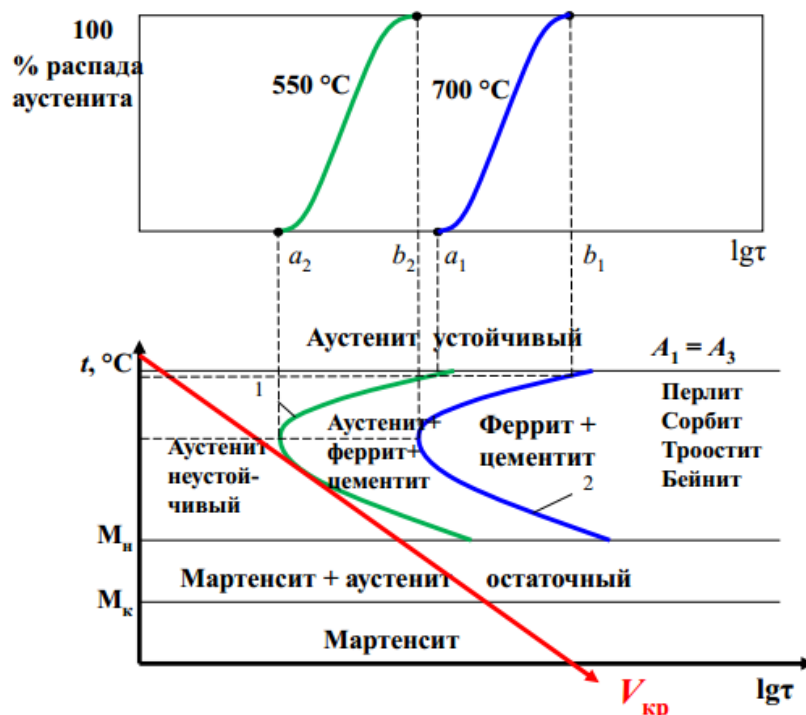


Рисунок 19 – Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита эвтектоидной стали.



Кривые диаграммы изотермического превращения аустенита имеют С-образную форму и поэтому называются С-кривыми или просто С-образными. Горизонтальная линия М указывает температуру, при которой начинается мартенситное превращение без диффузии.

Свойства и структура продуктов аустенитного превращения зависят от температуры, при которой происходил процесс распада.

Связь между характером изотермического превращения аустенита, содержанием углерода и температурой представлена обобщенной диаграммой превращения переохлажденного аустенита в углеродистую сталь.

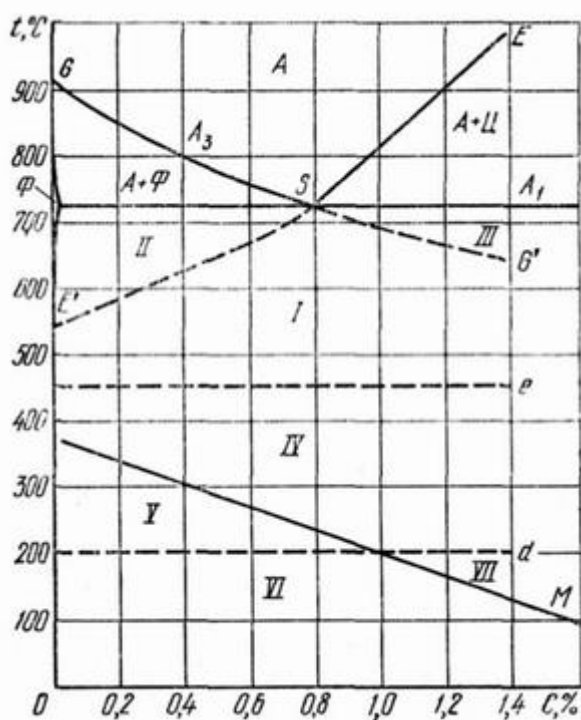


Рисунок 20 – Обобщенная диаграмма превращения переохлаждённого аустенита в углеродистой стали.

«В зависимости от содержания углерода и степени переохлаждения мы имеем такие области превращений аустенита (рис. 19):

I - превращение аустенит → перлит;

II - предварительное выделение феррита и затем превращение аустенит → перлит;

III - предварительное выделение цементита и затем превращение аустенит → перлит;

IV - превращение аустенит → бейнит;

V - превращение аустенит → мартенсит и распад остаточного аустенита с образованием бейнита;

VI - превращение аустенит → мартенсит;

VII - переохлаждённый аустенит сохраняется без превращения.

После рассмотрения процесса превращения аустенита при постоянной температуре и разных степенях переохлаждения можно перейти к рассмотрению

процесса распада аустенита при непрерывном охлаждении, когда сталь, нагретая до аустенитного состояния, охлаждается с разной скоростью.» [2]

Диаграмма изотермического распада аустенита, как и кривые охлаждения, строятся в координатах температура-время.

Для более точной оценки превращений, происходящих при непрерывно меняющейся температуре, используют так называемые термокинетические или анизотермические диаграммы превращения аустенита, диаграммы, характеризующие превращение аустенита при различных скоростях охлаждения.

Хотя теоретические диаграммы изотермического превращения аустенита дают много информации о характере превращений, на практике изотермичность превращения достигается не всегда.

Для получения полной информации о превращении аустенита конкретной марки стали необходимы: диаграммы изотермического превращения аустенита, анизотермического превращения, ряд дополнительных сведений: марка и состав стали, температура нагрева, размер зерна аустенита, а также свойства продуктов распада и соотношение структурных компонентов.

### **Структурные составляющие:**

**Сорбит**, «англ. sorbite (от имени английского учёного Г. Сорби (H. Sorby, 1826-1908)) - структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, представляющая собой смесь феррита и цементита. Сорбит образуется из аустенита в результате диффузионного превращения при охлаждении. Сорбит отличается от перлита более дисперсной структурой, что обеспечивает высокую прочность и износостойкость деталей.

По сути, сорбит - это перлит более тонкого строения, который получается при более низких температурах и, следовательно, при больших степенях переохлаждения, когда дисперсность структур возрастает и твёрдость продуктов повышается.

Таким образом, перлит, сорбит и троостит - структуры с одинаковой природой (феррит + цементит), отличающиеся степенью дисперсности феррита и цементита.» [2]

Сорбитизация – «это разновидность закалки среднеуглеродистой стали, заключающаяся в нагреве её до 800-950°C, выдержке и охлаждении с определённой скоростью (обычно в масле, тёплой воде или струе сжатого воздуха). Сталь при этом приобретает структуру сорбита. Сорбитизация применяется при термической обработке изделий, к механическим свойствам которых предъявляются повышенные требования (рельсов, проволоки и т.п.).»

**Троостит** «(troostite, название произошло от имени французского химика Л.-Ж. Труста [L.-J. Troost; 1825-1911]), также называют тростит или трустит - структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, представляющая собой дисперсную смесь феррита и цементита. Отличается от перлита и сорбита более тонким строением. Троостит образуется при распаде аустенита в температурном интервале 400-500°C (цементит троостита закалки - пластинчатый цементит) или при отпуске при температурах 350-400°C (цементит троостита отпуска - зернистый цементит).»

Подобно сорбиту и перлиту, троостит является продуктом разложения аустенита; в этом случае превращение происходит путем диффузии. Свойства и структура продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходил процесс распада. Поскольку при низких температурах (что соответствует кривизне С-кривой) дисперсность структур еще больше возрастает, различить отдельные компоненты ферритно-цементитной смеси под оптическим микроскопом становится практически невозможно. Эта структура называется трооститом. При исследовании с помощью обычного светового микроскопа троостит выглядит как однородно протравленная твердая масса. Но при наблюдении под электронным микроскопом достаточно отчетливо обнаруживается пластинчатая структура троостита.

**Бейнит** («англ. "bainite", от имени американского металлурга Э. Бейна, E. Bain), устар. *игольчатый троостит* - игольчатая структура железоуглеродистых сплавов, образующаяся при термической обработке в результате промежуточного превращения аустенита. Иногда структуру бейнита называют игольчатый троостит или *продукты промежуточного превращения*. Бейнит состоит из смеси частиц пересыщенного углеродом феррита и карбида железа. Часто в структуре бейнита имеется остаточный аустенит с изменённым (по сравнению со средним) содержанием углерода.

По морфологии бейнит подразделяется на две главные группы: игольчатый и зернистый.» [2]

#### ***Бейнитное превращение.***

Превращение аустенита в бейнит имеет общие характеристики с превращениями перлита и мартенсита, поэтому с бейнитным превращением целесообразно ознакомиться после изучения превращения аустенита в мартенсит.

**Бейнитное превращение** «переохлаждённого аустенита происходит в температурном интервале, расположенном ниже перлитного, но выше мартенситного интервала, поэтому его часто называют промежуточным. Бейнитное превращение имеет черты перлитного и мартенситного превращения (поэтому бейнитное превращение не следует относить к основным видам).

Определяющей особенностью бейнитного превращения является то, что оно протекает в интервале температур, когда практически отсутствует диффузия (самодиффузия) железа, но интенсивно протекает диффузия углерода.

Различают **верхний бейнит** и **нижний бейнит**, которые отличаются друг от друга не только по виду микроструктуры, но и по свойствам.» [2]

**Верхний бейнит** «образуется из переохлаждённого аустенита при температурах 500-350°C. Структура верхнего бейнита более грубая. Верхний бейнит имеет "перистое" строение и состоит из вытянутых частиц феррита в форме пластин и из параллельных им тонких частиц цементита. Частицы феррита в верхнем бейните имеют форму "реек" (толщина реек <1 мкм, ширина 5-10 мкм). Твёрдость и прочность сталей со структурой верхнего бейнита высоки, но пластичность понижена.» [3]

**Нижний бейнит** «образуется из переохлаждённого аустенита при температурах 350-200°C. У нижнего бейнита игольчатое строение, похожее на строе-

ние мартенсита, а состоит он из тонких частиц карбида, расположенного в пластинках феррита, пересыщенного углеродом. Карбиды нижнего бейнита очень мелкие, благодаря этому структура нижнего бейнита является предпочтительной, так как обеспечивает высокую твердость и прочность стали и при этом сохраняет высокую пластичность.» [4]

#### 4.2 Задание:

1. Изучить диаграмму изотермического распада аустенита.
2. Ознакомиться с продуктами распада и их свойствами.
3. Освоить применение диаграммы изотермического распада аустенита для назначения режимов термообработки стали.
4. Нарисовать диаграмму изотермического распада аустенита для доэвтектоидной стали.
5. Дать характеристику продуктов распада аустенита после полного отжига, нормализации, закалки для доэвтектоидной стали.
6. Согласно данным, представленным в таблицах ниже, построить диаграмму изотермического превращения аустенита для углеродистой и легированной эвтектоидной стали с нанесенными на них критическими скоростями охлаждения и обозначением микроструктур в различных областях
7. Составить таблицу продуктов изотермического распада аустенита с указанием: твердости, свойств и условия образования.

| Температура<br>выдержки $t$ , °C | Время начала<br>распада аустенита $\tau$ , с | $\lg \tau$ | Время начала<br>распада аустенита $\tau$ , с | $\lg \tau$ |
|----------------------------------|----------------------------------------------|------------|----------------------------------------------|------------|
| 700                              | $a_1 - 60$                                   | 1,78       | $v_1 - 960$                                  | 2,98       |
| 650                              | $a_2 - 3$                                    | 0,48       | $v_2 - 17$                                   | 1,23       |
| 550                              | $a_3 - 1$                                    | 0          | $v_3 - 5$                                    | 0,7        |
| 400                              | $a_4 - 10$                                   | 1          | $v_4 - 180$                                  | 2,25       |
| 300                              | $a_5 - 180$                                  | 2,25       | $v_5 - 1620$                                 | 3,21       |

Рисунок 21 – Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали 0,8% С

### 4.3 Варианты задания

Таблица 4 – Варианты задания для индивидуального решения

| Температура выдержки t, °C | Время Начала распада аустенита, сек | lg  | Время Начала распада аустенита, сек | lg  |
|----------------------------|-------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
| 700                        | 100000                              | 5   | Очень длительное                    |     |
| 650                        | 1800                                | 3.4 | 100000                              | 5   |
| 550                        | 12                                  | 1.2 | 10000                               | 4   |
| 400                        | 300                                 | 2.5 | 30000                               | 4,5 |
| 300                        | 5000                                | 3.5 | 180000                              | 5,2 |

### 4.4 Контрольные вопросы

1. Что такое изотермический распад аустенита?
2. Чем отличаются перлитные продукты изотермического распада аустенита между собой?
3. От чего зависят механические свойства продуктов изотермического распада аустенита?
4. Какая структура является закалочной?
5. В каком случае аустенит не распадается и существует при комнатной температуре?
6. Почему скорость охлаждения аустенита влияет на механические свойства стали?
7. Что такое критическая скорость закалки?
8. Какую форму имеют ферритные и цементитные зерна в перлите при изотермическом распаде аустенита?



Основы термической обработки заложены великим русским ученым Д.К.Черновым, обнаружившим критические точки диаграммы Fe-C и связанные с ними структурно-фазовые превращения. Чтобы понять, что происходит при термической обработке, нужно хорошо представлять диаграмму Fe-C.

Критическими точками на диаграмме Fe-C являются точки  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_{cm}$  (рис. 22). Точка  $A_1$  лежит на линии PSK диаграммы и равна  $727^\circ\text{C}$ . Точка  $A_3$  лежит на линии GSE диаграммы Fe-C.

Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, используют дополнительные буквенные обозначения: «с» (при нагреве) и «г» (при охлаждении). Тогда точка  $A_1$ , соответствующая температуре превращения перлита в аустенит, обозначается  $A_{c1}$ , а соответствующая температуре превращения аустенита в перлит, -  $A_{g1}$ . Точка  $A_3$ , соответствующая температуре конца растворения феррита в аустените, обозначается  $A_{c3}$ , а температура начала выделения феррита из аустенита обозначается  $A_{g3}$ . Часто точку  $A_3$ , лежащую на линии SE и обозначающую температуру конца растворения вторичного цементита в аустените, называют  $A_{cm}$ .

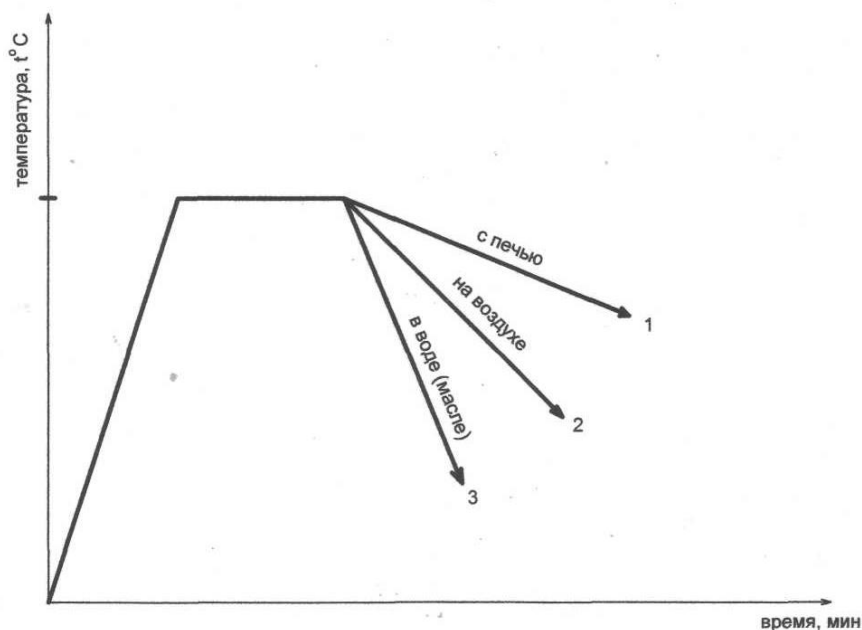


Рисунок 23 – Графики видов термической обработки:

1 – отжиг, 2 – нормализация, 3 – закалка.

Основными видами термообработки, различно изменяющими структуру и свойства материала и назначаемыми в зависимости от требований, предъявляемых к полуфабрикатам и готовым изделиям, являются отжиг, нормализация, закалка, отпуск (рис. 23).

### 5.1.2 Отжиг.

Термическая обработка проводится по определенному режиму, регламентирующему температуру нагрева ( $T_H$ ), скорость нагрева ( $v_H$ ) до определенной температуры, время выдержки при ( $\tau$ ) и скорость охлаждения ( $v_{охл}$ ). Изменяя  $T_H$ ,

$V_H$ ,  $\tau$ ,  $v_{\text{охл}}$ , можно придать сплаву (в частности, стали) одного и того же химического состава самые разнообразные свойства, т.е. сделать его твердым или мягким, пластичным или хрупким. Любую термическую обработку можно изобразить графически в координатах температура-время (рис. 23).

«Отжигом называется операция, при которой материал нагревают до определенной температуры, выдерживают при этой температуре и медленно охлаждают вместе с печью. Отжиг подразделяется на отжиг I и II рода.» [5]

Характерная особенность **отжига I рода** «состоит в том, что происходящие процессы, вызванные данной термической обработкой, не связаны с протекающими в стали фазовыми превращениями. Отжиг I рода можно проводить при температурах выше или ниже температур фазовых превращений.»

К основным видам отжига I рода относятся: гомогенизация, рекристаллизационный отжиг и отжиг для снятия остаточных напряжений.

**Гомогенизация (диффузионный отжиг).** «Диффузионный отжиг применяют для слитков легированной стали с целью уменьшения структурной неоднородности (дендритной ликвации), которая повышает склонность стали к хрупкому излому, а также для выравнивания химического состава.

Общая продолжительность гомогенизации составляет  $50 \div 100$  часов. Температура нагрева  $1100 \div 1200^\circ\text{C}$ , т.к. только в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания химического состава. В результате диффузионного отжига получается крупное зерно. Для измельчения зерна и улучшения свойств фасонные отливки подвергают полному отжигу или нормализации.» [5]

**Рекристаллизационный отжиг.** «Под этим видом отжига понимают нагрев холоднодеформированной стали выше температуры рекристаллизации ( $\sim 650 \div 760^\circ\text{C}$ ), выдержку при этой температуре с последующим охлаждением вместе с печью. Время рекристаллизационного отжига  $8 \div 12$  часов. Применяют перед или после холодной обработки давлением для повышения пластичности или (как промежуточную операцию) для снятия наклепа.

Структура стали после отжига будет зависеть от начального химического состава, однако зерна вследствие процесса коагуляции и сфероидизации цементита будут иметь овальную или круглую форму.» [5]

**Отжиг для снятия остаточных напряжений.** «Этот вид отжига применяют для отливок, сварных изделий, деталей после обработки резанием, т.е. тогда, когда из-за неравномерного охлаждения, неоднородной пластической деформации возникают остаточные напряжения.

Остаточные напряжения могут вызывать изменение размеров, коробление и поводку изделия в процессе его обработки (например, резанием) и эксплуатации.

Отжиг стальных изделий для снятия напряжений проводится при температуре  $160 \div 700^\circ\text{C}$  с последующим медленным охлаждением. Многие детали станков (винты, зубчатые колеса, червяки и т.д.) проходят отжиг после основной механической обработки при  $570 \div 600^\circ\text{C}$  в течение 2-3 часов, а для снятия шлифовочных напряжений - при  $160 \div 180^\circ\text{C}$  2-2,5 часа. Отжиг для снятия сварных напряжений проводят при  $650 \div 700^\circ\text{C}$ » [5]



**Отжиг II рода** «заключается в нагреве стали до температур выше точек  $A_{с3}$  или  $A_{с1}$ , выдержке при этой температуре, медленном охлаждении вместе с печью, в результате которого фазовые превращения приближают сталь к практически равновесному структурному состоянию:

- в доэвтектоидных сталях → феррит+перлит ( $\Phi$ +П);
- в эвтектоидных → перлит (П);
- в заэвтектоидных сталях → перлит+цементит (П+Ц)

Как правило, отжиг является предварительной термической обработкой, так как после отжига сталь обладает низкой твердостью и прочностью, высокой пластичностью и вязкостью, хорошо обрабатывается резанием (приемлема для средних и высокоуглеродистых сталей). Иногда отжиг является окончательной операцией термообработки (для крупных отливок), так как после него в изделиях практически отсутствуют остаточные напряжения.» [5]

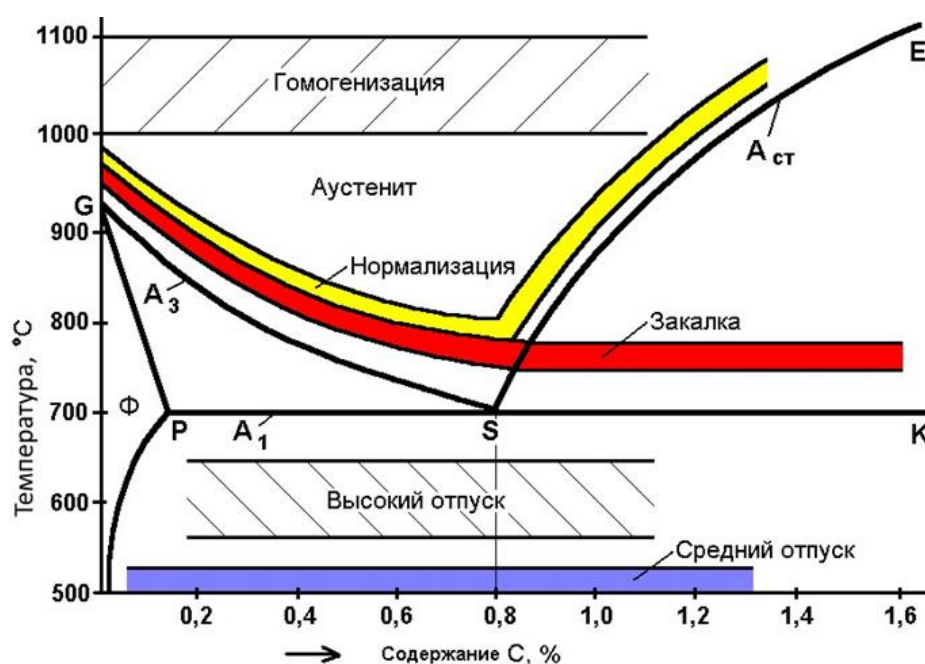


Рисунок 24 – Диапазон оптимальных температур нагрева при различных видах термообработки.

Различают несколько видов отжига II рода, однако к наиболее часто применяемым относятся полный, изотермический и неполный отжиг.

**Полный отжиг** – «вид термообработки, заключающийся в нагреве доэвтектоидной стали на  $30 \div 50^\circ\text{C}$  выше температуры, соответствующей точке  $A_{с3}$ , выдержке при этой температуре и последующем медленном охлаждении. При этом отжиге происходит полная фазовая перекристаллизация стали (рис. 24). При нагреве до температуры  $t = A_{с3} + 30 \div 50^\circ\text{C}$  образуется аустенит (А), характеризующийся мелким зерном, и поэтому при охлаждении возникает мелкозернистая структура, обеспечивающая высокую вязкость, пластичность. При повышении температуры более чем на  $50^\circ\text{C}$  происходит рост зерна аустенита, что ухудшает свойства стали.

Время нагрева и выдержки при заданной температуре зависит от типа печи, способа укладки изделий в печь, типа полуфабриката (лист, сортовой прокат) и т.д. Режим отжига для различных видов сталей можно найти в специальных справочниках по термической обработке. Полному отжигу обычно подвергаются прокат, поковки и фасонные отливки.» [5]

**Изотермический отжиг** «обычно применяют для изменения структуры легированной стали. В этом случае сталь нагревают как для полного отжига и сравнительно быстро охлаждают (переносом в другую печь) до температуры, лежащей ниже точки  $A_1$  (обычно  $\sim 650^\circ\text{C}$ ), и назначают изотермическую выдержку, необходимую для полного распада аустенита, после чего охлаждают на воздухе.

Преимущества изотермического отжига состоят в уменьшении длительности процесса для легированных сталей, которые приходится очень медленно охлаждать для требуемого снижения твердости, и в получении более однородной структуры, так как при изотермической выдержке температура по сечению изделия выравнивается.

Изотермический отжиг улучшает обрабатываемость резанием, чистоту поверхности, уменьшает деформации при последующей термической и химико-термической обработке. Этот отжиг используют для поковок (шестерни, валы, муфты и т.д.) и других заготовок небольших размеров.» [5]

**Неполный отжиг** – «вид термообработки, который заключается в нагреве стали до температуры выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$ , выдержке при этой температуре с последующим медленным охлаждением.

Для доэвтектоидных сталей неполный отжиг применяют для улучшения обрабатываемости резанием и снижения твердости.

Для заэвтектоидных сталей применяют только неполный отжиг. Нагрев выше температуры точки  $A_{c1}$  на  $10\div 30^\circ\text{C}$  вызывает полную перекристаллизацию и позволяет получить зернистый перлит вместо пластинчатого.

Неполный отжиг заэвтектоидных сталей называется сфероидизацией (отжиг на зернистый перлит). Сталь с зернистым перлитом имеет более низкую твердость, предел прочности и более высокие значения относительного удлинения и сужения. Эвтектоидные и заэвтектоидные стали после отжига на зернистый перлит обладают наилучшей обрабатываемостью резанием, т.е. возможно применение больших скоростей резания и достигается высокая чистота поверхности.

Отжигу на зернистый перлит подвергают тонкие листы и прутки из низко- и среднеуглеродистой стали перед холодной штамповкой или волочением для повышения пластичности.» [5]

### **5.1.3 Нормализация (нормализационный отжиг).**

Нормализация «заключается в нагреве доэвтектоидной стали до температуры, превышающей точку  $A_{c3}$  на  $50^\circ\text{C}$ , а эвтектоидной и заэвтектоидной стали

выше  $A_{cm}$  также на  $50^{\circ}\text{C}$  (рисунок 25), непродолжительной выдержке для прогрева и завершения фазовых превращений и охлаждении на воздухе. Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию стали и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье или прокатке, ковке, штамповке.

Ускоренное охлаждение на воздухе приводит к распаду аустенита при более низких температурах, что повышает дисперсность феррито-цементитной структуры. В результате увеличивается прочность и твердость нормализованной средне- и высокоуглеродистой стали на  $10\div 15\%$  по сравнению с отожженной.»

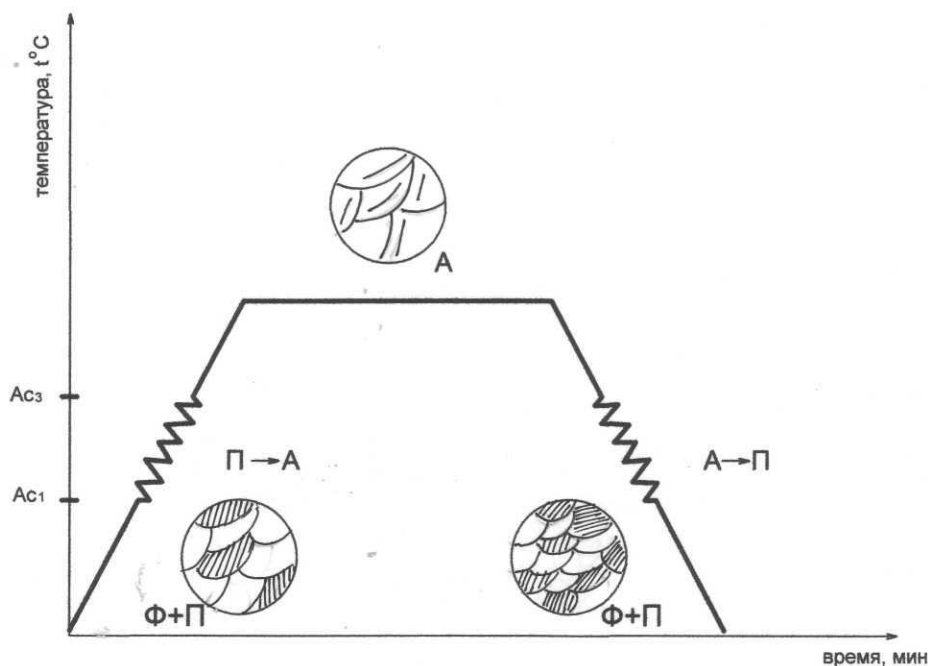


Рисунок 25 – График полного отжига доэвтектоидной стали

«Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига для снижения твердости и повышения пластичности. Для отливок из среднеуглеродистой стали нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска. Механические свойства будут несколько ниже, но изделия подвергнутся меньшей деформации, чем при закалке. Все низко- и среднеуглеродистые стали поставляются заводами в нормализованном состоянии.

Нормализацию с последующим высоким отпуском ( $600\div 650^{\circ}\text{C}$ ) применяют для исправления структуры легированных сталей.» [5]

## 5.2 Задание

1. Изучить теоретические сведения. Ознакомиться с изменениями структуры после различных видов термической обработки, заполнить таблицу 5, ориентируясь на рекомендации в таблице 6.

Таблица 5 – Таблица результатов

| Вид термической обработки | Цели термической обработки | Режим термической обработки | Металлы, подвергающиеся термообработке, структура |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| Отжиг I рода              |                            |                             |                                                   |
| Отжиг II рода             |                            |                             |                                                   |
| Нормализация              |                            |                             |                                                   |

Таблица 6 – Рекомендации по подбору температурного режима и охлаждающей среды при различных видах термообработки.

| Вид термообработки | Температура нагрева, °C                                                           |                                              | Охлаждающая среда                             |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                    | Доэвтектоидная сталь                                                              | Заэвтектоидная сталь                         |                                               |
| Отжиг              | $T_{отж} = t_{Ac3} + (30 \div 50^{\circ}C)$                                       | $T_{отж} = t_{Ac1} + (30 \div 50^{\circ}C)$  | В печи                                        |
| Нормализация       | $T_{норм} = t_{Ac3} + (50 \div 70^{\circ}C)$                                      | $T_{норм} = t_{Acм} + (50 \div 70^{\circ}C)$ | На спокойном воздухе                          |
| Закалка            | $T_{зак} = t_{Ac3} + (30 \div 50^{\circ}C)$                                       | $T_{зак} = t_{Ac1} + (70 \div 100^{\circ}C)$ | Углеродистые – в воде, легированные – в масле |
| Отпуск             | Ниже $t_{Ac1}$ (в зависимости от заданных свойств при $t=150 \div 650^{\circ}C$ ) |                                              | Для большинства сталей – на воздухе           |

2. Зарисовать фрагменты диаграммы состояния с нанесенными режимами нормализации и закалки

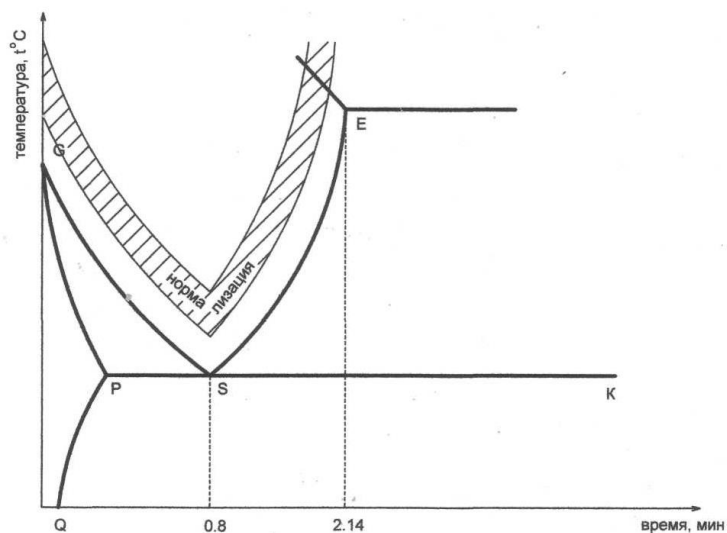


Рисунок 26 - Фрагмент диаграммы состояния с нанесенным режимом нормализации

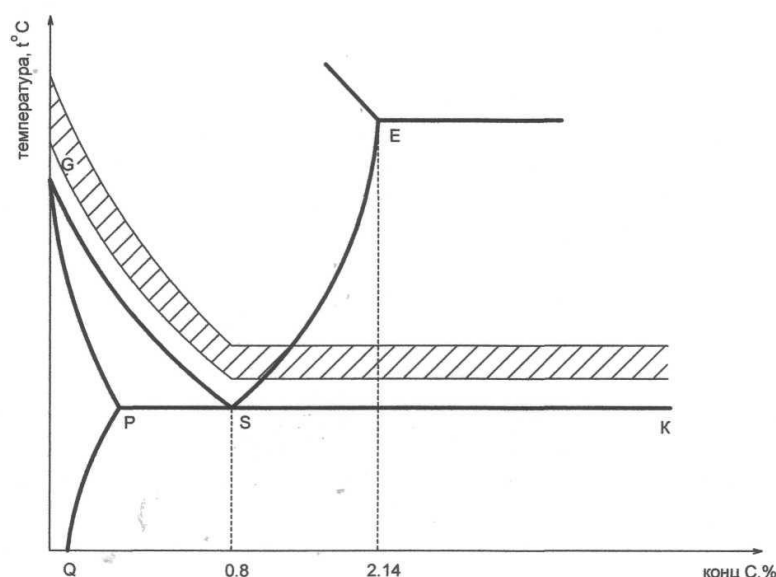


Рисунок 27 – Фрагмент диаграммы состояния Fe-C с нанесенными режимом закали.

4. Назначить термообработку, согласно варианту задания, в таблице 7.

Таблица 7 – Варианты заданий

| Вариант | Задание для назначения термообработки «Отжиг, нормализация»                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 1       | Назначьте термообработку детали из стали 30 для восстановления формы зерна. Опишите изменение структуры стали. Постройте график термической обработки в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин) .                                                                                                                |
| 2       | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали У8 с целью улучшения обрабатываемости резанием. Опишите изменение структуры стали. Постройте график термической обработки в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)                                                                           |
| 3       | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали 45 с целью измельчения зерен за счет полной перекристаллизации. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).                 |
| 4       | Назначьте термическую обработку для заготовки из стали 9ХС с целью снятия внутренних напряжений после предварительной механической обработки. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).      |
| 5       | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали 15 с целью восстановления первоначальной формы зерна после обработки давлением. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)). |

Продолжение таблицы 7

|   |   |
|---|---|
| 1 | 2 |
|---|---|

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6  | Назначьте термическую обработку заготовки стали 20ХН с целью снижения прочности и твердости за счет полной перекристаллизации. Опишите изменение структуры стали. Вычертите и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).            |
| 7  | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали У10 с целью понижения твердости перед обработкой давлением. Опишите изменение структуры стали. Вычертите и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).            |
| 8  | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали 50 с целью восстановления пластичности после обработки давлением. Опишите изменение структуры стали. Вычертите и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).      |
| 9  | Назначьте вид и режим термической обработки для отливки из стали 15Х18Н9Т с целью выравнивания химического состава. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).                       |
| 10 | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали 40Х с целью измельчения зерна. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).                                         |
| 11 | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали У9 с целью получения структуры зернистого перлита. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).                     |
| 12 | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали 35 с целью восстановления первоначальной формы зерна. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).                  |
| 13 | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали 45 с целью понижения твердости стали для улучшения обработки резанием. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)). |
| 14 | Назначьте вид и режим термической обработки для заготовки из стали 25 с целью получения мелкозернистой структуры. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).                         |
| 15 | Назначьте вид и режим термической обработки стали 07Х16Н6 с целью выравнивания химического состава. Опишите изменение структуры стали. Постройте и проанализируйте график термической обработки (график вычерчивается в координатах температура( $t^{\circ}\text{C}$ )-время (мин)).                                       |

## 5.5 Контрольные вопросы

1. Что такое термическая обработка?
2. Какова цель термической обработки?

3. Какую структуру приобретает сталь при изотермическом отжиге?
4. Как назначаются режимы термообработки?
5. Какие виды отжига вы знаете?
6. Что такое отжиг, для каких целей он проводится?
7. Как происходит охлаждение при отжиге?
8. Что такое нормализация?
9. Какую структуру имеют стали после отжига?
10. В чем сходство и в чем отличие отжига и нормализации?
11. С какой целью назначают закалку?

## Практическая работа № 6

### Тема: Закалка

**Цель работы:** Изучить влияние условий нагрева и охлаждения на свойства стали при термической обработке.

#### 6.1 Теоретические основы.

##### 6.1.1 Закалка

Закалка – «термическая обработка, которая заключается в нагревании стали до температуры выше точки  $A_{c3}$  на  $30-50^{\circ}\text{C}$  (для доэвтектоидных сталей) и  $A_{c1}$  на  $30-50^{\circ}\text{C}$  (для заэвтектоидных), выдержке и последующем охлаждении со скоростью, превышающей критическую.» На рисунке 27 (в практической работе №5) показан интервал температур закалки для доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей.

«В зависимости от режимов закалки (температуры нагревания, времени выдержки и скорости охлаждения) получают различную структуру, отвечающую заданным свойствам. Целью закалки является повышение твердости, износостойкости, прочности.

При нагреве доэвтектоидной стали выше точки  $A_{c3}$  на  $30-50^{\circ}\text{C}$  ее структура меняется. С исходной структуры перлит-феррит при нагревании она приобретает структуру аустенита, которая при последующем охлаждении со скоростью выше критической ( $v_{кр}$ ) превращается в мартенсит.» [7]

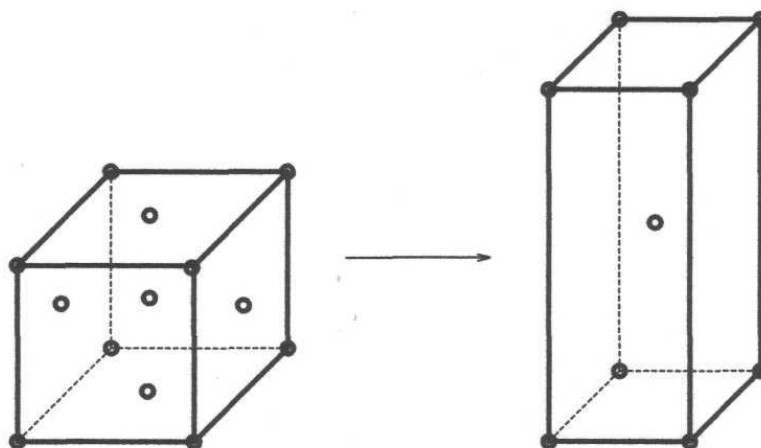


Рисунок 28 – Превращение ГЦК решетки аустенита в ОЦК искаженную решетку мартенсита.

Критическая скорость закалки неодинакова для различных сталей и зависит от устойчивости аустенита, определяемой составом стали. Чем больше его



устойчивость, тем меньше критическая скорость. Углеродистая сталь имеет высокую критическую скорость закалки ( $200 \div 800^\circ\text{C}/\text{с}$ ). Наименьшей величиной скорости закалки обладает эвтектоидная сталь. Легирующие элементы, повышая устойчивость аустенита, резко снижают критическую скорость закалки (кроме кобальта).

Для определения результатов охлаждения аустенита,  $v_{\text{кр}}$  и структуры строят диаграмму изотермического превращения аустенита (см. рис. 28 в практической работе №5).

Для получения максимальной твердости доэвтектоидной стали необходимо, чтобы скорость охлаждения аустенита была выше критической и произошло бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит. Превращение называется бездиффузионным, так как при нем не происходит диффузии углерода и состав фаз остается неизменным, происходит только перестройка ГЦК решетки аустенита в искаженную ОЦК решетку (тетрагональную) мартенсита (рис. 28).

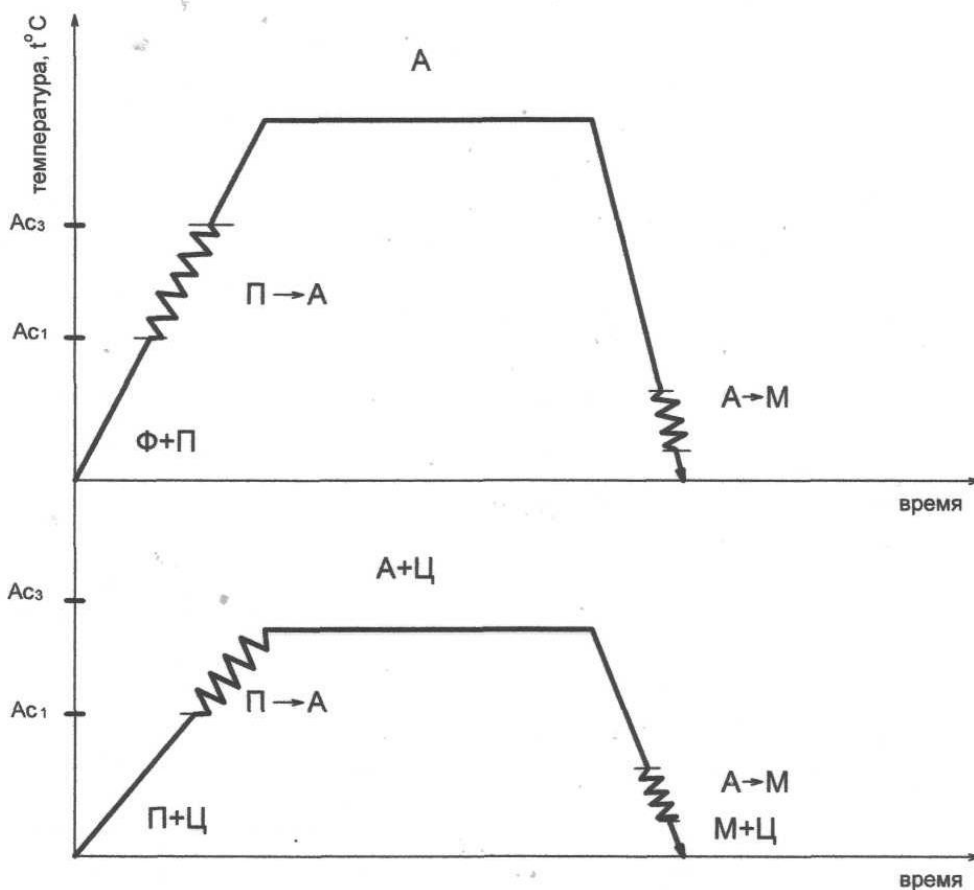


Рисунок 29 - График полной закалки (а) для доэвтектоидной стали и неполной закалки (б) для заэвтектоидной стали.

Углерода в мартенсите остается столько же, сколько в исходном аустените. Таким образом, *мартенсит* – «это пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ - железе, имеющий тетрагональную решетку.» [7]

*Мартенсит* – «твердая и хрупкая структура, имеет игольчатое строение. Чем больше в стали углерода, тем выше твердость мартенсита. При охлаждении стали со скоростью ниже критической ( $V_1 < V_2 < V_3 < V_{кр}$ ) происходит перлитное превращение, т.е. образуется ферритно-карбитная смесь - смесь зерен феррита и цементита, называемая перлит (при  $V_1$ ), сорбит (при  $V_2$ ), троостит (при  $V_3$ ). Эти структуры отличаются друг от друга степенью дисперсности - величиной зерен.»

*Троостит* – «более мелкая и твердая структура (40-45HRC), чем сорбит (30÷25 HRC), а сорбит более мелкая и твердая, чем перлит (10÷15HRC).» [7]

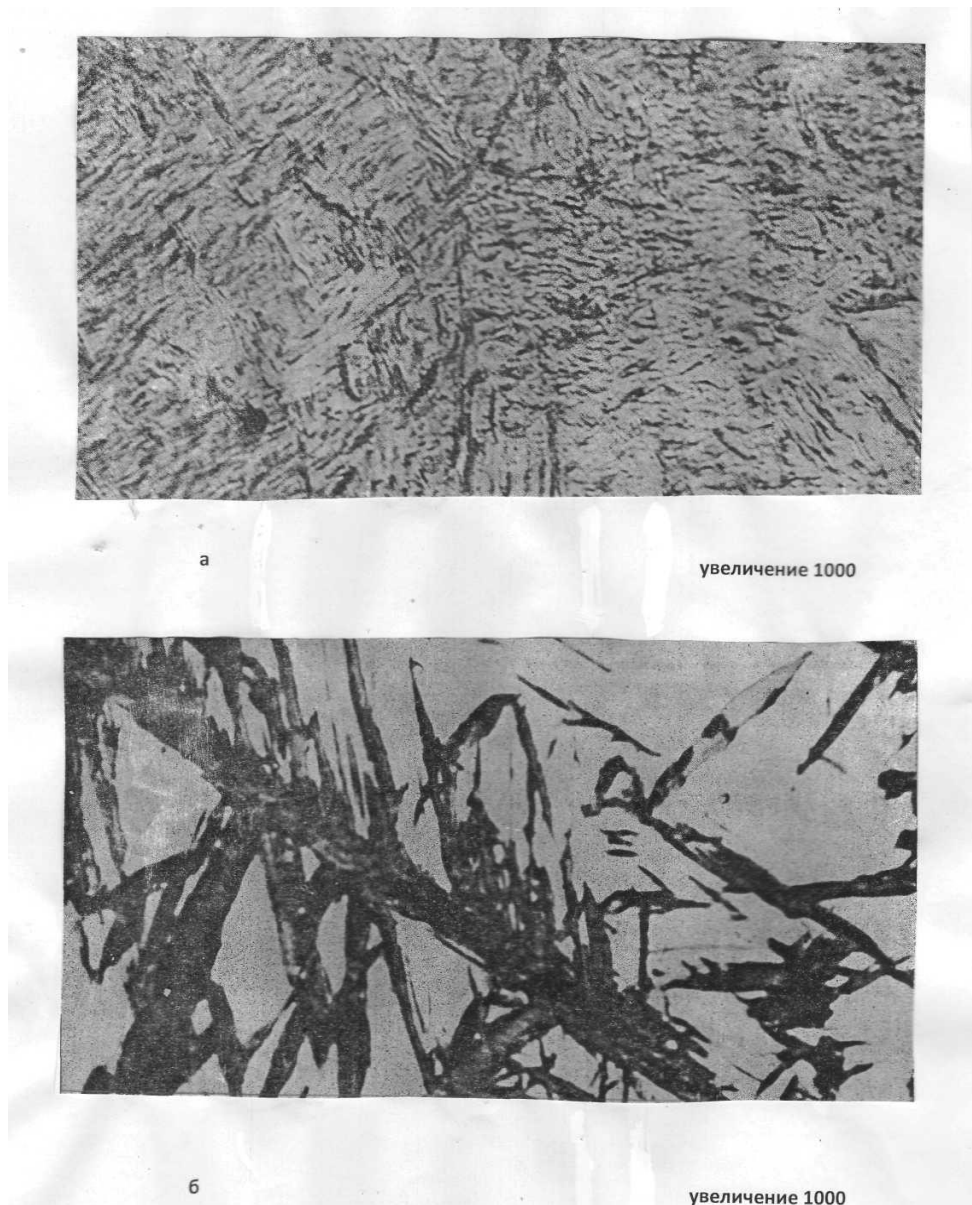


Рисунок 30 – Микроструктура стали после закалки:  
а – мартенсит, б – мартенсит+аустенит

Большая скорость охлаждения ( $V_{охл} > V_{кр}$ ) необходима для предотвращения перлитного или промежуточного превращения аустенита, т.е. предотвращения распада до точки мартенситного превращения. Мартенситное превращение протекает в интервале температур  $M_n - M_k$ , где  $M_n$  и  $M_k$  начало и конец мартенситного

превращения. Положение точек  $M_n$  и  $M_k$  обусловлено химическим составом аустенита. Чем больше в аустените углерода, тем ниже температура точек  $M_n$  и  $M_k$  (для высокоуглеродистых сталей  $M_n$  - 350°C,  $M_k$  - 120 °C, для низкоуглеродистых  $M_n$  - 200°C,  $M_k$  - 100 °C).

Для получения высокой твердости заэвтектоидных сталей делают так называемую неполную закалку (в отличие от полной для доэвтектоидных), т.е. нагревают выше  $A_{c1}$  на 30÷50°C (рис. 30, а,б). При таком нагреве образуется аустенит при сохранении зерен вторичного цементита. После охлаждения структура стали состоит из мартенсита и нерастворенных частиц карбидов (цементита), обладающих высокой твердостью (М+Ц).

В настоящее время разработаны инженерные методы расчета основных параметров - продолжительности и скорости нагрева, перепада температур по толщине металла и т.д. Результаты занесены в таблицы, их можно найти в различных справочниках.

В качестве охлаждающих средств при закалке используют воду, водные растворы солей и щелочей, масло. Как правило, углеродистые и низкоуглеродистые стали охлаждают в воде или водных растворах NaCl или NaOH, что дает более равномерное охлаждение, легированные стали - в минеральном масле (чаще нефтяном).

При изучении закалки важными понятиями являются закаливаемость и прокаливаемость.

Под *закаливаемостью* «понимают способность стали повышать твердость в процессе закалки. Закаливаемость зависит от содержания углерода, стали с низким содержанием углерода (08КП, 10, 10КП и т.д.) не повышают твердость в процессе закалки, т.е. не закаливаются, стали с содержанием углерода выше 0,25% в процессе закалки увеличивают твердость, т.е. закаливаются.» [7]

Под *прокаливаемостью* «понимают способность стали закаливаться на определенную глубину. За глубину прокаливаемости обычно принимают расстояние от поверхности до зоны с полумартенситной структурой (50% мартенсита и 50% троостита). Прокаливаемость определяют изменением твердости. Твердость стали с полумартенситной структурой зависит от содержания углерода (прокаливаемость повышается с увеличением содержания углерода).» [7]

Большинство легирующих элементов повышают прокаливаемость. Для повышения прокаливаемости углеродистые стали легируют марганцем, хромом, никелем и т.д. Прокаливаемость конкретной стали характеризуется критическим диаметром, т.е. максимально возможным диаметром образца, который после закалки имеет в середине полумартенситную структуру и высокую твердость. Чем выше критический диаметр, тем выше прокаливаемость стали. Прокаливаемость определяют методом торцевой закалки.

### 6.1.2 Структуры и дефекты закалки.

*Мартенситом* «называется микроструктура закаленной стали, представляющая пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе с тетрагональной решеткой. Мартенсит под микроскопом имеет светлое игольчатое строение. Чем мельче иглы мартенсита, тем выше свойства стали» [7] (рис. 9).

Мартенсит и феррит – «микроструктура стали, получаемая при нагревании доэвтектоидной углеродистой стали выше нижней критической точки  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$  (неполная закалка). При таком нагреве феррит не растворяется в аустените. Структура состоит из мартенсита и сетки феррита.» [7]

*Мартенсит и троостит закалки* – «микроструктура стали, закаленной с недостаточной скоростью охлаждения, например, в теплой воде. Состоит из темных полей троостита закалки и светлых игольчатых полей мартенсита. Троостит закалки имеет пониженную в сравнении с мартенситом твердость, шаровидную форму, а при больших увеличениях под электронным микроскопом имеет ясно выраженную структуру игольчатого пластинчатого перлита» (рисунок 9, а).

*Мартенсит и остаточный аустенит* – «микроструктура закаленной высокоуглеродистой легированной стали, состоит из темных игл мартенсита и светлых полей аустенита» [8] (рис. 9, б).

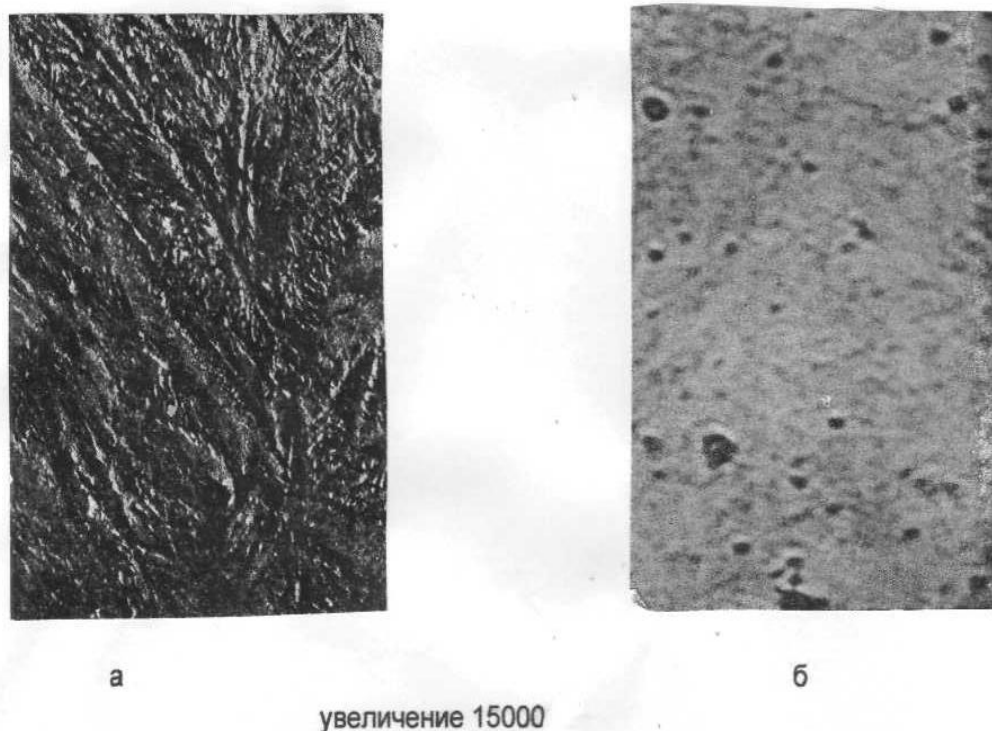


Рисунок 31 – Структура отпуска:  
а – отпущенный мартенсит, б – сорбит отпуска

Нередко при закалке возникают дефекты, которые негативно влияют на работу детали. К ним относятся: недостаточная твердость, мягкие пятна, повышенная хрупкость, обезуглероживание и окисление поверхности, коробление и деформации, трещины и т.д.

*Недостаточная твердость* «закаленной детали может быть следствием недостаточного нагрева или недостаточно интенсивного охлаждения. В первом случае мартенсит не обладает достаточной твердостью (не содержит достаточно углерода), во втором - не переохлаждается до мартенситного превращения и структура полностью или частично состоит из продуктов перлитного распада аустенита (троостит, сорбит). Для устранения данного дефекта необходима корректировка режимов термообработки (увеличение температуры и скорости охлаждения).» [3]

Образование *мягких пятен* также может происходить из-за недостаточного прогрева или недостаточно интенсивного охлаждения. Методы устранения их такие же, как и при устранении недостаточной твердости.

Также мягкие пятна могут образовываться из-за неоднородности исходной структуры, например из-за скоплений феррита. Для их устранения необходимо сделать предварительную термическую обработку (нормализацию), создающую более однородную структуру.

*Повышенная хрупкость* – «дефект, обычно появляющийся в результате закалки от слишком высоких температур (более высоких, чем требуется), при которых произошел значительный рост зерен аустенита. Дефект обнаруживается при механических испытаниях по излому или по микроструктуре. Устраняют дефект повторной закалкой от нормальных температур для данной стали.»

*Окисление и обезуглероживание* «поверхности часто происходит при нагреве в пламенных или электрических печах без защитной атмосферы. Контролируемая искусственная атмосфера в печах является радикальным способом устранения или уменьшения этого дефекта.» [1]

*Деформация, коробление, трещины* «являются следствием внутренних напряжений. Медленное охлаждение при закалке в области мартенситного превращения - самый эффективный способ уменьшения напряжений и устранения дефектов этого вида.»

*Трещины* – «неисправимый дефект. Для предупреждения их образования рекомендуется при конструировании изделий избегать резких выступов, заостренных углов, резких переходов от толстых сечений к тонким (места концентраторов напряжений); проводить закалку с возможно более низких температур путем охлаждения в двух средах.» [1]

*Деформация*, - «изменение размеров и формы изделий, и коробление - несимметричная деформация (поводка) - происходят при термической обработке в результате термических и структурных напряжений под действием неоднородных объемных изменений, вызванных неравномерным охлаждением и фазовыми превращениями.» [7]

Значительно уменьшить деформацию и коробление можно подбором соответствующего состава стали, условий и режимов термической обработки.

## 6.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретические сведения о термической обработке, влияние условий нагрева и охлаждения на структуру стали.

2. Назначить вид и режим термической обработки в соответствии с заданием и маркой стали.

Таблица 8 - Рекомендации по подбору температурного режима и охлаждающей среды при различных видах термообработки.

| Вид термообработки | Температура нагрева, °C                                                            |                                             | Охлаждающая среда                             |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                    | Дозвтектоидная сталь                                                               | Заэвтектоидная сталь                        |                                               |
| Отжиг              | $T_{отж} = t_{Ac3} + (30 \div 50^\circ C)$                                         | $T_{отж} = t_{Ac1} + (30 \div 50^\circ C)$  | В печи                                        |
| Нормализация       | $T_{норм} = t_{Ac3} + (50 \div 70^\circ C)$                                        | $T_{норм} = t_{Acм} + (50 \div 70^\circ C)$ | На спокойном воздухе                          |
| Закалка            | $T_{зак} = t_{Ac3} + (30 \div 50^\circ C)$                                         | $T_{зак} = t_{Ac1} + (70 \div 100^\circ C)$ | Углеродистые – в воде, легированные – в масле |
| Отпуск             | Ниже $t_{Ac1}$ (в зависимости от заданных свойств при $t = 150 \div 650^\circ C$ ) |                                             | Для большинства сталей – на воздухе           |

Таблица 9 – Марки стали

|                    |     |     |     |     |        |     |       |       |      |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-------|-------|------|
| Сталь              | 40  | 45  | 50  | 30  | 35     | 45X | 40Г2  | 45ХГА | 60Х2 |
| $A_{c1}, ^\circ C$ | 725 | 721 | 740 | 721 | 755    | 721 | 710   | 735   | 745  |
| $A_{c3}, ^\circ C$ | 910 | 825 | 810 | 900 | 910    | 815 | 810   | 745   | 750  |
| Сталь              | У10 | У7  | У8  | У12 | 15Х6СЮ | 9ХС | 20Х13 | Х12М  | ШХ15 |
| $A_{c1}, ^\circ C$ | 721 | 725 | 730 | 735 | 721    | 725 | 730   | 750   | 750  |
| $A_{ст}, ^\circ C$ | 800 | -   | -   | 820 | 800    | 870 | 940   | 810   | 900  |

4. Назначьте температурный режим закалки, с учетом данных, приведенных в таблице 8 и 9.

## 6.3 Задачи к практической работе

Таблица 10 – Варианты заданий

| Вариант | Задание для назначения термообработки «Закалка»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1       | <p>Назначьте виды и способы термической обработки детали из стали 45 (<math>A_{C1} = 725^\circ\text{C}</math>, <math>A_{C3} = 770^\circ\text{C}</math>) с целью получения высокой твердости. Нарисуйте график этой обработки и опишите изменения в структуре стали.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Инструменты из стали У11 закалены, первый от температуры <math>750^\circ\text{C}</math> и второй от температуры <math>850^\circ\text{C}</math>. Какой из инструментов правильно закален и почему?</li> <li>2. Какова структура стали 40 после правильной закалки?</li> <li>3. Какая из сталей - 40 или 50X - имеет более высокую прокаливаемость. Объясните причину.?</li> </ol>                                                                        |
| 2       | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 50 (<math>A_{C1}=730^\circ\text{C}</math>, <math>A_{C3}=760^\circ\text{C}</math>) с целью снятия остаточных напряжений без снижения твердости. Постройте график этой обработки и опишите изменения структуры стали.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Инструменты из стали У7 закалены: первый от температуры <math>760^\circ\text{C}</math>, а второй от температуры <math>850^\circ\text{C}</math>. Какой из инструментов закален правильно? Объясните причину.</li> <li>2. Какую структуру имеет сталь У12 после правильно проведенной закалки?</li> <li>3. Сталь 40 и 60 закалены правильно. У какой из сталей будет выше твердость? Объясните причину</li> </ol>                     |
| 3       | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 40X (<math>A_{C1}=743^\circ\text{C}</math>, <math>A_{C3}=782^\circ\text{C}</math>) с целью получения оптимального сочетания между прочностью и пластичностью. Постройте график этой обработки и опишите изменения структуры стали.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Инструменты из стали У7 закалены: первый от температуры <math>760^\circ\text{C}</math>, а второй от температуры <math>850^\circ\text{C}</math>. Какой из инструментов закален правильно? Объясните причину.</li> <li>2. Какую структуру имеет сталь У12 после правильно проведенной закалки?</li> <li>3. Сталь 40 и 60 правильно. У какой из сталей будет выше твердость? Объясните причину.</li> </ol>              |
| 4       | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 45Г2 (<math>A_{C1}=711^\circ\text{C}</math>, <math>A_{C3}=765^\circ\text{C}</math>) с целью снятия закалочных напряжений. Постройте график этой обработки.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Детали из стали 30 закалены от температур: первая – от <math>740^\circ\text{C}</math>, вторая – от <math>850^\circ\text{C}</math>. Выберите оптимальный режим нагрева под закалку, объясните почему. Постройте график необходимой термической обработки, опишите изменения структуры.</li> <li>2. Какую структуру имеет сталь 60Г после правильно проведенной закалки?</li> <li>3. Какая из сталей – 10 или У10 – может быть подвергнута закалке, а какая нет. Объясните причину.</li> </ol> |
| 5       | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 40 (<math>A_{C1}=727^\circ\text{C}</math>, <math>A_{C3}=788^\circ\text{C}</math>) с целью получения оптимального сочетания между прочностью и вязкостью. Постройте график этой обработки и опишите изменения структуры стали.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Детали из стали 35 закалены от температур <math>750^\circ\text{C}</math> и <math>850^\circ\text{C}</math>. Какому режиму следует отдать предпочтение и почему?</li> <li>2. Какую структуру имеет сталь 55 после правильно проведенной закалки и высокого отпуска?</li> <li>3. У какой из сталей – 35Г или 55 – критический диаметр больше и почему?</li> </ol>                                                            |

Продолжение таблицы 10

| 1  | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6  | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 35 (<math>A_{C1}=730^{\circ}\text{C}</math>, <math>A_{C3}=802^{\circ}\text{C}</math>) с целью улучшения механических свойств. Опишите изменение структуры и Постройте график этой обработки</p> <p>1. Детали из стали 30 закалены от температур: первая – от <math>740^{\circ}\text{C}</math>, вторая – от <math>850^{\circ}\text{C}</math>. Выберите оптимальный режим нагрева под закалку, объясните почему. Постройте график необходимой термической обработки, опишите изменения структуры.</p> <p>2. Какую структуру имеет сталь 60Г после правильно проведенной закалки?</p> <p>3. Какая из сталей – 10 или У10 – может быть подвергнута закалке, а какая нет. Объясните причину.</p> |
| 7  | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 30ХГСА (<math>A_{C1}=730^{\circ}\text{C}</math>, <math>A_{C3}=840^{\circ}\text{C}</math>) с целью получения оптимального сочетания твердости и пластичности. Постройте график этой обработки.</p> <p>1. Образцы из стали 50 и У9 закалили с температуры <math>760^{\circ}\text{C}</math>. Какой из этих образцов будет иметь максимально возможную для данной стали твердость и почему?</p> <p>2. Какая термическая обработка была выполнена, если сталь У9 имеет структуру мартенсит и цементит?</p> <p>3. У какой из сталей – 35ХГС или 30 – критический диаметр больше и почему?</p>                                                                                                     |
| 8  | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 60С2 (<math>A_{C1}=750^{\circ}\text{C}</math>, <math>A_{C3}=820^{\circ}\text{C}</math>) с целью повышения упругих свойств. Постройте график этой обработки.</p> <p>1. Образцы из стали 45 и У8 закалили с температуры <math>770^{\circ}\text{C}</math>. Какой из этих образцов будет иметь мартенситную структуру и почему?</p> <p>2. Какая термическая обработка была проведена у стали 45, если полученная структура – сорбит отпуска?</p> <p>3. У какой из сталей – 40ХН или 50 – критический диаметр больше и почему?</p>                                                                                                                                                               |
| 9  | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали У8 (<math>A_{C1}=730^{\circ}\text{C}</math>) с целью снижения внутренних напряжений. Постройте график этой термообработки и опишите изменения структуры стали.</p> <p>1. Детали из стали 50 закалены: первая от температуры <math>740^{\circ}\text{C}</math>, а вторая от температуры <math>820^{\circ}\text{C}</math>. Какая из этих деталей имеет более высокую твердость и почему?</p> <p>2. Какую структуру имеет сталь У12 после правильно проведенной закалки?</p> <p>3. У какой из сталей – 40 или 30ХВГ – критический диаметр больше и почему?</p>                                                                                                                                  |
| 10 | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали У7 (<math>A_{C1}=730^{\circ}\text{C}</math>) с целью повышения твердости и износостойкости. Постройте график этой обработки и опишите изменения структуры стали.</p> <p>1. Сталь 30 подвергли закалке от температур <math>750^{\circ}\text{C}</math> и <math>850^{\circ}\text{C}</math>. Какая из температур выбрана правильно для нагрева под закалку и почему?</p> <p>2. Какую структуру имеет сталь У11 после правильно проведенной закалки?</p> <p>3. У какой из сталей – 50ХН или 60 – выше прокаливаемость и почему?</p>                                                                                                                                                              |
| 11 | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали У10 (<math>A_{C1}=730^{\circ}\text{C}</math>, <math>A_{C3}=800^{\circ}\text{C}</math>) с целью повышения твердости и износостойкости. Постройте график этой обработки и опишите изменения структуры стали.</p> <p>1. Сталь У12 закалена от температур <math>760^{\circ}\text{C}</math> и <math>840^{\circ}\text{C}</math>. Выберите оптимальный режим нагрева под закалку и объясните почему.</p> <p>2. Какую структуру имеет сталь 35 после правильно проведенной закалки?</p> <p>3. У какой из сталей – 50 или 50ХН – выше прокаливаемость и почему?</p>                                                                                                                                  |



## Продолжение таблицы 10

| 1  | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали У12 (<math>A_{C1}=730^{\circ}\text{C}</math>, <math>A_{CT}=820^{\circ}\text{C}</math>) с целью снятия остаточных напряжений без снижения твердости. Постройте график этой обработки и опишите изменения структуры стали.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сталь 45 закалена от температур <math>740^{\circ}\text{C}</math> и <math>810^{\circ}\text{C}</math>. Выберите оптимальный режим нагрева под закалку и объясните почему.</li> <li>2. Какую структуру имеет сталь У10 после правильно проведенной закалики?</li> <li>3. У какой стали – 40 или 40Г2 – выше прокаливаемость и почему?</li> </ol> |
| 13 | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 9ХС (<math>A_{C1}=770^{\circ}\text{C}</math>, <math>A_{CT}=870^{\circ}\text{C}</math>) с целью повышения твердости и износостойкости. Постройте график этой обработки.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сталь 45 закалена от температур <math>740^{\circ}\text{C}</math> и <math>810^{\circ}\text{C}</math>. Выберите оптимальный режим нагрева под закалку и объясните почему.</li> <li>2. Какую структуру имеет сталь У10 после правильно проведенной закалики?</li> <li>3. У какой стали – 40 или 40Г2 – выше прокаливаемость и почему?</li> </ol>                                                   |
| 14 | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали ХВГ (<math>A_{C1}=750^{\circ}\text{C}</math>, <math>A_{CT}=940^{\circ}\text{C}</math>) с целью снятия закалочных напряжений. Постройте график этой обработки.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сталь 40 закалена от температур <math>750^{\circ}\text{C}</math> и <math>830^{\circ}\text{C}</math>. Какому режиму следует отдать предпочтение и почему?</li> <li>2. Какую структуру имеет сталь У8 после правильно проведенной закалики?</li> <li>3. У какой стали – 30 или 30Х – выше прокаливаемость и почему?</li> </ol>                                                                             |
| 15 | <p>Назначьте виды и режим термической обработки для детали из стали 65Г (<math>A_{C1}=727^{\circ}\text{C}</math>, <math>A_{C3}=745^{\circ}\text{C}</math>) с целью улучшения механических свойств. Постройте график этой обработки.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Инструменты из стали У10 закалены, первый от температуры <math>760^{\circ}\text{C}</math>, второй – от температуры <math>850^{\circ}\text{C}</math>. Какой из инструментов закален правильно и почему?</li> <li>2. Какую структуру имеет сталь 30 после правильно проведенной закалики?</li> <li>3. У какой из сталей – 40 или 40Х – выше прокаливаемость? Объясните причину.</li> </ol>               |

### 6.5 Контрольные вопросы

1. Что такое термическая обработка? 2. Что называется режимом термообработки?
2. Что такое закалка?
3. Как назначаются термические режимы закалики?
4. Какие виды закалики вы знаете?
5. В каких случаях назначают ступенчатую закалку?
6. Что такое изотермическая закалка?
7. Назовите закалочную среду после индукционного нагрева.
8. В каких случаях используют ТВЧ?
9. Что такое прокаливаемость?
10. Что такое закаливаемость?

## Практическая работа № 7

### Тема: Отпуск закаленной стали

**Цель работы:** Изучение влияния различных видов отпуска на структуру и механические свойства закаленной стали.

#### 7.1 Теоретические основы.

##### 7.1.1 Общие сведения об отпуске.

*«Заключительной операцией термической обработки является отпуск стали, который включает в себя: нагрев закаленной стали до температур, лежащих ниже критической точки  $A_1$ ; выдержку при данной температуре; последующее охлаждение с заданной скоростью.»*

При отпуске формируются окончательная структура и свойства изделия.

Отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке. Эти напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска.

Наиболее интенсивно напряжения снижаются в результате выдержки в течение 15-30 мин. После выдержки в течение 1,5 ч напряжения снижаются до минимальной величины, которая может быть достигнута отпуском при данной температуре.

Скорость охлаждения после отпуска не изменяет структуру стали, однако во избежание получения термических напряжений охлаждение ведут замедленное (на воздухе). Охлаждение на воздухе дает напряжения на поверхности в 7 раз меньше, а охлаждение в масле - в 2,5 раза меньше по сравнению с напряжениями при охлаждении в воде. Однако изделия из легированных сталей, склонных к обратимой отпускной хрупкости, после отпуска при температуре 500-650°C следует охлаждать быстро.

Структура стали после закалки состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Обе структурные составляющие являются неустойчивыми и при нагреве будут стремиться перейти в более устойчивое состояние, т. е. в структуру феррито-цементитной смеси. Мартенсит является структурой, обладающей наибольшим объемом, а аустенит - структурой с минимальным объемом, поэтому превращения должны совершаться с объемными изменениями. При превращении мартенсита объем будет уменьшаться (сжатие образца), а при превращении аустенита - увеличиваться (расширение образца).

Превращения при отпуске хорошо видны на дилатометрической кривой, показывающей изменение длины образца в зависимости от температуры нагрева» (рис. 32).

«В соответствии с объемными изменениями, происходящими при отпуске углеродистых сталей, выделяют три температурных интервала (три превращения). Температурные границы превращений условны, их положение зависит от скорости нагрева, длительности, выдержки и состава стали.» [9]

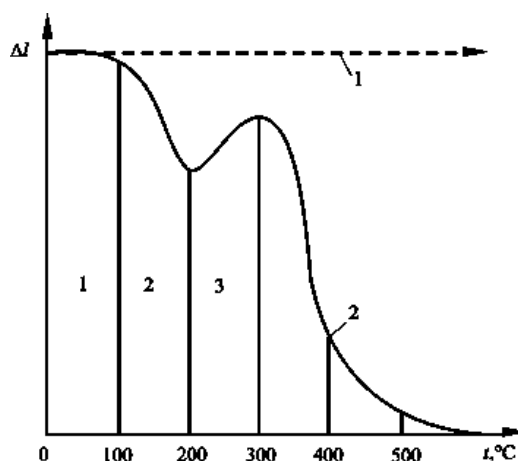


Рисунок 32 - Дилатометрическая кривая отпуска углеродистой стали: 1 - отожженной; 2 - закаленной. Исходная структура  $M_3 + A_{\text{ост}}$

«Нагрев мартенсита до  $80^\circ\text{C}$  не вызывает заметных изменений в структуре и на дилатометрической кривой. Начиная от  $80^\circ\text{C}$  и до  $200^\circ\text{C}$  наблюдается сокращение длины. Это будет, так называемое, *первое превращение при отпуске*. Рентгеновский анализ показал, что в этом интервале температур постепенно уменьшается параметр  $c$  решетки мартенсита; соотношение параметров решетки (отношение  $c/a$ ) стремится к единице.

В результате первой стадии (первого превращения при отпуске) образуется структура, называемая *отпущенным мартенситом*. Кристаллы отпущенного мартенсита сохраняют ту же морфологию, что и исходный мартенсит, но плотность дефектов в них меньше. По микроструктуре распад мартенсита при первом превращении выявляется потемнением игл мартенсита.

Дальнейший нагрев выше  $200^\circ\text{C}$  приводит к увеличению объема, что связано с превращением остаточного аустенита в отпущенный мартенсит. Это, так называемое, *второе превращение при отпуске* захватывает интервал температур  $200\text{--}300^\circ\text{C}$ .

Выделение углерода уменьшает тетрагональность кристаллической решетки мартенсита, в результате чего остаточный аустенит получает возможность увеличить объем и превратиться в мартенсит отпуска. Это превращение - диффузионное и по своей природе похоже на бейнитное превращение первичного аустенита. К концу второго превращения  $\alpha$ -твердый раствор (мартенсит) содержит еще около  $0,15\text{--}0,20\%$  углерода, т. к. в температурном интервале второго превращения продолжается распад мартенсита.

При температуре  $300\text{--}400^\circ\text{C}$  в углеродистых сталях происходит *третье превращение*. При этих температурах обеспечивается уже диффузионное перераспределение углерода, которое происходит путем растворения мелких неустойчивых карбидных частичек в мартенсите, диффузии углерода через  $\alpha$ -твердый раствор (мартенсит) к более крупным устойчивым частицам карбида и последующего роста этих обособленных крупных частиц за счет непрерывного

притока углерода. При этом также происходит превращение карбида  $\text{Be}_2\text{C}$  в карбид  $\text{Fe}_3\text{C}$ , т. е. в цементит. Частички цементита, как правило, выявляются по границам зерен и иглам мартенсита.

Полное выделение углерода из  $\alpha$ -твердого раствора (мартенсита) способствует снятию внутренних напряжений (напряжений второго рода), возникающих в стали в связи с объемными изменениями, вызванными распадом мартенсита и остаточного аустенита. Структуру, образующуюся после отпуска при 300-400°C, называют *трооститом отпуска*. Дальнейший нагрев выше 400°C приводит к коагуляции цементитных частиц и укреплению блоков мозаичной структуры феррита.

При температурах 500-600°C структура феррито-цементитной смеси имеет зернистое строение средней степени дисперсности, которая называется *сорбитом отпуска*. При температурах 650-700°C феррито-цементитная смесь имеет грубодисперсное зернистое строение и называется перлитом.

Превращения при отпуске протекают в очень малых объемах (внутри мартенситных игл), поэтому обычный микроструктурный анализ не позволяет выявить происходящих структурных изменений до температур отпуска порядка 550°C.

Структуры троостита и сорбита отпуска при обычном рассмотрении в микроскоп с увеличением в 500-600 раз трудно отличить от структуры мартенсита, т. к. эти структуры сохраняют мартенситную ориентировку, и только при увеличении в 1000 и более раз отчетливо видно строение сорбита. При нагреве выше 550°C мартенситная ориентировка пропадает.

Следует указать на существенное различие феррито-цементитных смесей, полученных в результате распада аустенита или мартенсита. В феррито-цементитной смеси (троостит закалки или сорбит закалки), получающейся при распаде аустенита, цементит имеет пластинчатую форму, а в получающейся при распаде мартенсита этой же смеси, при температуре 400°C и выше, цементит имеет зернистую форму.

Различная форма цементита в феррито-цементитной смеси предопределяет и различие в свойствах. При одинаковых твердости, пределе прочности и относительном удлинении сталь с зернистой структурой имеет более высокие значения предела текучести, относительного сужения и ударной вязкости.» [9]

### 7.1.2 Влияние легирующих элементов.

Легирующие элементы оказывают существенное влияние на диффузионные процессы, происходящие при отпуске закаленной стали. Они не только обладают низкой диффузионной подвижностью, но и снижают диффузионную подвижность атомов железа, углерода и дефектов решетки.

Легирующие элементы не оказывают существенного влияния на процесс промежуточного карбидообразования и обеднение окружающих мартенситных областей, т.е. на двухфазный процесс распада.

Легирующие элементы могут существенно влиять на вторую стадию рас-

пада мартенсита, поддерживая пересыщение мартенсита и замедляя рост карбидных частиц. В углеродистой стали после отпуска при температуре 300°C тетрагональность  $\alpha$ -раствора почти полностью исчезает. При содержании в  $\alpha$ -растворе:

- 2,0% молибдена температура распада мартенсита повышается на 100°C;
- при легировании 1,9% V и 1,4% Ti температура распада повышается на 150°C;
- при совместном легировании хромом и вольфрамом - на 200°C;
- значительно задерживают распад мартенсита кобальт и кремний.

Легирующие элементы особенно значительно влияют на процесс коагуляции карбидов при температурах выше 450°C.

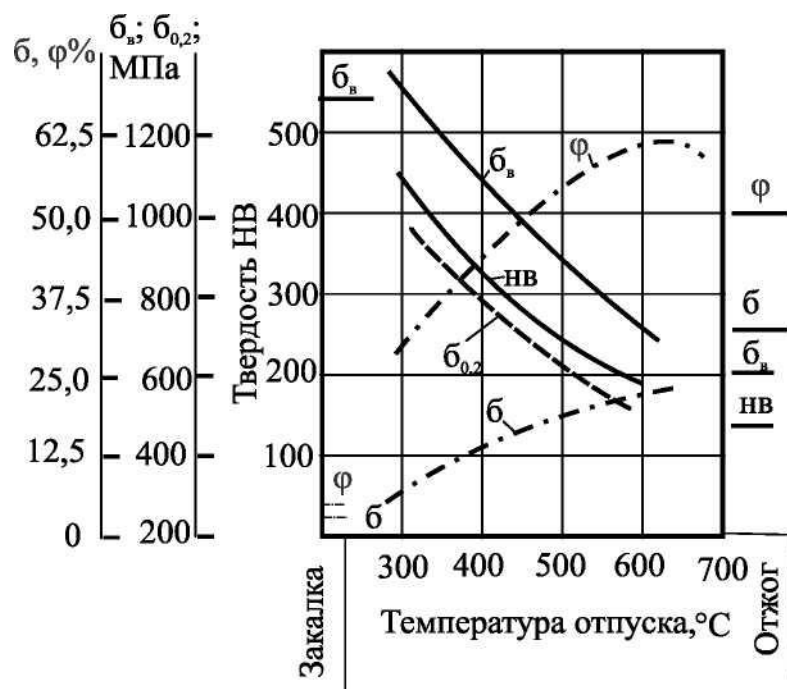


Рисунок 33 - Механические свойства стали 40 в зависимости от температуры отпуска.

При значительном легировании стали карбидообразующими элементами (Сг, W, Мо, V) возможно образование специальных карбидов ( $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_2C$ ). Специальные карбиды значительно дисперснее, чем цементит, поэтому выделение их является главной причиной появления *вторичной твердости при отпуске*. Большинство легирующих элементов повышают температурную область распада остаточного аустенита до 500-600°C.

В высоколегированных сталях (высокохромистых, быстрорежущих) распад остаточного аустенита происходит не при температуре отпуска, а во время охлаждения. Причиной этого является выделение карбидов во время выдержки при температуре отпуска, в результате чего устойчивость аустенита и температура мартенситного превращения понижаются. Поэтому распад остаточного аустенита происходит во время охлаждения до комнатной температуры. Продуктом распада является мартенсит.

Таким образом, в зависимости от температуры нагрева в процессе отпуска формируются следующие структуры: отпущенный мартенсит, троостит и сорбит отпуска; при этом соответственно изменяются механические свойства стали (рис. 33).

Как видно из рисунка 33, с повышением температуры отпуска предел прочности и твердость понижаются, а пластичность и ударная вязкость повышаются.

В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к изделиям, применяют следующие виды отпуска:

- низкий;
- средний;
- высокий.

*Низкий отпуск* – «нагрев закаленной стали до 150-200°C. Время выдержки при этом рекомендуется 2-3 ч. Выдержка должна обеспечить получение стабильной структуры для данной температуры отпуска.

Низкий отпуск применяется для частичного снятия внутренних напряжений, повышения вязкости и пластичности стали без заметного снижения твердости. Этому виду отпуска подвергают детали, для которых требуется высокая твердость и износоустойчивость (измерительный и режущий инструмент, изделия из цементуемых сталей).» [9]

*Структура стали* – «отпущенный мартенсит, твердость которого лежит в пределах HRC 56-64.»

*Средний отпуск* – «нагрев закаленной стали до 300-400°C. Время выдержки рекомендуется 1-2 ч. При этом отпуске обеспечивается относительно высокая твердость изделия HRC 40-45 и максимальный предел упругости при достаточном пределе прочности. Этот вид отпуска чаще всего применяют при изготовлении рессор и пружин. После среднего отпуска получают структуру троостита отпуска.» [9]

*Высокий отпуск* – «нагрев закаленной стали до 500-600°C. Время выдержки рекомендуется 0,5-1 ч. Структура стали после высокого отпуска - сорбит отпуска, твердость HRC 30-32. Высокий отпуск обеспечивает более полное снятие напряжений и дает наилучшее сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости. Этот отпуск применяют при изготовлении шатунов, ответственных крепежных изделий и деталей машин, изготавливаемых из конструкционных сталей.» [9]

Двойная термическая обработка, состоящая из закалки и последующего высокого отпуска, значительно улучшающая общий комплекс механических свойств, является основным видом термической обработки конструкционных сталей и называется *улучшением*.

Отпуск некоторых легированных сталей при температурах 250–400 °C и 500–650 °C позволяет снизить ударную вязкость (рис. 34). Это снижение вязкости называется *отпускной хрупкостью*. Первый тип отпускной хрупкости, называемый *отпускной хрупкостью первого типа*, наблюдается в результате отпуска при температуре 250-400°C.

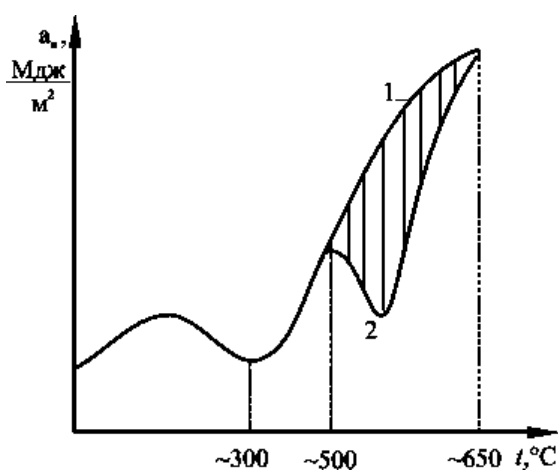


Рисунок 34 - Изменение ударной вязкости легированной стали от температуры отпуска:

1 - при быстром охлаждении; 2 - при медленном охлаждении

Причиной отпускной хрупкости первого рода является распад мартенсита с неоднородным выделением карбидов по границам и в объеме зерна; больше карбидов выделяется в пограничных слоях, что и вызывает хрупкое разрушение с характерным межкристаллитным изломом по границам бывших аустенитных зерен. Отличительной особенностью хрупкости первого рода является ее необратимый характер; повторный отпуск при этой же температуре не улучшает вязкости.

При увеличении температуры выше 400°C распад мартенсита распространяется и в глубь зерна, в результате чего структура выравнивается и хрупкость устраняется, но при этом снижается твердость. Повторный нагрев при 250-400°C отпускной хрупкости не вызывает. Кроме легированных сталей, отпускная хрупкость первого рода свойственна и углеродистым сталям.

*Отпускная хрупкость второго рода* при температуре 500-650°C возникает только в том случае, если охлаждение после нагрева - медленное (в печи или на воздухе). Причиной хрупкости является выделение по границам зерен каких-либо фаз (фосфидов, карбидов, нитридов и др.). При быстром охлаждении после нагрева (в воде или масле) эти фазы выделиться не успевают и хрупкости не наблюдается. Характерной особенностью отпускной хрупкости второго рода является ее обратимость. Хрупкость, возникающая в результате медленного охлаждения с температур 500-650°C, может быть устранена повторным отпуском с последующим быстрым охлаждением или может быть вызвана вновь дополнительным отпуском определенной длительности при температуре 500-550°C.

Наиболее восприимчивы к отпускной хрупкости второго рода стали, содержащие повышенное количество фосфора или марганца, а также хромомарганцевые и хромоникелевые стали. Введение в сталь небольшого количества молибдена (0,2-0,3%) или вольфрама (0,50,7%) значительно уменьшает склонность стали к отпускной хрупкости второго рода.

### 7.1.3 Старение.

Основным процессом при старении и отпуске большинства закаленных промышленных сплавов является распад метастабильного твердого раствора. При этом сплав переходит в более устойчивое состояние, хотя обычно далекое от истинного равновесия, которое характеризуется абсолютным минимумом энергии Гиббса. Процессы распада пересыщенного раствора в закаленном сплаве протекают самопроизвольно с выделением теплоты превращения.

Тот факт, что сплав нагревается, не противоречит представлению о самопроизвольных процессах, происходящих в сплаве при старении и отпуске, так как нагрев необходим лишь для ускорения диффузии, лежащей в основе всех структурных изменений при распаде пересыщенных растворов.



Рисунок 35 - Приграничные зоны, свободные от выделений (светлые), в титановом сплаве ВТ 15

*Старение* – «это термическая обработка, при которой в сплаве, подвергнутом закалке без полиморфного превращения, главным процессом является распад пересыщенного твердого раствора.» [9]

При старении некоторых сплавов (алюминиевых, титановых, железных, никелевых и др.) вблизи границ зерен матричного твердого раствора распада не происходит и отчетливо видны зоны, свободные от выделений (рис. 35). В алюминиевых сплавах ширина таких зон составляет обычно от сотых до десятых долей микрометра, и они видны только в электронном микроскопе. В титановых  $\beta$ -сплавах после старения зоны, свободные от выделений, имеют ширину порядка нескольких микрометров и хорошо видны только в световом микроскопе.

Существование приграничных зон, свободных от продуктов распада раствора, не противоречит положению о том, что границы зерен облегчают зарождение выделений новой фазы. Речь идет не о самой границе, а о примыкающей к ней приграничной области. Часто можно наблюдать выделения непосредственно на границе зерна и рядом с ними приграничную зону, свободную от выделений.

*Образование зон Гинье-Престона.* «У дисперсионно-твердеющих алюминиевых сплавов и бериллиевых бронз при комнатной температуре сразу после



закалки растет электросопротивление. Это объясняют образованием в пересыщенном твердом растворе скоплений атомов легирующих элементов - кластеров, рассеивающих электронные волны. Возможно, что часть кластеров успевает образоваться уже в период закалочного охлаждения. Вначале размер кластера очень мал, и структурные методы их не выявляют. Через некоторое время кластеры могут вырасти настолько, что они вызывают дифракционные эффекты на дифрактограммах монокристаллов и электронограммах при просвечивании фольг. Кластеры, обнаруживаемые структурными методами, называют *зонами Гинье-Престона*.» [9]

*Выбор температуры и продолжительности старения.* «После предварительной оценки температурного уровня старения или по аналогии с другими сплавами на базе того же металла экспериментально отработывают режим старения, выстраивая графики свойство-температура (время) старения.

Как уже отмечалось, старение подразделяют на *естественное*, происходящее при комнатной температуре, и *искусственное*, требующее нагрева до определенной температуры.»

В большинстве стареющих сплавов вылеживание при комнатной температуре после закалки не дает такого изменения свойств, которое можно было бы практически использовать. Механические свойства закаленных медных, никелевых и многих других сплавов вообще не изменяются при комнатной температуре, так как она слишком низкая для достаточного развития в них диффузионных процессов.

В алюминиевых сплавах (дуралюминах и др.) образование зон ГП при естественном старении приводит к сильному упрочнению, что широко используют в промышленности.

Понятия «естественное» и «искусственное» старение характеризуют условия его проведения, но однозначно не определяют характер структурных изменений в пересыщенном твердом растворе. У большинства сплавов при естественном старении образуются только кластеры. В то же время при искусственном старении в зависимости от его температуры и продолжительности распад раствора останавливается или на зонной стадии, или на стадии выделения промежуточных фаз, либо доходит до укрупнения выделений стабильной фазы.

Для зонного старения алюминиевых сплавов характерны большое относительное удлинение ( $\delta > 10-15\%$ ), значительная разница между временным сопротивлением и пределом текучести ( $\sigma_{0,2}/\sigma_v = 0,7-0,8$ ), высокое сопротивление удару и стойкость против коррозии под напряжением. Зонное старение бывает только упрочняющим.

Фазовое старение может быть упрочняющим и разупрочняющим (перестаривание). Для упрочняющего фазового старения характерны пониженное относительное удлинение, малая разница между временным сопротивлением и пределом текучести ( $\sigma_{0,2}/\sigma_v = 0,8-0,95$ ), пониженные ударная вязкость и стойкость против коррозии под напряжением.

При выборе оптимального режима старения часто исходят из требования достичь максимальной прочности. Но для многих изделий критерием оптимальности режима старения служит не максимальная прочность, а сочетание разных

свойств.

Бериллиевая бронза и алюминиевый сплав 1915 на базе системы Al - Zn - Mg сильно упрочняются при старении, а магниевый сплав МЛ5 упрочняется слабо, поэтому его чаще используют в закаленном состоянии.

#### **7.1.4 Обработка холодом.**

При закалке аустенитно-мартенситное превращение протекает не полностью и в стали сохраняется некоторое количество аустенита. По мере увеличения в стали содержания С или легирующих элементов количество остаточного аустенита существенно возрастает.

Обработка холодом (при минусовых температурах), впервые предложенная А.П. Гуляевым, применяется для сталей, у которых после закалки сохраняется значительное количество остаточного аустенита. Как указывалось, ранее, мартенситное превращение у сталей, содержащих более 0,6% С, заканчивается ниже обычной температуры.

При обработке холодом закаленные изделия подвергают охлаждению ниже нуля (-40; -190° С). Температура обработки холодом выбирается в зависимости от химического состава стали. Для предотвращения стабилизации аустенита, снижающей эффект обработки, охлаждение следует проводить непосредственно после закалки.

Обработка стали холодом:

- повышает износоустойчивость и режущую способность инструментов из быстрорежущей и других инструментальных сталей;
- стабилизирует размеры измерительного инструмента и деталей для работы при низких температурах;
- повышает твердость и износоустойчивость многих изделий, изготовленных из высокоуглеродистых легированных и нержавеющей сталей.

Для деталей сложной формы перед обработкой холодом применяют отпуск, что устраняет закалочные напряжения и предотвращает возникновение трещин и коробления.

Низкие температуры при обработке холодом получают, применяя жидкий кислород, азот или воздух, а также смеси сухого льда с ацетоном и т. д.

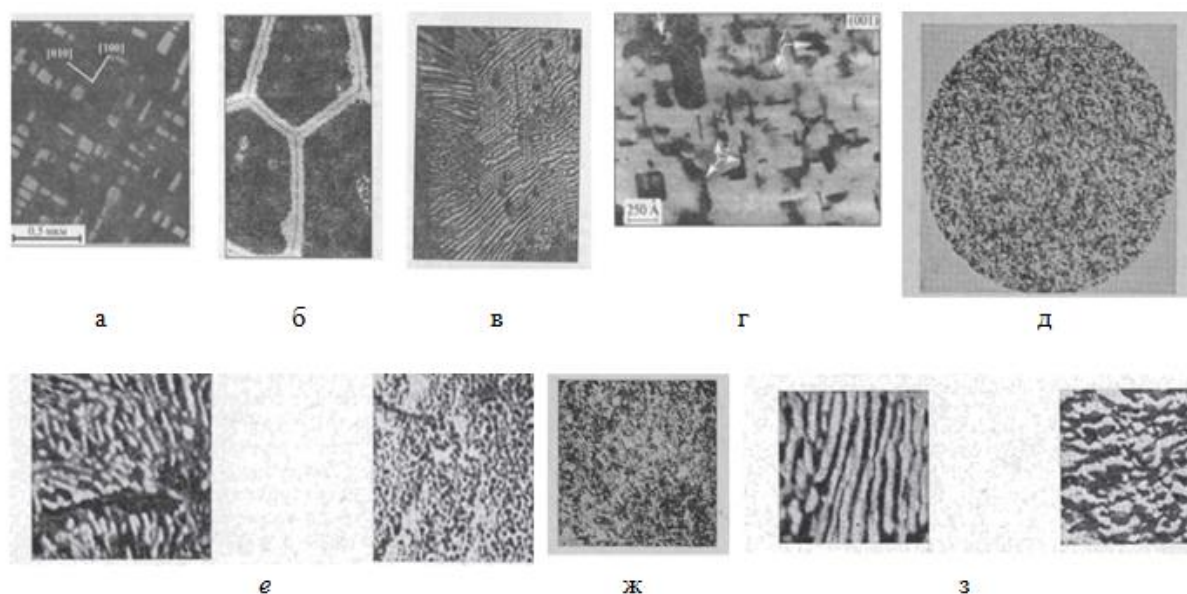


Рисунок 36 - Структура после отпуска и старения:

а - модулированная структура в сплаве Ni - 6,7% Al, состаренном при 750°C в течение 96 ч; б - приграничные зоны, свободные от выделений, в титановом сплаве ВТ 15; в - колонии прерывистого распада в сплаве Ni - 20% Cr - 9% N, г - пластинки  $\theta$ -фазы, перпендикулярные (7) и параллельные (2) плоскости фольги (001), и зоны ГП (3) в сплаве Al-3% Cu, состаренном при 130°C в течение 18 дней; д - микроструктура мелкокристаллического мартенсита, \*500; е – микроструктура троостита: слева - закалки; справа - отпуска, \*7500; ж - микроструктура сорбита закалки, \*5010, з - микроструктура сорбита: слева - закалки; справа - отпуска, \*7500

## 7.2 Порядок выполнения работы.

1. Изучить теоретические основы термической обработки «отпуск», изменения структуры, условия назначения.
2. Назначить вид и режим термической обработки в соответствии с вариантом.

Таблица 11 – Варианты заданий

| Вариант | Задание для термической обработки по теме «Отпуск»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1       | После термической обработки углеродистой стали была получена структура мартенсита отпуска. Нанесите ординату закаленной стали на фазовую диаграмму Fe-Fe <sub>3</sub> C и укажите температуру нагрева этой стали для закалки. Назначьте температуру отпуска, чтобы получить заданную структуру. Опишите превращения, происходившие в стали в процессе закалки и отпуска |
| 2       | После термической обработки углеродистой стали была получена структура сорбита отпуска. Нанесите ординату закаленной стали на фазовую диаграмму Fe-Fe <sub>3</sub> C и укажите температуру нагрева этой стали для закалки. Назначьте температуру отпуска, чтобы получить заданную структуру. Опишите превращения, происходившие в стали в процессе закалки и отпуска    |

## Продолжение таблицы 11

[illegible]

Продолжение таблицы 11

| 1  | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 | После термической обработки углеродистой стали была получена структура сорбит отпуска. Нанесите ординату закаленной стали на фазовую диаграмму Fe-Fe <sub>3</sub> C и укажите температуру нагрева этой стали для закалки. Назначьте температуру отпуска, чтобы получить заданную структуру. Опишите превращения, происходившие в стали в процессе закалки и отпуска                            |
| 13 | После термической обработки углеродистой стали была получена структура феррит-мартенсит отпуска. Нанесите ординату закаленной стали на фазовую диаграмму Fe-Fe <sub>3</sub> C и укажите температуру нагрева этой стали для закалки. Назначьте температуру отпуска, чтобы получить заданную структуру. Опишите превращения, происходившие в стали в процессе закалки и отпуска                  |
| 14 | После термической обработки углеродистой стали была получена структура мартенсит отпуска. Нанесите ординату закаленной стали на фазовую диаграмму Fe-Fe <sub>3</sub> C и укажите температуру нагрева этой стали для закалки. Назначьте температуру отпуска, чтобы получить заданную структуру. Опишите превращения, происходившие в стали в процессе закалки и отпуска                         |
| 15 | После термической обработки углеродистой стали была получена структура цементит - мартенсит отпуска. Нанесите на диаграмму состояния Fe-Fe <sub>3</sub> C ординату закаленной стали и укажите температуру нагрева этой стали под закалку. Назначьте температуру отпуска, обеспечивающую получение заданной структуры. Опишите превращения, происходившие в стали в процессе закалки и отпуска. |

### 7.3 Контрольные вопросы.

1. Что такое отпуск?
2. Какие виды отпуска вы знаете?
3. При какой температуре выполняется среднетемпературный отпуск?
4. Структура стали после отпуска.
5. Назначение и температурный режим отпуска.
6. Что такое мартенсит отпуска?
7. Что такое троостит отпуска?
7. В каких случаях назначают обработку холодом?
8. Что такое явление вторичной твердости при отпуске?
9. Механические свойства стали после отпуска.
10. Каково влияние легирующих элементов на процесс коагуляции феррито-цементитной смеси при температурах отпуска выше 450°C?
11. Дайте определение сорбиту отпуска.
12. При какой температуре проводится высокотемпературный отпуск?
13. Дайте определение улучшению стали
14. Назовите причину появления отпускной хрупкости.
15. Как влияют легирующие элементы на распад остаточного аустенита?

## Практическая работа № 8

### Тема: Химико-термическая обработка деталей

**Цели работы:** Изучение видов химико-термической обработки, методов изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя.

#### 8.1 Теоретические основы.

**Химико-термической обработкой** - «называют процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев и металла.» [10]

Такая обработка применима к деталям, от которых требуется твердая и износоустойчивая поверхность при сохранении вязкой и достаточно прочной сердцевины, высокая коррозионная стойкость, высокое сопротивление усталости.

Химико-термическая обработка стали основана на диффузии (проникновении) в атомно-кристаллическую решетку железа атомов различных химических элементов при нагреве стальных деталей в среде, богатой этими элементами.

Наиболее распространенными видами химико-термической обработки стали являются: **цементация** - «насыщение поверхности стальных деталей углеродом»; **азотирование** - «насыщение поверхности стальных деталей азотом»; **цианирование** - «одновременное насыщение поверхности стальных деталей углеродом и азотом». [10]

Кроме этих основных видов химико-термической обработки, в промышленности применяют также поверхностное насыщение стали металлами: алюминием, хромом, кремнием и др. Процесс этот называется **диффузионной металлизацией стали**.

**Цементация** - «процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев деталей *углеродом*. Цементации подвергают изделия, изготавливаемые из сталей, содержащих до 0,25...0,3% углерода. Такие низкоуглеродистые конструкционные стали называют *цементуемыми*. Они являются доэвтектоидными и имеют в равновесном (отожженном) состоянии структуру феррита и перлита, в которой доля феррита преобладает. Твердость и прочность этих сталей низкие, а пластичность и ударная вязкость высокие. Из-за низкого содержания углерода они практически не закаляются.»

**Механизм цементации и структура цементованного слоя.** Цементацию проводят путем нагрева стальных деталей в активных средах, содержащих углерод, до 900...950 °С, т.е. выше точки  $A_{c3}$  (в области устойчивого аустенита). Выбор температуры объясняется тем, что растворимость углерода в аустените (до 2,14%) значительно выше, чем в феррите (0,02%). Чем выше температура нагрева, тем больше углерода может раствориться в аустените, но при этом возрастают размеры его зерен. Скорость насыщения составляет примерно 0,1 мм/ч. Таким образом, для получения цементованного слоя глубиной 1 мм требуется не менее 10 ч.

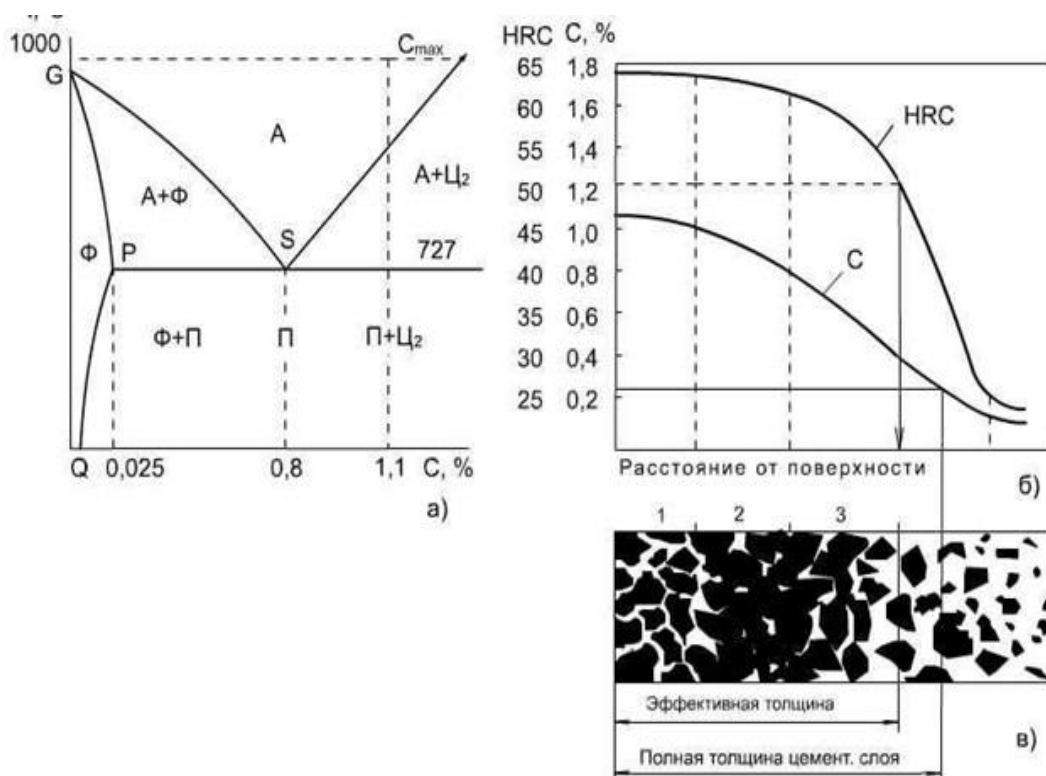


Рисунок 37 – Фрагмент диаграммы состояния Fe - Fe<sub>3</sub>C (а), изменение концентрации углерода и твердости после закалки (б), схематическая структура после медленного охлаждения цементированного слоя (в).

После окончания процесса насыщения поверхности углеродом и медленного охлаждения до цеховой температуры образуется цементованный слой, имеющий переменную концентрацию углерода, убывающую от поверхности к сердцевине. Соответственно изменяется и его микроструктура. Первая зона, прилегающая к поверхности и содержащая в среднем около 1% углерода, имеет структуру перлита и цементита вторичного, характерную для заэвтектоидных сталей. Затем следует зона со структурой перлита (0,8% углерода) и переходная (третья) зона со структурой перлита и феррита (при снижении концентрации углерода менее 0,8%). По мере удаления от поверхности количество феррита в этой зоне возрастает. За *эффективную величину* цементованного слоя принимают глубину от поверхности до структуры, состоящей примерно из 50% феррита и 50% перлита (до 0,4...0,45% углерода).

*Технологии цементации.* Применяют твердую и газовую цементацию. Их название определяется первоначальным агрегатным состоянием используемых углеродсодержащих активных сред, которые называют *карбюризаторами*.

*Твердая цементация* «осуществляется в карбюризаторе, содержащем активированный древесный уголь (70%), порошки BaCO<sub>3</sub> (25%) для интенсификации процесса и CaCO<sub>3</sub> (5%) для предотвращения спекания угольных гранул. Детали укладывают рядами в стальные сварные или чугунные ящики (контейнеры). Дно ящика и каждый ряд деталей засыпают слоем карбюризатора. Ящик закрывают



крышкой, кромки которой для обеспечения герметичности замазывают огнеупорной глиной, и помещают в печь. Углерод древесного угля взаимодействует с кислородом воздуха (имеющегося в цементационном ящике) и углекислым барием, образуя газ CO.

Образующийся атомарный углерод адсорбируется на поверхности стальных деталей и диффундирует вглубь, растворяясь в аустените.

Твердая цементация имеет ряд недостатков:

- невозможность регулирования степени насыщения поверхности деталей углеродом;
- повышенные энергетические затраты, связанные с прогревом ящиков с карбюризатором;
- более низкая скорость цементации по сравнению с газовой цементацией (почти в 2 раза), поскольку к скорости насыщения (0,1 мм/ч) добавляется значительное время, необходимое для прогрева ящиков и протекания химических реакций.

Твердая цементация применяется в условиях единичного и мелкосерийного производства, отличается простотой выполнения, не требует специального оборудования.» [10]

*Газовая цементация* «осуществляется при нагреве изделий в среде газов, содержащих углерод. Наиболее часто используется газовый карбюризатор, состоящий из смеси метана CH<sub>4</sub> (природный газ) и CO, при диссоциации которых образуется атомарный углерод.» [11]

Далее все протекает так же, как при твердой цементации, но длительность процесса существенно сокращается. Газовая цементация позволяет обеспечить заданную концентрацию углерода в слое, механизацию и автоматизацию процесса.

Цементации может подвергаться не вся поверхность изделия. В этом случае участки, не подлежащие цементации, защищают гальванически омеднением либо специальными обмазками.

Сама по себе цементация не обеспечивает выполнения главной задачи - получения высокой твердости и износостойкости на поверхности деталей при сохранении вязкой сердцевины. Она создает только выгодное распределение углерода по сечению детали. Необходимое упрочнение поверхностного слоя достигается только последующей термической обработкой, которая всегда проводится после цементации.

*Термическая обработка цементованных деталей.* После цементации детали подвергают *закалке* для получения высокой твердости в поверхностных слоях и *низкому отпуску* (160...180 °C). Применяются различные технологии закали в зависимости от типа производства, требований к прочности поверхностного слоя и сердцевины деталей, необходимости автоматизации процесса.

Наиболее часто закалку проводят после медленного охлаждения деталей после цементации до цеховой температуры. Детали вновь нагревают до температур выше точки A<sub>сv</sub> т.е. до температуры закалки заэвтектоидных сталей, поскольку именно такая структура сформирована в поверхностном слое в процессе цементации. Температура закалки цементованных деталей выбирается равной



820...850 °С, что выше обычно используемых при закалке заэвтектоидных сталей (780...800 °С). Это обеспечивает не только полную закалку и измельчение зерен в результате перекристаллизации цементованного слоя, но и частичные перекристаллизацию и измельчение зерна в сердцевине. На поверхности образуется структура мелкоигольчатого мартенсита (после последующего низкого отпуска - отпущенного мелкоигольчатого мартенсита), вторичного цементита и остаточного аустенита (5...8%). Структура сердцевины зависит от химического состава стали и размеров изделия. Структура сердцевины деталей из углеродистых сталей - феррит и перлит; легированных - сорбит, троостит или низкоуглеродистый мартенсит.

При крупносерийном и массовом производстве для деталей менее ответственного назначения закалка совмещается с газовой цементацией. Закалочное охлаждение производится непосредственно с температуры цементации или после некоторого подстуживания до 820...850 °С для уменьшения термических напряжений. Такая технология является наиболее экономичной и легко автоматизируется. Однако при закалке сердцевина детали сохраняет крупное зерно, а на поверхности образуется крупнопластинчатый мартенсит и повышенное количество остаточного аустенита. Это объясняется тем, что длительные выдержки при высоких температурах в процессе цементации вызывают значительный рост аустенитного зерна. Поскольку закалка выполняется непосредственно с высокой температуры цементации, структура остается крупнозернистой. Удовлетворительные свойства после такой обработки получаются в природно мелкозернистых сталях при содержании углерода в поверхностном слое, близком к эвтектоидному;

Наиболее ответственные тяжелонагруженные детали, для которых необходимы высокие прочность и ударная вязкость сердцевины, после цементации подвергают двойной закалке. Первая проводится с целью перекристаллизации структуры сердцевины и растворения сетки вторичного цементита в цементованном слое. В сердцевине после цементации сохраняется структура доэвтектоидной стали, поэтому температура нагрева для закалки выбирается выше точки  $A_{с.у}$ . В результате структура сердцевины проходит полную перекристаллизацию и становится мелкозернистой. На поверхности вследствие нагрева до высоких температур образуется структура, состоящая из крупнопластинчатого мартенсита, имеющего низкую прочность, и остаточного аустенита.

Вторая закалка выполняется для устранения перегрева цементованного слоя. Температура нагрева выбирается выше точки  $A_{сг}$  (750...780 °С), поскольку на поверхности после цементации получается структура заэвтектоидной стали. После второй закалки на поверхности образуется мелкоигольчатый мартенсит, остаточный аустенит и небольшое количество зернистого цементита. Структура сердцевины повторно проходит частичную перекристаллизацию и измельчение зерна. Недостатками такой обработки являются сложность технологического процесса, повышенное коробление изделий сложной формы, возможное окисление и обезуглероживание поверхности.

После цементации, закалки и низкого отпуска твердость поверхностного слоя составляет 58...62 HRC, а сердцевины - менее 20 HRC для углеродистых

сталей и 25...45 *HRC* для легированных. Окончательная глубина слоя на деталях обычно назначается в пределах 0,8...1,2 мм.

Цементации с последующей термической обработкой подвергают детали, работающие в условиях повышенного износа и динамических нагрузок (например, зубчатые колеса, червяки, кулачки, распределительные валики и т.п.). Ее целью является получение высокой поверхностной твердости, обеспечивающей хорошую износостойкость, при сохранении вязкой сердцевины.

**Азотирование.** «Азотированием называется насыщение поверхности стали азотом. Основоположителем азотирования стали является русский ученый проф. Н. П. Чижевский, который впервые исследовал и применил этот процесс. Для азотирования используют аммиак  $\text{NH}_3$ . Сущность азотирования заключается в том, что аммиак при температуре 500-750° С разлагается на азот и водород, и активные атомы азота (атомарный азот), диффундируя в поверхностный слой, сообщают поверхности стали большую твердость, не влияя на механические свойства сердцевины деталей. В промышленности для изготовления деталей, подлежащих азотированию, в настоящее время широко применяют сталь марки 35ХМЮА или ее заменитель 35ХВФЮА. После окончательной механической обработки детали закаливают от температуры 960° С с охлаждением в воде или в масле и подвергают отпуску при 600° С также с охлаждением в воде или в масле. Затем детали азотируют. Продолжительность азотирования от 12 до 60 и даже до 90 часов в зависимости от требуемой толщины азотированного слоя и характера процесса.

Длительность выдержки деталей в потоке аммиака в печи влияет на глубину азотированного слоя. В среднем при 500° С азот за каждые 10 часов диффундирует на глубину 0,1 мм. На практике для сокращения времени азотирования процесс ведут путем ступенчатого нагрева: вначале в течение 12-15 часов при температуре 500-520° С; затем температуру поднимают до 550-600° С и дают выдержку 15-20 часов. При таком режиме длительность процесса удастся сократить в 2,0-2,5 раза. В результате азотирования твердость стали достигает НВ 1000-1100; последующей термической обработки не требуется.

Азотирование имеет ряд преимуществ перед цементацией: она дает незначительное изменение размеров деталей, обеспечивает более высокую твердость и износоустойчивость (при нагреве до температуры 500-550° С твердость азотированных деталей не снижается); сообщает деталям хорошую сопротивляемость действию переменных нагрузок, высокий предел выносливости и коррозионную стойкость. Недостаток азотирования - длительность процесса.» [10]

Азотирование применяют в машиностроении для получения высокого качества дизельной аппаратуры, измерительного инструмента, зубчатых колес и др.

**Цианирование** - «процесс одновременного насыщения поверхности стали углеродом и азотом для придания ей высокой твердости, сопротивляемости истиранию и коррозионной стойкости.» [10]

Одновременное присутствие в среде углерода и азота ускоряет их совместную диффузию в поверхностные слои стали. Такими средами могут быть расплавленные цианистые соли (жидкостное цианирование), науглероживающие и

азотирующие газы (газовое цианирование), твердые порошки и пасты (твердое цианирование). Цианированию подвергают углеродистые и легированные стали.

Существует два вида цианирования: высокотемпературное и низкотемпературное.

**Высокотемпературное цианирование** «применяют для деталей из углеродистой и легированной стали с содержанием углерода 0,3-0,4% с целью получения твердого, хорошо сопротивляющегося истиранию поверхностного слоя и вязкой сердцевины. Такое цианирование проводится при температурах 780-930°С, т. е. выше точки  $A_{c1}$ , когда сталь находится в состоянии аустенита и преобладает процесс насыщения ее углеродом. Этот вид цианирования широко применяют на автомобильных заводах для зубчатых колес и различных мелких деталей».

**Низкотемпературное цианирование** «применяют для инструментов из быстрорежущей стали при температурах 500-600°С, т. е. ниже точки  $A_{c1}$ , когда преобладает процесс насыщения стали азотом, с последующим медленным охлаждением цианированного инструмента.

В последнее время на заводах вводится новый процесс цианирования - газовое цианирование, или нитроцементация. Газовое цианирование занимает промежуточное положение между газовой цементацией и азотированием и поэтому иногда называется **нитроцементацией**.» [11]

При газовом цианировании детали нагреваются в смеси газов, содержащих углерод и азот. Для этой цели используют смесь окиси углерода СО и аммиака  $NH_3$ . При их химическом взаимодействии образуются активный углерод и азот. В последнее время газовое цианирование (нитроцементацию) производят в печах, оборудованных для газовой цементации, путем введения в рабочее пространство этих печей бензола или пиробензола.

**Диффузионная металлизация.** «Кроме указанных процессов насыщения поверхности стали углеродом и азотом, широко применяют насыщение стали алюминием, хромом, кремнием и др. Этот процесс применяют главным образом с целью получения стальных деталей, устойчивых против разъедания щелочами и кислотами, а также с целью повышения устойчивости стали против окисления горячими печными газами, т. е. против окалинообразования.»

**Алитированием** «называется процесс насыщения поверхности стальных и чугунных деталей алюминием с целью повышения их жаростойкости. Алитированию подвергают главным образом малоуглеродистые стали. Процесс алитирования может происходить в твердой, жидкой и газообразной средах. Наиболее распространен способ алитирования в твердой среде. Детали, подлежащие алитированию, укладывают в железные ящики со смесью, состоящей из 49% порошка алюминия, 49% окиси алюминия и 2% хлористого аммония. Укладывать детали в ящики следует так же, как при цементации в твердом карбюризаторе. Ящики плотно закрывают крышками, обмазывают огнеупорной глиной, погружают в печь и нагревают в течение 5-10 часов при температуре от 900 до 1100°С. За это время образуется алитированный слой глубиной 0,3-1,0 мм.»

После алитирования детали подвергаются диффузионному отжигу при температуре около 1000°С с выдержкой 4-6 часов. В результате отжига содержание алюминия в поверхностном слое снижается, что уменьшает хрупкость алитированного слоя.

При алитировании в жидкой среде в стальном тигле расплавляют алюминий, насыщенный 6-8% железа, и в него погружают детали. Алитирование производится при температуре 750-800° в течение 50-90 минут. Такая выдержка обеспечивает получение слоя глубиной 0,2-0,35 мм.

При газовом алитировании изделие вместе с порошком ферроалюминия погружают в реторту и пропускают хлористый водород. После обменных реакций, протекающих при температуре 850 - 1000°С, атомарный алюминий диффундирует в поверхностные слои деталей.

Процесс газового алитирования длится обычно не более 4 часов. За это время можно получить алитированный слой глубиной 0,4 мм. После окончания процесса как жидкого, так и газового алитирования рекомендуется производить диффузионный отжиг.

**Диффузионным хромированием** «называют процесс насыщения поверхности стали хромом. Хромирование может производиться в твердых, газовых и жидких средах.» [11]

При хромировании в твердой среде применяют порошкообразную смесь из 60-65% металлического хрома или феррохрома, 30-35% глинозема и 5% хлористого аммония. Процесс ведется при температуре 1000-1150°С в течение 7-12 часов. При хромировании низкоуглеродистой стали на поверхности деталей за это время образуется хромированный слой толщиной 0,1-0,25 мм.

При жидком хромировании изделия нагревают в ванне из расплавленных хлористых солей бария, магния и кальция с добавкой феррохрома и хлористого хрома. Процесс ведется при температуре 980-1000° С.

При хромировании в газообразной среде изделия нагревают до 950-1050°С в атмосфере парообразного хлористого хрома.

В низкоуглеродистых сталях хром растворяется в  $\alpha$ -железе. В высокоуглеродистых сталях хром образует карбиды.

Хромированию подвергают различные детали и инструменты, от которых требуются высокая износоустойчивость, коррозионная стойкость и жаропрочность, такие, как сверла, калибры, клапаны компрессоров и т. д. Жаростойкость хромированных сталей составляет 800-850° С.

**Силицированием** «называют процесс поверхностного насыщения стали кремнием с целью повышения кислотоупорности, сопротивления износу и жаростойкости деталей. Силицирование проводят в твердом, жидком и газообразном цементаторе.»

Для **твердого силицирования** используют смесь ферросилиция с шамотом. Чтобы ускорить процесс, добавляют хлористый алюминий. Процесс ведут при 1100- 1200° С. При выдержке 4-10 часов образуется силицированный слой глубиной 0,2—0,7 мм.

При **жидком силицировании** используют хлористые соли с добавкой ферросилиция. Процесс ведут при 950-1000° С.

**Газовое силицирование** «имеет наибольшее промышленное значение; его проводят аналогично алитированию, с использованием ферросилиция. Процесс идет более интенсивно, чем в предыдущих случаях. После выдержки при 1050° С в течение 2 часов получают слой толщиной 1,0 мм, насыщенный кремнием.

Характерной особенностью силицированного слоя является его пористость. Если проварить деталь в масле при температуре 150-200° С, масло, впитываясь в поры, способствует самосмазыванию детали, повышая ее стойкость при работе на истирание. Жаростойкость силицированных деталей не превышает 800-850° С.»

В последние годы разработаны новые процессы повышения износоустойчивости стальных деталей, которые называются **сульфидированием** и **сульфоцианированием**. «Сущность **сульфидирования** заключается в насыщении поверхности стальных деталей серой на глубину 0,2-0,3 мм путем их нагрева в расплавленных серноазотистых солях при температуре 550-600° С с выдержкой в течение 2-3 часов. В результате поверхность деталей насыщается серой до 0,5% и азотом до 1,0%. Сульфидированные детали хорошо работают на трение. По лабораторным исследованиям износоустойчивость деталей после сульфидирования повышается в 2-3 раза.»

**Сульфоцианирование** - «процесс поверхностного насыщения стали серой, углеродом и азотом. Совместное влияние серы и азота в поверхностном слое металла обеспечивает более высокую износоустойчивость. Сульфоцианирование проводится обычно в соляных ваннах при температуре 550-600° С.» [11]

## 8.2 Задание

1. Изучить теоретические основы химико-термической обработки, структуру стали, области применения.

2. Заполнить таблицу 12 «Химико-термическая обработка»

Таблица 12 - Химико-термическая обработка.

| Наименование<br>химико-термической обработки | Назначение |
|----------------------------------------------|------------|
|                                              |            |

## 8.3 Контрольные вопросы:

1. Что называется цементацией?
2. Для чего применяется цементация?
3. Какие стали подвергают цементации?
4. Что такое алитирование?
5. Опишите процесс борирования.
6. При какой температуре происходит процесс силицирование?
7. Каким элементом насыщают поверхность при силицировании?
8. Каким элементом насыщают поверхность при хромировании?

9. Опишите процессы цианирования и нитроцементирования.
10. Какие стали подвергаются азотированию?
11. Опишите механизм образования азотированного слоя.
12. Опишите процесс газовой цементации

## Практическая работа № 9

### Тема: Маркировка углеродистых и легированных сталей.

**Цель работы:** Изучить и закрепить буквенно-цифровую систему обозначения сталей стран СНГ и Европейскую систему обозначений сталей по стандарту EN 10027

#### 9.1 Теоретические основы.

В странах СНГ принята буквенно-цифровая система, согласно которой цифрами обозначается содержание элементов стали, а буквами — наименование элементов.

Буквенные обозначения применяются также для указания способа раскисления стали

1. КП — кипящая сталь,
2. ПС — полуспокойная сталь,
3. СП — спокойная сталь.

**Конструкционные стали обыкновенного качества нелегированные** (ГОСТ 380-94) обозначают буквами СТ., например СТ. 3. Цифра, стоящая после букв, обозначает марку стали.

**Конструкционные нелегированные качественные стали** (ГОСТ 1050-88) Качественные углеродистые стали маркируются двухзначными числами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента: 05; 08; 10; 25; 40 и т.д.

Буква Г в марке стали указывает на повышенное содержание Mn (14Г; 18Г и т.д.).

**Качественные стали для производства котлов и сосудов высокого давления**, согласно ГОСТ 5520-79, обозначают как конструкционные нелегированные стали, но с добавлением буквы К (например, 20К).

**Конструкционные легированные стали**, согласно ГОСТ 4543-71, обозначают буквами и цифрами. Цифры после каждой буквы обозначают примерное содержание соответствующего элемента, однако при содержании легирующего элемента менее 1,5% цифра после соответствующей буквы не ставится. Качественные дополнительные показатели пониженного содержания примесей типа серы и фосфата обозначаются буквой — А или Ш, в конце обозначения, например (12 Х НЗА, 18ХГ-Ш) и т. п.

**Стали подшипниковые**, согласно ГОСТ 801-78, обозначаются также как и легированные, но с буквой Ш в конце наименования. Следует заметить, что для сталей электрошлакового переплава буква Ш обозначается через тире (например, ШХ 15, ШХ4-Ш).

**Стали инструментальные нелегированные**, согласно ГОСТ 1435-90, делят на качественные, обозначаемые буквой У и цифрой, указывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента (например, У7, У8, У10) и вы-

сококачественные, обозначаемые дополнительной буквой А в конце наименования (например, У8А) или дополнительной буквой Г, указывающей на дополнительное увеличение содержания марганца (например, У8ГА).

**Стали инструментальные легированные** согласно ГОСТ 5950-73, обозначаются также как и конструкционные легированные (например, 4Х2В5МФ и т. п.).

**Стали быстрорежущие** в своем обозначении имеют букву Р (с этого начинается обозначение стали), затем следует цифра, указывающая среднее содержание вольфрама, а затем буквы и цифры, определяющие массовое содержание элементов. Не указывают содержание хрома, т. к. оно составляет стабильно около 4% во всех быстрорежущих сталях и углерода, т. к. последнее всегда пропорционально содержанию ванадия. Следует заметить, что если содержание ванадия превышает 2,5%, буква Ф и цифра указываются (например, стали Р6М5 и Р6 М5Ф3).

**Стали нержавеющей стандартные**, согласно ГОСТ 5632-72, маркируют буквами и цифрами по принципу, принятому для конструкционных легированных сталей (например, 08Х18Н10Т или 16Х18Н12С4ТЮЛ).

Автоматные стали маркируются буквой А (А12, А30 и т.д.).

Таблица 13 - обозначений легирующих элементов

| Обозначение | Название элемента | Обозначение | Название элемента |
|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| А           | Азот              | Г           | Марганец          |
| Ю           | Алюминий          | Д           | Медь              |
| Р           | Бор               | М           | Молибден          |
| Ф           | Ванадий           | Н           | Никель            |
| В           | Вольфрам          | Б           | Бор               |
| К           | Кобальт           | Т           | Титан             |
| С           | Кремний           | Х           | Хром              |
| У           | Углерод           | Ц           | Цирконий          |
| П           | Фосфор            |             |                   |

**Система маркировки сталей по Еuronormам.** Европейская система обозначений сталей подробно приводится в стандарте EN 10027, состоящем из двух частей: часть 1 определяет порядок наименований сталей (присвоения им буквенно-цифровых обозначений), а часть 2 – порядок присвоения сталям порядковых номеров.

**Наименования сталей.** Согласно EN 10027 Часть 1 стали по порядку присвоения им наименований делятся на две группы. В первую группу включены стали, наименования которых определяются их назначением и механическими или физическими свойствами. Вторую группу составляют стали, наименования которых определяются их химическим составом.



**Группа 1.** «Наименования сталей, включенных в первую группу (см. таблицу 14), состоят из одной или более букв, связанных с назначением стали, за которыми следуют цифры, определяющие ее свойства. За цифрами могут следовать дополнительные символы, определяющие состояние поставки стали и ее назначение.»

Таблица 14 - Наименования сталей группы 1 по EN 10027.

| Нач. буква                                                                            | Назначение стали<br>Свойство, определяе-<br>мое цифрами                                                                                                                                                    | Дополнительные символы                                                                                                                                                                                                       |          |                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | Группа 1                                                                                                                                                                                                                     |          |                                                                                                                                   | Группа 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 1                                                                                     | 2                                                                                                                                                                                                          | 3                                                                                                                                                                                                                            |          |                                                                                                                                   | 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
| S =<br>G =<br>стальное<br>литье Ста-<br>вится впе-<br>реди, если<br>необ- хо-<br>димо | <i>Конструкционные<br/>стали</i><br>Например: S355J0<br>ранее: Fe 510C<br>Свойство: минималь-<br>ный предел текучести<br>(R <sub>e</sub> ) в Н/мм <sup>2</sup> (три<br>цифры)                              | Работа<br>разрушения при<br>ударе                                                                                                                                                                                            |          | Темпе-<br>ратура                                                                                                                  | С = с повышенной пла-<br>стичностью в холодном<br>состоянии<br>D = для нанесения по-<br>крытий в горячем состо-<br>янии<br>Е = для эмалирования<br>F = дляковки и штам-<br>повки H = для полых<br>профилей L = для ра-<br>боты при низких темпе-<br>ратурах<br>M = термомеханически<br>упрочненная<br>N = нормализованная<br>O = для шельфовых кон-<br>струкций<br>Q = термообработанная<br>S = для судостроения<br>T = для труб<br>W = стойкая к атмосфер-<br>ной коррозии |     |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | 27<br>Дж                                                                                                                                                                                                                     | 40<br>Дж | 60<br>Дж                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | °C  |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | JR                                                                                                                                                                                                                           | KR       | LR                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | +20 |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | J0                                                                                                                                                                                                                           | K0       | L0                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0   |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | J2                                                                                                                                                                                                                           | K2       | L2                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -20 |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | J3                                                                                                                                                                                                                           | K3       | L3                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -30 |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | J4                                                                                                                                                                                                                           | K4       | L4                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -40 |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | J5                                                                                                                                                                                                                           | K5       | L5                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -50 |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | J6                                                                                                                                                                                                                           | K6       | L6                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -60 |
|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            | M = термомеханически<br>упрочненная<br>N = нормализованная<br>Q = после закалки и от-<br>пуска<br>G = другие качества, если<br>необходимо с 1 или 2<br>цифрами                                                               |          |                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
| P =<br>G =<br>стальное<br>литье Ста-<br>вится впе-<br>реди, если<br>необ- хо-<br>димо | <i>Стали для котлов и<br/>сосудов высокого дав-<br/>ления</i><br>Например: P265B<br>ранее: FeE265KR<br>Свойство: минималь-<br>ный предел<br>текучести (R <sub>e</sub> ) в Н/мм <sup>2</sup><br>(три цифры) | M = термомеханически<br>упрочненная<br>N = нормализованная<br>Q = термообработанная<br>B = баллоны со сжатым<br>газом<br>S = обычные сосуды под<br>давлением<br>G = другие качества, если<br>необходимо с 1 или 2<br>цифрами |          | H = высокая темпера-<br>тура<br>L = низкая температура<br>R = комнатная темпера-<br>тура<br>X = высокая или низкая<br>температура |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |

Продолжение таблицы 14

| 1                                              | 2                                                                                                                                                                                                           | 3                                                                                                                                                                                                                                          | 4                                       |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>L =</b>                                     | <i>Стали для трубопроводов</i><br>Например: <b>L360Q</b><br>ранее: <b>360QT</b><br>Свойство:<br>минимальный предел текучести ( $R_e$ ) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры)                                      | <b>M</b> = термомеханически упрочненная<br><b>N</b> = нормализованная<br><b>Q</b> = термообработанная<br><b>G</b> = другие качества, если необходимо с 1 или 2 цифрами                                                                     | Буква и цифра, если необходимо          |
| <b>E =</b>                                     | <i>Стали для машиностроения</i><br>Например: <b>E295</b> ранее: <b>Fe490-2</b><br>Свойство: минимальный предел текучести ( $R_e$ ) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры)                                          | <b>G</b> = другие качества, если необходимо с 1 или 2 цифрами                                                                                                                                                                              |                                         |
| <b>B =</b>                                     | <i>Арматурные стали</i><br>Например: <b>B500N</b><br>Свойство:<br>предел текучести ( $R_e$ ) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры)                                                                                | <b>N</b> = нормальной вытяжки<br><b>H</b> = высокой вытяжки<br><b>G</b> = другие качества, если необходимо с 1 или 2 цифрами                                                                                                               |                                         |
| <b>Y =</b>                                     | <i>Стали для предварительно-напряженных конструкций</i><br>Например: <b>Y1770C</b><br>ранее: <b>Fe1770</b><br>Свойство:<br>Минимальное временное сопротивление ( $R_m$ ) в Н/мм <sup>2</sup> (четыре цифры) | <b>C</b> = холоднотянутая проволока<br><b>H</b> = горячекатаные или предварительно-напряженные прутки<br><b>Q</b> = термообработанная проволока<br><b>S</b> = тонкий трос<br><b>G</b> = другие качества, если необходимо с 1 или 2 цифрами |                                         |
| <b>R =</b>                                     | <i>Рельсовые стали</i><br>Например: <b>R0880Mn</b> ранее: <b>3B</b><br>Свойство:<br>минимальное временное сопротивление ( $R_m$ ) в Н/мм <sup>2</sup> (четыре цифры, возможен ноль впереди)                 | <b>Mn</b> = высокое содержание марганца<br><b>Cr</b> = легированная хромом<br><b>G</b> = другие качества, если необходимо с 1 или 2 цифрами                                                                                                | <b>Q</b> = термообработанная проволока  |
| <b>T =</b><br>если установлен предел текучести | <i>Упаковочные листы и ленты</i><br>Например: <b>T660</b><br>ранее: <b>DR660</b><br>Свойство:                                                                                                               | Дополнительные символы не предусмотрены                                                                                                                                                                                                    | Дополнительные символы не предусмотрены |

Продолжение таблицы 14

| 1                                                                                                                      | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 4                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <p><b>H</b> =<br/>если установлен предел текучести</p> <p><b>HT</b> =<br/>если установлено временное сопротивление</p> | <p><i>Холоднокатаный листовой прокат из высокопрочных сталей для холодной штамповки</i></p> <p>Например: <b>H420M</b></p> <p>ранее: <b>FeE420HF</b></p> <p>Свойства: минимальный предел текучести (<math>R_e</math>) в Н/мм<sup>2</sup> (три цифры)</p> <p>минимальное временное сопротивление (<math>R_m</math>) в Н/мм<sup>2</sup> (три цифры и HT впереди)</p> | <p><b>M</b> = термомеханически упрочненный или холоднокатаная</p> <p><b>B</b> = закаленная в печи</p> <p><b>P</b> = легированная фосфором</p> <p><b>X</b> = двухфазная</p> <p><b>Y</b> = с малым содержанием элементов внедрения (C и N)</p> <p><b>G</b> = другие качества, если необходимо с 1 или 2 цифрами</p>                                                                                                                                                                                                  |                                         |
| <b>D</b> =                                                                                                             | <p><i>Листовой прокат для холодной штамповки</i> Например: <b>DC12EK</b> ранее: <b>FeK4</b></p> <p>Свойства:</p> <p><b>C</b> = холоднокатаный</p> <p><b>D</b> = горячекатаный</p> <p><b>X</b> = состояние проката (две буквы или цифры)</p>                                                                                                                       | <p><b>D</b> = для нанесения покрытий в горячем состоянии</p> <p><b>EK</b> = для эмалирования <b>DK</b> = для безгрунтового эмалирования</p> <p><b>G</b> = другие качества, если необходимо с 1 или 2 цифрами</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                         |
| <b>TH</b> =<br>если установлена твердость                                                                              | <p>заданный предел текучести (<math>R_e</math>) в Н/мм<sup>2</sup> для двойного обжата (три цифры)</p> <p>Например: <b>TH52</b></p> <p>ранее: <b>F52</b></p> <p>Свойство: средняя твердость (TH и две цифры)</p>                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                         |
| <b>M</b> =                                                                                                             | <p><i>Электротехнические стали</i></p> <p>Например: <b>M400-50A</b> ранее: <b>FeV400-50HA</b></p> <p>Свойство: предельно допустимые потери на перемагничивание в Вт/кг, умноженные на сто (три цифры)</p>                                                                                                                                                         | <p>Для магнитной индукции от 1.5 Тесла (при 50 Гц)</p> <p><b>A</b> = с неориентированным зерном</p> <p><b>D</b> = нелегированные без заключительного отжига</p> <p><b>E</b> = легированные, без заключительного отжига</p> <p><b>N</b> = с нормальными потерями на перемагничивание</p> <p>Для магнитной индукции от 1.7 Тесла (при 50 Гц)</p> <p><b>S</b> = ориентированное зерно с ограниченными потерями на перемагничивание</p> <p><b>P</b> = ориентированное зерно с низкими потерями на перемагничивание</p> | Дополнительные символы не предусмотрены |

Таблица 15 - Наименования сталей группы 2 по EN 10027

| Начальная буква                                                                 | Назначение стали<br>Свойство, определяемое цифрами                                                                                                                                                                                                                                                                 | Дополнительные символы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                         |        |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------|
|                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Группа 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Группа 2                                |        |
| 1                                                                               | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4                                       |        |
| <b>C</b> =<br><b>G</b> =<br>стальное литье<br>Ставится впереди, если необходимо | <i>Нелегированные стали со средним содержанием</i><br><i>Mn &lt; 1% (кроме автоматных)</i><br>Например: <b>C35E</b><br>ранее: <b>2C35</b><br>Первое число: среднее содержание углерода, умноженное на 100 (до трех цифр)                                                                                           | <b>E</b> = заданное максимальное содержание серы<br><b>R</b> = заданный интервал содержания серы<br><b>D</b> = для тянутой проволоки<br><b>C</b> = с повышенной пластичностью в холодном состоянии<br><b>S</b> = пружинная<br><b>T</b> = инструментальная<br><b>W</b> = для сварочной проволоки<br><b>G</b> = другие качества, если необходимо с 1 или 2 цифрами<br>После букв <b>E</b> и <b>R</b> может следовать цифра, определяющая содержание серы, умноженное на 100 |                                         |        |
| <b>Без буквы G</b> =<br>стальное литье<br>Ставится впереди, если необходимо     | <i>Нелегированные стали с содержанием Mn &gt; 1%, нелегированные автоматные стали, легированные стали (кроме быстрорежущих) с содержанием каждого легирующего элемента до 5%</i><br>Например: <b>28Mn6</b><br>ранее: <b>28 Mn 6</b><br>Первое число: среднее содержание углерода, умноженное на 100 (до трех цифр) | Легирующие элементы: <b>Буквы:</b> символы химических элементов<br><b>Цифры:</b> отделены тире, соответствуют среднему содержанию элемента, умноженному на нижеследующие коэффициенты                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Дополнительные символы не предусмотрены |        |
|                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Элемент                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                         | Коэф-т |
|                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Cr, Co, Mn, Ni, Si, W                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                         | 4      |
|                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                         | 10     |
|                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Ce, N, P, S                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                         | 100    |
|                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                         | 1000   |
| <b>X</b> =<br><b>G</b> =<br>стальное литье<br>Ставится впереди, если необходимо | <i>Легированные стали (кроме быстрорежущих) со средним содержанием по меньшей мере одного легирующего элемента более 5%</i><br>Например: <b>X5CrNi18-10</b><br>ранее: <b>X 5 CrNi 18 10</b><br>Первое число: среднее содержание углерода, умноженное на 100 (до трех цифр)                                         | <b>Легирующие элементы: Буквы:</b> символы химических элементов, выстроенные по убыванию содержания элементов (при одинаковом содержании – в алфавитном порядке)<br><b>Цифры:</b> отделены тире, соответствуют среднему содержанию элемента                                                                                                                                                                                                                               |                                         |        |

Продолжение таблицы 15

| 1          | 2                                                                                                                                                                        | 3                                       | 4                                       |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>HS=</b> | <i>Быстрорежущие стали</i> Например: <b>HS2-9-1-8</b> ранее: <b>HS 2-9-1-8</b><br>Числа, отделенные тире: содержания легирующих элементов в следующем порядке: W-Mo-V-Co | Дополнительные символы не предусмотрены | Дополнительные символы не предусмотрены |

Рассмотрим, как расшифровываются приведенные в таблице 3 примеры.

**«S355J0** – конструкционная сталь с минимальным пределом текучести  $355 \text{ Н/мм}^2$  и работой разрушения при ударе 27 Дж, измеренной при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

**P265B** – сталь для баллонов со сжатым газом с минимальным пределом текучести  $265 \text{ Н/мм}^2$ .

**L360QB** – термообработанная сталь для магистральных трубопроводов с минимальным пределом текучести  $360 \text{ Н/мм}^2$ .

**E295** – машиностроительная сталь с минимальным пределом текучести  $295 \text{ Н/мм}^2$ .

**B500N** – арматурная сталь с пределом текучести  $500 \text{ Н/мм}^2$  нормальной вытяжки.

**Y1770C** – холодноотянутая проволока из стали для предварительно-напряженных конструкций с минимальным временным сопротивлением  $1770 \text{ Н/мм}^2$ .

**R0880Mn** – рельсовая сталь с высоким содержанием марганца с минимальным временным сопротивлением  $880 \text{ Н/мм}^2$ .

**H420M** – термомеханически упрочненная листовая высокопрочная сталь для холодной штамповки с минимальным пределом текучести  $420 \text{ Н/мм}^2$ .

**DC12EK** – холоднокатаная листовая сталь для холодной штамповки для эмалирования.

**T660** – упаковочный лист (лента) с заданным пределом текучести для двойного обжатия  $660 \text{ Н/мм}^2$ .

**TH52** – упаковочный лист (лента) с твердостью 52.

**M400-50A** – электротехническая сталь с предельно допустимыми потерями на перемагничивание  $4 \text{ Вт/кг}$  для магнитной индукции от 1.5 Тесла при частоте 50 Гц с неориентированным зерном.

**Группа 2.** В группу 2 включены стали, наименования которых определяются их химическим составом. Группа 2 разделена на четыре подгруппы в зависимости от назначения и содержания легирующих элементов (см. таблицу 12).

Рассмотрим приведенные в таблице, а также дополнительные примеры.

**C35E** – нелегированная сталь со средним содержанием углерода 0.35%, с содержанием марганца менее 1% и заданным максимальным содержанием серы.

**28Mn6** – нелегированная сталь со средним содержанием углерода 0.28% и марганца 1.5% (6, деленное на коэффициент 4).

**13CrMo4-5** – нелегированная сталь со средним содержанием: углерода – 0.13%, хрома – 1%, молибдена – 0.5% и содержанием марганца более 1%.

**X5CrNi18-10** – легированная сталь со средним содержанием: углерода – 0.05%, хрома – 18.0%, никеля – 10.0%.»

Таблица 16 - Нумерация сталей по EN 10027

| Назначение стали     | Группа сталей                                         | Порядковые номера |
|----------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|
| Нелегированные стали | Стали обыкновенного качества                          | 1.00XX            |
|                      | Качественные стали                                    | 1.01XX – 1.09XX   |
|                      | Высококачественные стали                              | 1.10XX – 1.13XX   |
|                      | Инструментальные нелегированные стали                 | 1.15XX – 1.18XX   |
| Легированные стали   | Инструментальные легированные стали                   | 1.20XX – 1.28XX   |
|                      | Быстрорежущие стали                                   | 1.32XX – 1.33XX   |
|                      | Износостойкие стали                                   | 1.34XX            |
|                      | Подшипниковые стали                                   | 1.35XX            |
|                      | Материалы со специальными свойствами                  | 1.36XX – 1.39XX   |
|                      | Нержавеющие стали                                     | 1.40XX – 1.45XX   |
|                      | Жаропрочные и жаростойкие стали                       | 1.46XX – 1.49XX   |
|                      | Высококачественные легированные конструкционные стали | 1.50XX – 1.85XX   |
|                      | Свариваемые высококачественные стали                  | 1.87XX – 1.89XX   |

**Порядковые номера.** «Порядок присвоения сталям порядковых номеров определяется Европейским стандартом EN 10027 Часть 2. Порядковый номер стали представляется в виде **1.XXXX**, где **1.** определяет, что данный материал относится к сталям. В дальнейшем при расширении принятой системы нумерации предполагается использовать последующие цифры для обозначения других материалов (в немецкой системе нумерации материалов, являющейся прообразом Европейской, символ **0**. Используется, например, для обозначения чугунов, **2.** – для обозначения жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта, **3.** - для обозначения цветных металлов и сплавов). Следующие две цифры после **1.** определяют номер группы сталей, а две последние – порядковый номер стали в группе.

По номеру группы можно однозначно определить к какому типу относится та или иная сталь. В таблице 16 приведены интервалы номеров, используемых для различных типов сталей. Более подробную классификацию можно найти непосредственно в стандарте EN 10027 Часть 2.»

## 9.2 Задание:

1. Изучить теоретические сведения о маркировке сталей по стандарту ГОСТ и стандарту EN

2.Расшифруйте марки углеродистых и легированных сталей согласно своему варианту.

Таблица 17 -Варианты задания

| № п/п | Вариант № 1 | Вариант № 2 |
|-------|-------------|-------------|
| 1     | 15XГН2ТА    | Ст3 пс      |
| 2     | Ст 20       | Ст 1 Гсп    |
| 3     | 08 кп       | 05пс        |
| 4     | У7-III      | У14А        |
| 5     | У8А         | М400-50А    |
| 6     | У2Г         | У10ГА       |
| 7     | 15ХГНР      | М400-50А    |
| 8     | 30Г         | 45Г         |
| 9     | L360QB      | 38ХС        |
| 10    | 15ХФА       | R0880Mn     |
| 11    | 20НМ        | 40ХНР       |
| 12    | ВСт1 кп     | 20ХГНР      |
| 13    | 20ХГНТР     | 18Х2Н4МАШ   |
| 14    | HS2-9-1-8   | 25Х2Н4МА    |
| 15    | 30ХН2МФ     | 20ХН4ФА     |
| 16    | С35Е        | X5CrNi18-10 |
| 17    | 15ХГСН2А    | 18ХГТ       |
| 18    | S355J0      | 10Г2        |
| 19    | 38ХГН       | 38Х4Ф3Ш     |
| 20    | A12         | A40         |
| 21    | P9          | P15         |
| 22    | P8M5K8      | P7M4K5      |
| 23    | DC12ЕК      | 09Х15Н8Ю    |

3. Из марочника сталей выберете несколько марок углеродистой, легированной, инструментальной стали. Проанализируйте их состав, найдите аналоги по стандарту EN. Определите области применения, выбранных типов сталей. Данные занесите в таблицы 18, 19, 20.

Таблица 18 – Состав углеродистой стали

| Наименование | Марка стали | Аналог по Стандарту EN | Содержание углерода, С % | Способ изготовления | Область применения |
|--------------|-------------|------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|
| Углеродистая |             |                        |                          |                     |                    |
|              |             |                        |                          |                     |                    |
|              |             |                        |                          |                     |                    |

Таблица 19 – Состав легированной стали

| Название стали | Марка стали | Содержание углерода, % | Содержание легирующих элементов, % | Аналог по Стандарту EN | Качество стали | Способ изготовления | Область применения |
|----------------|-------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Легированная   |             |                        |                                    |                        |                |                     |                    |
|                |             |                        |                                    |                        |                |                     |                    |
|                |             |                        |                                    |                        |                |                     |                    |

Таблица 20 - Состав инструментальной стали

| Название стали   | Марка стали | Аналог по Стандарту EN | Содержание углерода, % | Содержание легирующих элементов, % | Качество стали | Способ изготовления | Область применения |
|------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Инструментальная |             |                        |                        |                                    |                |                     |                    |
|                  |             |                        |                        |                                    |                |                     |                    |

5. Вывод о проделанной работе.

### 9.3 Контрольные вопросы:

1. Как классифицируются стали по химическому составу, качеству и назначению?
2. Как влияет различное содержание углерода в углеродистой стали на ее механические свойства?
3. Для чего вводят в сталь легирующие элементы?
5. Какие стали относятся к инструментальным?
6. Какой буквой обозначается быстрорежущая инструментальная сталь?
7. Какой евростандарт регламентирует состав сталей?
8. Чем отличается стандарт ГОСТ от стандарта EN?
9. Что обозначает буква А в конце маркировки стали?
10. Назовите область применения легированных сталей.



## Практическая работа №10

### Тема: Микроскопическое исследование структуры медных сплавов

**Цель работы:** Формирование практических навыков микроанализа медных сплавов. Изучение диаграмм состояния и промышленной маркировки медных сплавов.

#### 10.1 Теоретические основы.

Медь – «это пластичный металл светло-розового цвета, плавится при  $1083^{\circ}\text{C}$ , имеет плотность  $8,96\text{ г/см}^3$  обладает гранецентрированной кубической решеткой. Отличительная особенность меди - ее малое электросопротивление, высокая теплопроводность, хорошая коррозионная стойкость во многих естественных средах (атмосфера, земля, морская и пресная вода). Последнее свойство объясняется как химической стойкостью самой меди (по электрохимическому потенциалу медь положительнее водорода), так и устойчивостью образующихся продуктов коррозии.

Предел прочности меди в отожженном состоянии составляет  $\sigma_{\text{в}}=250\text{ МПа}$ , относительное удлинение 50 %, относительное сужение 75 %. Для упрочнения меди используется наклеп. Путем наклепа можно довести  $\sigma_{\text{в}}$  до 450 МПа, но при этом пластичность понижается.» [11]

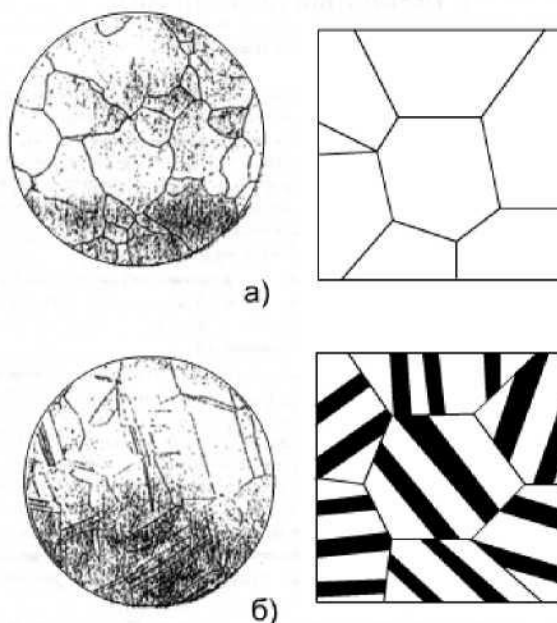


Рисунок 38 - Микроструктура меди (справа - схематическое изображение)  
а - литая; б - холоднодеформированная, после рекристаллизационного отжига

«Примеси оказывают существенное влияние на механические, технологические и физические свойства меди. Растворимые примеси (Al, Sn, Zn и др.) повышают механические свойства, но значительно снижают электро- и теплопроводность. Нерастворимые примеси (Pb, Bi) образуют легкоплавкие эвтектики, которые затрудняют горячую обработку давлением из-за горячеголомкости. Примеси (S, O) образуют тугоплавкие эвтектики, которые располагаются по границам зерен, что приводит к появлению хрупкости меди. Микроструктура литой меди, как видно из рисунка 38, а, полиэдрическая, зернистая. Микроструктура холоднодеформированной меди, подвергнутой последующему рекристаллизационному отжигу, такая же, но с наличием двойников, это показано на рисунке 38, б.

Химический состав меди и свойства нормированы ГОСТом 859-78. Медь поставляют в мягком (отожженном) и твердом состоянии. Она применяется для изготовления сплавов на медной основе, токопроводящих деталей, фольги и т.п. Марки сплавов и содержание меди в сплавах приведены в таблице 21.» [11]

Таблица 21 - Медь, применяемая в судостроении: марки, назначение

| Марка металла | Содержание меди, %, не менее | Примеры применения                                                                                                                                         |
|---------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| М0<br>М1      | 99,95<br>99,90               | Для изготовления сплавов на медной основе, применяемых для фасонного литья слитков обрабатываемых давлением                                                |
| М3            | 99,5                         | Для производства труб, трубопроводов морской воды, в том числе паропроводов отработавшего пара при температуре до 250 °С, патрубков циркуляционных насосов |
| М4            | 99,0                         | Для приготовления сплавов на медной основе, применяемых для фасонного литья                                                                                |

«Латуни представляют собой двойные или многокомпонентные медные сплавы, в которых цинк является основным легирующим компонентом. Цинк способен растворяться в меди в твердом состоянии до 39 %, это видно из рисунка 39,а.

Латуни. Твердый раствор Zn в Cu имеет кристаллическую решетку меди и называется  $\alpha$  - фазой. При содержании цинка, превышающем 39 %, наряду с  $\alpha$  - фазой образуется  $\beta$  - фаза, представляющая собой твердый раствор на базе химического соединения.

Количество  $\beta$  -фазы зависит от того, насколько содержание цинка превышает его предел растворимости в меди (39 %). Поэтому латуни, содержащие цинк до 39 %, имеют структуру, состоящую из зерен  $\alpha$  - фазы и называются однофазными. Латуни с содержанием цинка более, 39 %, но менее 46 % имеют структуру, состоящую из зерен  $\alpha$  и  $\beta$  - фазы и относятся к двухфазным.» [11]

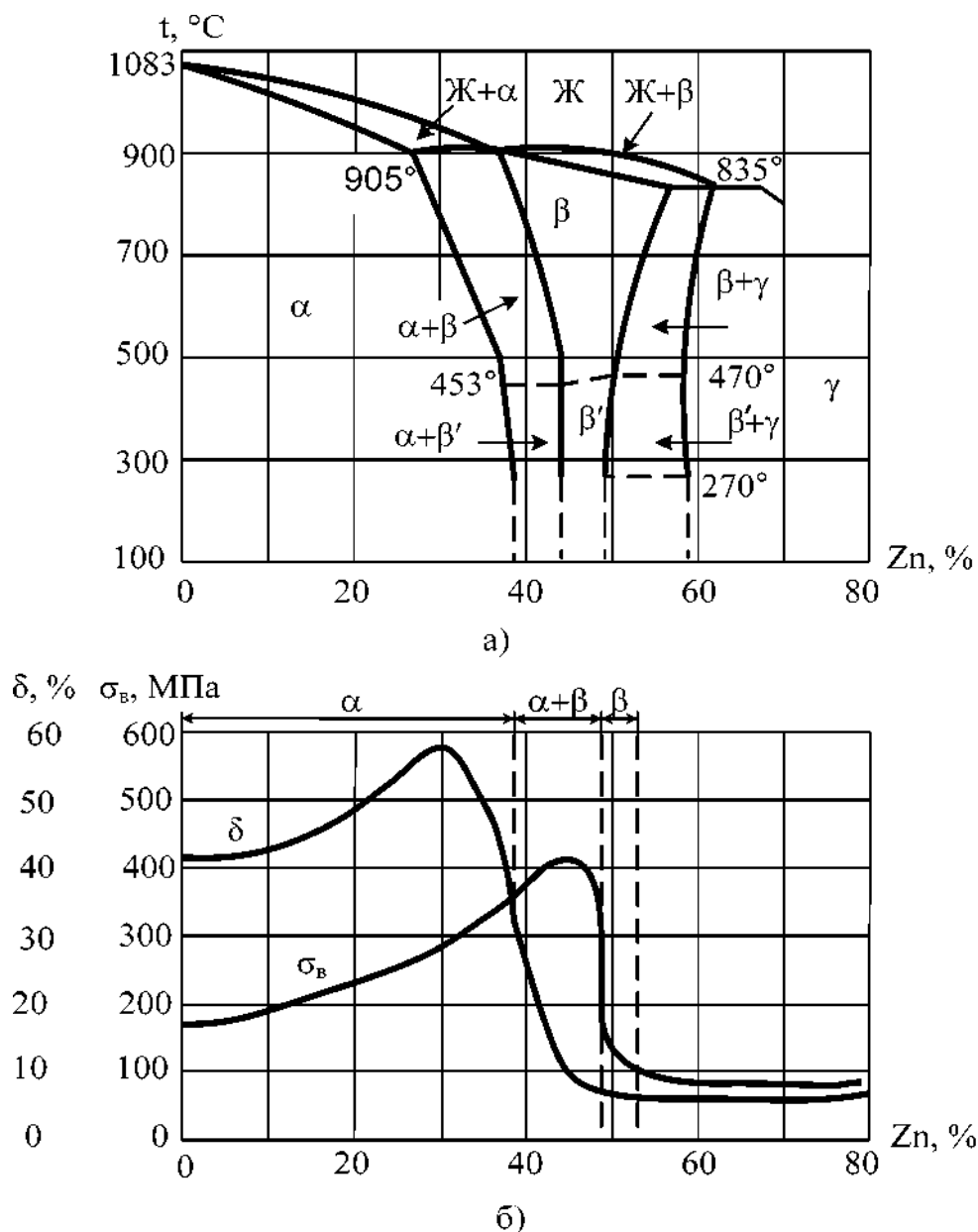


Рисунок 39 - Диаграмма состояния медь-цинк и механические свойства латуни:

а - диаграмма состояния медь-цинк; б - график изменения механических свойств латуней, в зависимости от содержания цинка:

$\delta$  - относительной удлинение;  $\sigma_{\text{в}}$  - предел прочности

«Микроструктура литой однофазной латуни имеет дендритное строение, как видно из рисунка 40, а.

Эта же латунь после холодной обработки давлением и рекристаллизационного отжига, имеет зернистую структуру с наличием двойников, как показано на рисунке 40,б.»

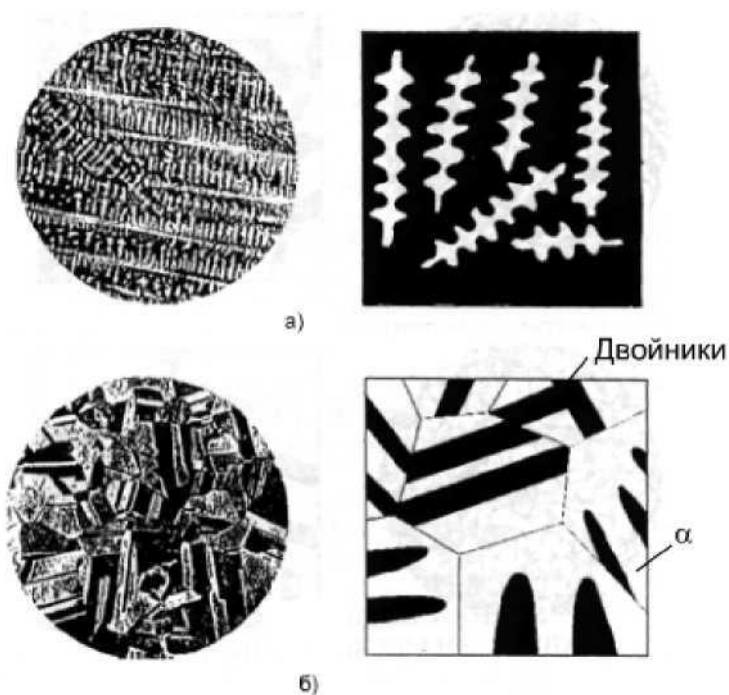


Рисунок 40 - Микроструктура однофазной латуни (справа - схематическое изображение):

а - литая; б - деформированная и отожженная

«Микроструктура литой двухфазной  $\alpha + \beta$  - латуни состоит из светлых зерен  $\alpha$  - фазы и темных зерен  $\alpha$  - фазы. В деформированной и отожженной  $\alpha + \beta$  - латуни на зернах  $\alpha$  - фазы имеются ее двойники, это видно из рисунка 41» [11]

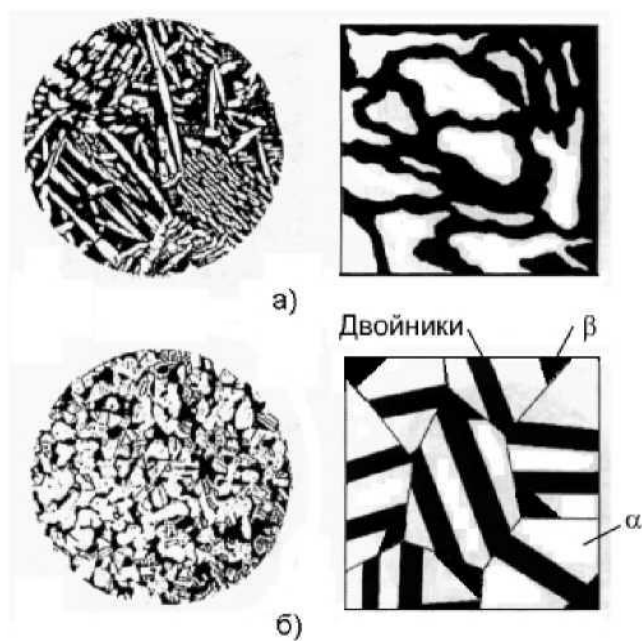


Рисунок 41 - Микроструктура двухфазной латуни (справа - схематическое изображение):

а – литая; б – после деформации и отжига

«Таким образом, латуни, содержащие от 39 % до 46 % Zn, имеют двухфазную структуру  $\alpha + \beta$  и обладают низкой пластичностью, поэтому они хорошо обрабатываются давлением лишь в горячем состоянии, в отличие от  $\alpha$  -латуни, которая хорошо обрабатывается в холодном состоянии.

По технологическому признаку латуни подразделяют на литейные и обрабатываемые давлением. Физические и механические свойства латуней, обрабатываемых давлением, нормируются ГОСТом 15527-70.

Двойные латуни маркируются буквой Л и числом, характеризующим среднее содержание меди в сплаве, что отражено в таблице 22.» [11]

Таблица 22 - Двойные деформированные латуни, применяемые в судостроении: марки назначение ГОСТ 15527-70.

| Марка металла | Наименование сплава | Медь, % | Примеры применения                                        | Фазовый состав |
|---------------|---------------------|---------|-----------------------------------------------------------|----------------|
| Л96           | Томпак              | 96      | Ножи рубильников                                          | $\alpha$       |
| Л90           | Томпак              | 90      | Фланцы трубопроводов морской воды                         | $\alpha$       |
| Л68           | Латунь              | 68      | Трубы теплообменных аппаратов в средах                    | $\alpha$       |
| Л62           | Латунь              | 62      | Пар-конденсат, детали, не соприкасающиеся с морской водой | $\alpha$       |

«Для повышения прочности, коррозионной стойкости и некоторых специальных свойств разработаны специальные многокомпонентные латуни. Состав сложных латуней отражается в ее марке, где большие буквы А, Н, Мц, К, О, Ж обозначают соответственно алюминий, никель, марганец, кремний, олово, железо, а цифры, следующие после содержания меди, показывают процентное содержание данного металла в сплаве. Олово существенно снижает обесцинкование латуней при работе в пресной и морской воде, поэтому оловянные латуни иногда называют «морскими» (ЛО90-1, ЛО62-1).

Марганец улучшает стойкость латуней (ЛМц 58-2). Кремний резко упрочняет латуни, также повышает коррозионную стойкость (ЛК80-3). Более сложные по составу латуни содержат совместно алюминий (до 2 %), железо, никель, марганец, кремний (по 1-3 %). Отличительная особенность этих сплавов еще более высокая прочность и стойкость в различных средах. К этой группе сплавов относятся латунь ЛЖМц59-1-1.

Для улучшения обработки резанием (точение, сверление и пр.) в некоторые двойные латуни вводят свинец (ЛС59-1). Он не растворяется в меди и в структуре распределен в виде отдельных включений. При обработке резанием латуни, в структуре которой имеются мелкие равномерно распределенные включения

свинца, получается сыпучая, а не витая стружка. Это не только облегчает процесс обработки резанием, но и позволяет получать чистую без заусенцев отработанную поверхность.

В таблице 23 приведены примеры специальных латуней, обрабатываемых давлением. Они широко применяются в судостроении в качестве антифрикционных материалов и для деталей судовой арматуры.»

Таблица 23 - Деформируемые латуни ГОСТ15527-70

| Марка металла    | Наименование сплава        | Содержание Zn, %,      | Примеры применения                                       |
|------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------|
| ЛО70-1<br>ЛО62-1 | Латунь оловянная           | 29 Sn - 1 37 Sn<br>- 1 | Трубы теплообменных аппаратов работающих на морской воде |
|                  |                            |                        | Фланцы трубопроводов морской воды                        |
| ЛЖМц59-1-1       | Латунь железо-марган-цевая | 39 Мп - 1 39 Fe - 1    | Детали арматуры, работающие при температуре до 250 °С    |
| ЛС59-1           | Латунь свинцовая           | 40 0,6 - 1             | Детали иллюминаторов, детали, работающие на трение       |

«Литейные латуни нормируются по ГОСТ 17711-93, они содержат те же элементы, что и латуни, обрабатываемые давлением, от последних литейные латуни отличает, как правило, большее легирование цинком и другими металлами. Вследствие малого интервала кристаллизации литейные латуни обладают хорошими литейными характеристиками. В марке литейной латуни указывается содержание цинка. Например: ЛЦ40С - литейная латунь, содержащая 40 % Zn и 1 % Pb. В таблице 24 указаны состав и область применения литейных сплавов. В таблице 25 представлен фазовый состав различных марок латуней»

Таблица 24 - Литейные латуни ГОСТ 17711-93

| Марка металла | Содержание добавок Zn, %, | Примеры применения                  |
|---------------|---------------------------|-------------------------------------|
| ЛЦ40Мц3Ж      | 40 Мп - 3 Fe - 4          | Гребные винты                       |
| ЛЦ16К4        | 38 Мп - 1                 | Арматура работающая в морской воде, |
|               | Pb - 2                    | при протекторной защите до 250 °С   |
| ЛЖ38Мц2С2     | 38 Мп - 1 Pb - 2          | Антифрикционные детали              |

Таблица 25 - Состав и структура некоторых марок латуней

| Марка сплава | Содержание цинка | Фазовый состав                                    |
|--------------|------------------|---------------------------------------------------|
| Л96          | 4                | $\alpha$                                          |
| ЛА77-2       | 21               | $\alpha$                                          |
| ЛАЖ60-1-1    | 38               | $\alpha + \beta + \gamma - \text{Fe}$             |
| ЛАН59-3-2    | 36               | $\alpha + \beta$                                  |
| ЛО60-1       | 37               | $\alpha + \beta$                                  |
| ЛС59-1       | 40               | $\alpha + \beta + \text{Pb}$                      |
| ЛЖС58-1-1    | 40               | $\alpha + \beta + \text{Pb} + \gamma - \text{Fe}$ |

**Бронзы.** «Бронзами называют сплавы меди, в которых цинк и никель не являются основными легирующими элементами. Название бронзам дают по названию основного легирующего элемента, например, оловянная, алюминиевая и т.п. Отдельные бронзы в качестве легирующего компонента содержат цинк, но он не является основным. По фазовому составу бронзы делят на однофазные и двухфазные. Однофазные бронзы состоят из зерен твердого раствора легирующих элементов в меди, называемого  $\alpha$  - фазой. По технологическому признаку бронзы, как и латуни, делят на две группы: литейные и деформируемые. Литая однофазная бронза имеет структуру неоднородного твердого раствора, т.е. дендритную структуру. Дендриты любого сплава всегда обогащены более тугоплавким компонентом, а междендритные объемы - более легкоплавким.» Схемы микроструктуры литой и деформированной однофазных бронз аналогичны соответствующим схемам латуни (см. рисунок 40).

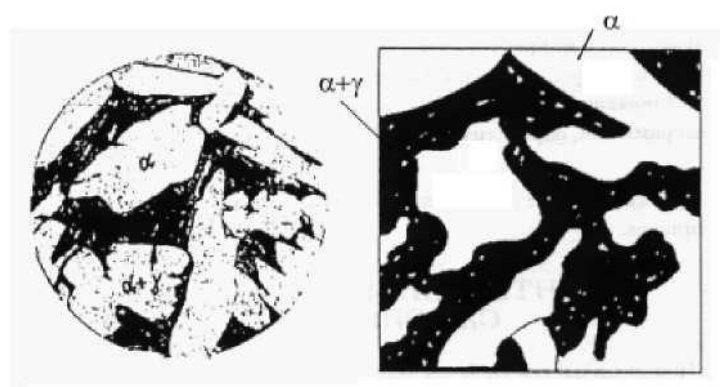


Рисунок 42 - Микроструктура литой двухфазной бронзы (справа - схематическое изображение)

«В двухфазных бронзах наряду с  $\alpha$  - фазой присутствуют кристаллы более твердого химического соединения той или иной природы, которые могут присутствовать в структуре либо в виде отдельных кристаллов, либо являться составной частью эвтектоида. Например, микроструктура литой двухфазной бронзы БрА10 состоит из следующих структурных составляющих - светлых

участков  $\alpha$ -фазы (это твердый раствор алюминия в меди) и темных участков эвтектоидной смеси  $\alpha$ -фазы и химического соединения, как это показано на рисунке 42.»

Оловянные бронзы – «это сплавы меди с оловом, которые могут содержать добавки фосфора, свинца, цинка, никеля и других легирующих элементов. Обладая достаточной прочностью, они имеют высокую коррозионную стойкость (особенно в морской воде), хорошие антифрикционные свойства, низкий коэффициент трения, высокое сопротивление износу. Небольшие добавки фосфора (от 0,1 % до 0,4 %) в оловянные бронзы вводят с целью их раскисления. Добавки цинка улучшают литейные свойства (вследствие уменьшения интервала кристаллизации), а добавки свинца - антифрикционные свойства.»

«Алюминиевые бронзы содержат обычно добавки марганца, железа, никеля, свинца. Марганец улучшает коррозионную стойкость, никель и железопропрочностные свойства, свинец - антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием алюминиевых бронз.

Помимо оловянных и алюминиевых бронз в судовых механизмах применяются кремнистые и бериллиевые бронзы. Последние близки к алюминиевым бронзам по значению свойств и технологическим характеристикам. В таблице 26 указаны области применения бронз, обрабатываемых давлением.» [11]

Таблица 26 - Примеры применения бронз, обрабатываемых давлением

| Марка металла                       | Примеры применения                                                                                  |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Бронзы оловянные (ГОСТ 5017-74)     |                                                                                                     |
| БрОЦ4-3                             | Пружины                                                                                             |
| БрОФ6,5-0,15                        | Особоответственные пружинные контакты                                                               |
| БрОФ7-0,2                           | Детали, работающие на трение                                                                        |
| Бронзы безоловянные (ГОСТ 18175-78) |                                                                                                     |
| БрАЖ9-4                             | Детали арматуры работающие (до 250°C), маслоработающие в пресной воде; детали, работающие на трение |
| БрАМц9-2                            | Детали арматуры работающие (до 250°C),                                                              |
| БрАЖМц 10-30-1,5                    | Игольчатые клапаны, втулки сальников (до 250°C), пресная вода, масло, жидкое топливо.               |
| БрКМц3-1                            | Пружины цилиндрические (до 200°C),                                                                  |
| БрБ2                                | Судовое машиностроение: мембраны, детали часовых механизмов                                         |

Большинство литейных оловянных бронз применяется для изготовления ответственных отливок. Отливки из алюминиевых бронз обычно получают ли-



тьем в кокиль или песчаные формы. Обратите внимание на особенность маркировки литейных бронз. В таблице 27 приведен химический состав и маркировка литейных бронз по ГОСТу 613-79.

Таблица 27 - Химический состав литейных бронз ГОСТ613-79

| Марка металла | Содержание добавок, % |    |    |                 | Температура начала кристаллизации, °С |
|---------------|-----------------------|----|----|-----------------|---------------------------------------|
|               | Sn                    | Pb | Zn | Прочее          |                                       |
| БрО10Ц2       | 10                    | -  | 2  | -               | 1000                                  |
| БрО8Ц4        | 8                     | -  | 4  | -               | 1000                                  |
| БрО5Ц5С5      | 5                     | 5  | 5  | -               | 975                                   |
| БрО10Ф1       | 10                    | -  | -  | Al              | 934                                   |
| БрА9Мц2       | -                     | -  | -  | Al 9Mn2         | 1110                                  |
| БрА10Мц2      | -                     | -  | -  | Al 10Mn2        | 1010                                  |
| БрА9Ж3        | -                     | -  | -  | Al 9Fe3         | 1040                                  |
| БрА9Ж4Н4Мц1   | -                     | -  | -  | Al 9Fe4 Ni 4Mn1 | 1080                                  |

## 10.2 Задание и порядок выполнения работы.

1. Изучить теоретические основы и области применения меди и сплавов на основе меди.

2. Исследовать микроструктуру полученных образцов пользуясь 100 - 630 кратным увеличением и измерить твердость. Установить связи между строением, механическими свойствами и классификационными признаками.

3. Нарисовать микроструктуры предложенных образцов с указанием структурных составляющих.

## 10.3 Содержание отчета.

Отчет должен содержать следующие пункты:

1. Наименование работы, ее цель и краткие теоретические сведения об алюминиевых сплавах, области применения.

2. Изобразить график изменения механических свойств латуней (см. рисунок 39, б).

3. Ознакомиться со схемами микроструктур латуней. Изучить их химический состав, механические свойства, применение. Зарисовать микроструктуры латуней и сформировать таблицу свойств.

4. Изучить схемы микроструктуры бронз в литом состоянии. Их химический состав и применение. Зарисовать микроструктуры бронз и сформировать таблицу свойств.

5. Сделать выводы о проделанной работе

#### **10.4 Контрольные вопросы для самопроверки:**

1. Назовите свойства меди.
2. Для чего упрочняют медь? Назовите методы упрочнения.
3. Какой тип решетки имеет медь?
4. Расскажите о влиянии примесей на медь.
5. Какой ГОСТ регламентирует состав меди
6. Какая марка меди (М2 или М3) имеет больше всего примесей?
7. Что такое латунь?
8. Влияние цинка на свойства латуней?
9. Какая латунь называется однофазной?
10. Чем отличаются однофазные и двухфазные латуни?
11. Что такое томпак?
12. Как маркируется деформированная латунь?
13. Как маркируется литейная латунь?
14. Какая латунь считается многокомпонентной специальной латунью?
15. Что такое бронза?
16. Охарактеризуйте свойства оловянных бронз.
17. Есть ли разница в маркировке литых и кованных бронз?
18. Как классифицируют бронзы по фазовому составу?
19. Как классифицируют бронзы по химическому составу?
20. Как классифицируют бронзы по технологии?
21. Где используется бронза?
22. Где используются латуни?

## Практическая работа № 11

**Тема: Микроскопическое исследование структуры алюминиевых сплавов**

**Цель работы:** Формирование практических навыков микроанализа алюминиевых сплавов. Изучение диаграмм состояния и промышленной маркировки алюминиевых сплавов.

### 11.1 Теоретические основы.

Среди металлов алюминий по распространенности в природе занимает первое место, по практическому использованию - второе (после железа). Алюминий – «химический элемент, находящийся в третьей группе периодической системы Д.И. Менделеева. Атомный номер алюминия 13, атомная масса 26,98, температура плавления 660 °С, плотность 2,7 г/см<sup>3</sup>, полиморфных превращений не имеет, обладает решеткой гранецентрированного куба с периодом  $a = 0,4041$  нм.»

Алюминий отличается от других металлов малой плотностью, высокими пластическими и коррозионностойкими свойствами, высокими тепло- и электропроводимостью, а также отражательной способностью.

Благодаря таким свойствам алюминий находит применение почти во всех отраслях промышленности - авиационной, строительной, химической и т.д.

В зависимости от содержания примесей алюминий разделяют на сорта: технический, высокой чистоты и особой чистоты.

В таблице 28 приведены некоторые марки, химический состав алюминия деформируемого (предназначенного для производства полуфабрикатов методом горячей или холодной деформации).

Таблица 28 - Алюминий деформируемый.

| Обозначение марок            | Химический состав, % | Сумма примесей |
|------------------------------|----------------------|----------------|
|                              | Прочие примеси       |                |
| Алюминий высокой чистоты     |                      |                |
| АДоч                         | 0,001                | 0,020          |
| АДч                          | 0,005                | 0,05           |
| Алюминий технической чистоты |                      |                |
| АД000                        | 0,02                 | 0,020          |
| АД00                         | 0,02                 | 0,030          |
| АД0                          | 0,02                 | 0,050          |
| АД1                          | 0,05                 | 0,070          |
| АД                           | 0,05                 | 1,2            |

Таблица 29 - Алюминий первичный.

| Обозначение марок            | Химический состав, % |                          |
|------------------------------|----------------------|--------------------------|
|                              | А1, не менее         | Примесей не более, сумма |
| Алюминий особой чистоты      |                      |                          |
| А 999                        | 0,005                | 0,001                    |
| Алюминий высокой чистоты     |                      |                          |
| А 995                        | 99,999               | 0,005                    |
| А 99                         | 99,99                | 0,010                    |
| А 95                         | 99,95                | 0,05                     |
| Алюминий технической чистоты |                      |                          |
| А 85                         | 99,85                | 0,15                     |
| А 8                          | 99,8                 | 0,20                     |
| А 7                          | 99,7                 | 0,30                     |
| А 5                          | 99,5                 | 0,50                     |
| А 0                          | 99,00                | 1,00                     |

«На алюминий первичный, поставляемый в форме чушек, слитков распространяется стандарт ГОСТ 11069-74, примеры обозначения марок которого приведены в таблице 29. Постоянные примеси алюминия - Fe, Si, Cu, Zn, Ti, они ухудшают все его свойства. Механические свойства алюминия зависят от его чистоты и состояния. Увеличение содержания примесей и пластическая деформация повышают прочность и твердость алюминия. Механические свойства алюминия различной чистоты отражены в таблице 30.

Алюминий характеризуется высокими технологическими свойствами. Из него могут быть изготовлены любые полуфабрикаты различных габаритов. Благодаря высокой пластичности полуфабрикаты из алюминия легко можно подвергать деформации без существенных нагревов. Сварка может осуществляться практически всеми методами, включая сварку плавлением. Обрабатываемость резанием вследствие высокой вязкости у алюминия плохая.» [11]

Таблица 30 - Механические свойства алюминия различной чистоты в отожженном состоянии.

| Чистота, % | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_{Тв}$ , МПа | НВ, МПа | $\delta$ , % |
|------------|----------------------|---------------------|---------|--------------|
| 99,99      | 22                   | 49                  | 84-112  | 45,5         |
| 99,8       | 25                   | 61                  | 133     | 38,5         |
| 99,5       | 28                   | 70                  | 126-175 | 31,5         |

Он используется в электротехнической промышленности и теплообменниках. Высокая отражательная способность алюминия используется для производства зеркал, мощных рефлекторов. Алюминий практически не взаимодействует с азотной кислотой, органическими кислотами и пищевыми продуктами. Из него изготавливается тара для транспортировки пищевых продуктов, домашняя

утварь. Листовой алюминий широко применяется как упаковочный материал. Значительно выросло применение алюминия в строительстве и на транспорте.

**Классификация алюминиевых сплавов.** «Деформируемые алюминиевые сплавы, неупрочняемые термической обработкой

В зависимости от способа производства промышленные алюминиевые сплавы делятся на спеченные, литейные и деформируемые. На рисунке 43 приведена диаграмма деформации, термически неупрочняемых сплавов.

Литейные сплавы претерпевают эвтектическое превращение, а деформируемые - нет. Последние в свою очередь бывают термически неупрочняемыми (сплавы в которых нет фазовых превращений в твердом состоянии) и деформируемые, термически упрочняемые (сплавы, упрочняемые закалкой и старением).

Алюминиевые сплавы обычно легируют Си, Mg, Si, Mn, Zn, реже Li, Ni, Ti.» [11]

К этой группе сплавов относятся технический алюминий и термически неупрочняемые свариваемые коррозионностойкие сплавы (сплавы алюминия с марганцем и магнием). Сплавы АМц относятся к системе Al - Mn. На рисунке 44 приведена диаграмма состояния «алюминий - марганец».

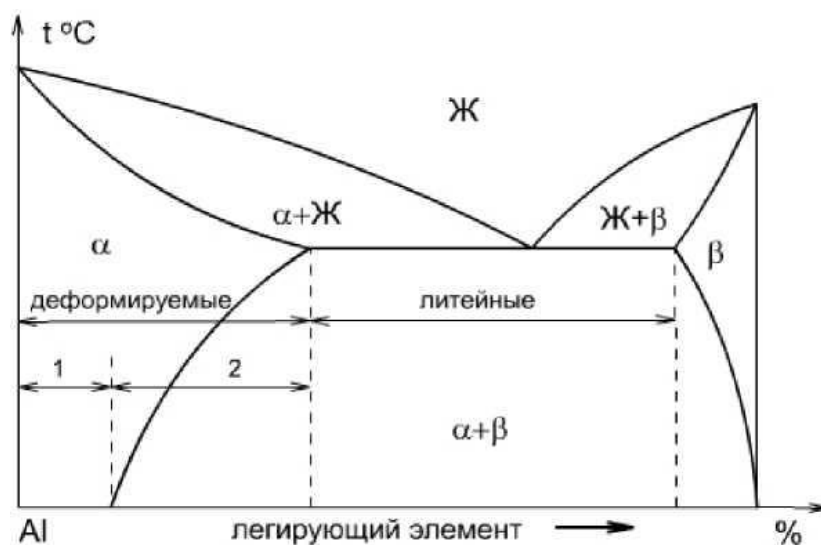


Рисунок 43 - Диаграмма состояний алюминий - легирующий элемент:

- 1 - деформируемые, термически неупрочняемые сплавы;
- 2 - деформируемые, термически упрочняемые сплавы

Структура сплава АМц, как показано на рисунке 45, состоит из α-твердого раствора марганца в алюминии и вторичных выделений фазы  $MnAl_6$ . В присутствии железа вместо  $MnAl_6$  образуется сложная фаза  $(MnFe)Al_6$ , практически нерастворимая в алюминии, поэтому сплав АМц и не упрочняется термической обработкой.

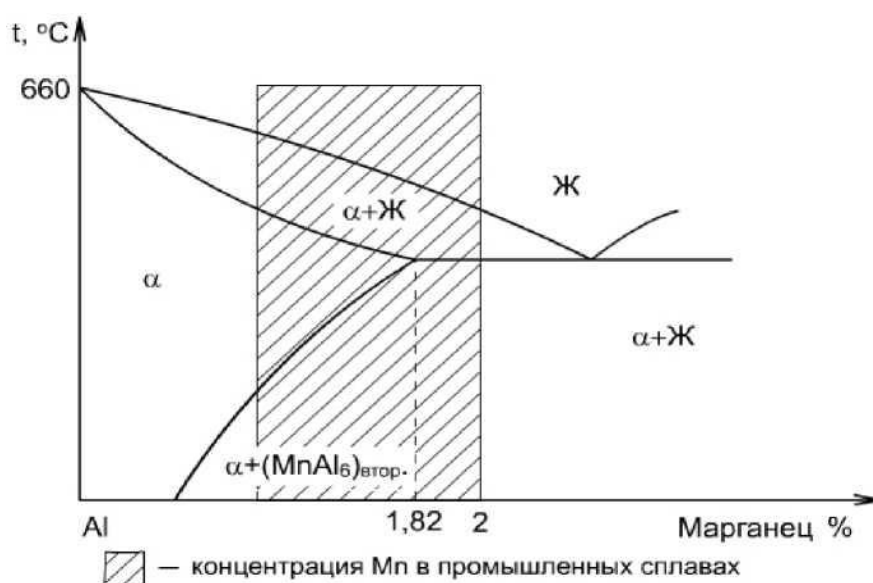


Рисунок 44 - Диаграмма состояния «алюминий - марганец»

«Состав данных сплавов имеет очень узкие пределы: от 1 % до 1,7 % Мп; от 0,05 % до 0,20 % Си; медь добавляют в целях уменьшения питтинговой коррозии.

Допускается до 0,6 - 0,7 % Fe и 0,6 - 0,7 % Si, что приводит к некоторому упрочнению сплавов без существенной потери сопротивления коррозии.»

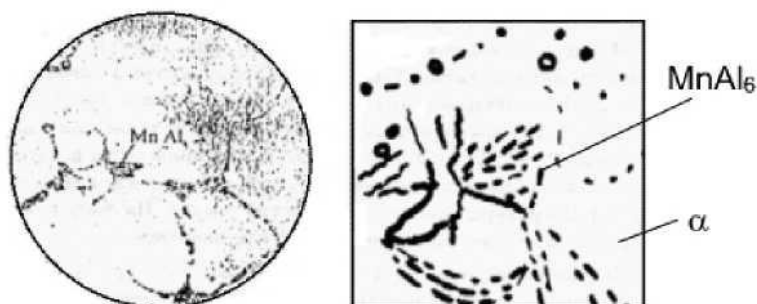


Рисунок 45 - Микроструктура сплава АМц

«При понижении температуры прочность быстро растет. Поэтому сплавы этой группы нашли широкое применение в криогенной технике.

Сплавы АМг (магналий) относятся к системе Al - Mg. Магний образует с алюминием  $\alpha$ -твердый раствор и в области концентраций от 1,4 % до 17,4 % Mg происходит выделение вторичной в-фазы (MgAl), но сплавы содержащие до 7 % Mg, дают очень незначительное упрочнение при термической обработке, поэтому их упрочняют пластической деформацией - нагартовкой.» Диаграмма состояния «алюминий - магний» показана на рисунке 46

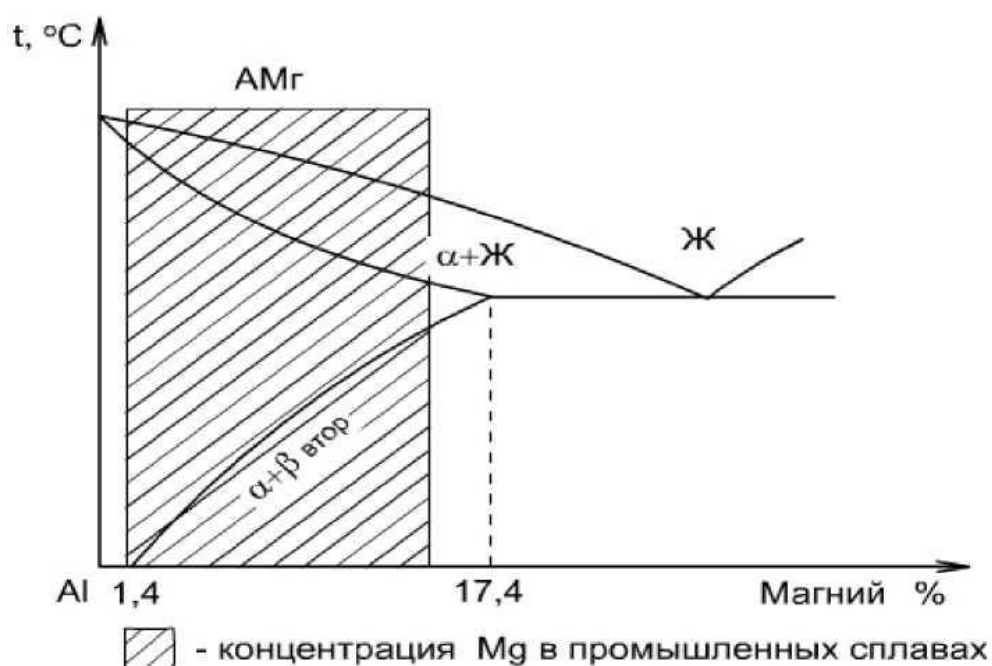


Рисунок 46 - Диаграмма состояния «алюминий - магний»

«Сплавы систем Al - Mn и Al - Mg используются в отожженном, нагартованном и полунагартованном состояниях. В промышленных сплавах магний содержится в пределах от 0,5 % до 12 - 13 %, сплавы с низким содержанием магния обладают наилучшей способностью к формообразованию, сплавы с высоким содержанием магния имеют хорошие литейные свойства. Характеристики деформируемых литейных сплавов приведены в таблицах 31, 32.

На судах из сплавов этой группы изготовлены спасательные боты, шлюпбалки, заборные трапы, дельные вещи и т.п.»

Таблица 31 - Состав некоторых деформируемых алюминиевых сплавов неупрочняемых термической обработкой.

| Обозначение марок |          | Химический состав, % |     |         |         |
|-------------------|----------|----------------------|-----|---------|---------|
| Буквенное         | Цифровое | Al                   | Cu  | Mn      | Mg      |
| АМц               | 14000    | Основа               | 0,1 | 1,0-1,6 | 0,2     |
| АМг1              | 1510     | Основа               | 0,1 | 0,2     | 0,7-1,6 |
| АМг3              | 1530     | Основа               | 0,1 | 0,3-0,6 | 3,2-3,8 |
| АМг4              | 1540     | Основа               | 0,1 | 0,5-0,8 | 3,8-4,5 |
| АМг6              | 1560     | Основа               | 0,1 | 0,5-0,8 | 5,8-6,8 |

Таблица 32 - Сплавы литейные на основе системы Al – Mg.

| Группа сплава                        | Марка сплава (старое название) | Массовая доля, % основных компонентов |            |           |           | Примесей не более железа |
|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------|-----------|-----------|--------------------------|
|                                      |                                | Mg                                    | Zr         | Be        | Ti        |                          |
| IV<br>Сплавы на основе системы Al-Mg | АМгбл (АЛ23)                   | 6,0-7,0                               | 0,05-0,2   | 0,02-0,1  | 0,05-0,15 | 0,2                      |
|                                      | АМг10 (АЛ27)                   | 9,5-10,5                              | 0,05-0,2   | 0,05-0,15 | 0,05-0,15 | 0,2                      |
|                                      | АМг11 (АЛ22)                   | 10,5-13,0                             | Si-0,8-1,2 | 0,03-0,07 | 0,05-0,15 | 1,2                      |
|                                      | АМг7 (АЛ29)                    | 6,0-8,0                               | Si-0,5-1,0 | Mn-0,4    | -         | 0,9                      |

### Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой

К этой группе сплавов относятся сплавы высокой и нормальной прочности. Составы некоторых деформируемых термически упрочняемых сплавов приведены в таблице 33. Типичными деформируемыми алюминиевыми сплавами являются дуралюмины (маркируют буквой Д) - сплавы системы Al - Si - Mg. Очень упрощенно процессы, проходящие при упрочняющей термической обработке дуралюмина можно рассмотреть, используя диаграмму Al - Si, показанную на рисунке 47.

Таблица 33 - Состав некоторых деформируемых термически упрочняемых сплавов

| Обозначение марок |          | Химический состав, % |         |         |     |        |     |         | Название сплава |
|-------------------|----------|----------------------|---------|---------|-----|--------|-----|---------|-----------------|
| Буквенное         | Цифровое | Cu                   | Mg      | Mn      | Zn  | Ni     | Fe  | Si      |                 |
| Д1                | 1110     | 3,8-4,8              | 0,4-0,8 | 0,4-0,8 | 0,3 | 0,1    | 0,7 | 0,7     | Дуралюмин       |
| Д16               | 1160     | 3,8-4,9              | 1,2-1,8 | 0,3-0,9 | 0,3 | 0,1    | 0,5 | 0,5     | Супердуралюмин  |
| АК8               | 1380     | 3,9-4,8              | 0,4-0,8 | 0,4-1,0 | 0,3 | 0,1    | 0,1 | 0,6-1,2 | Ковочный сплав  |
| В95               | 1950     | 1,4-2,0              | 1,8-2,8 | 0,2-0,6 | 0,6 | Cr-0,1 | 0,5 | 0,5     | Высокопрочный   |



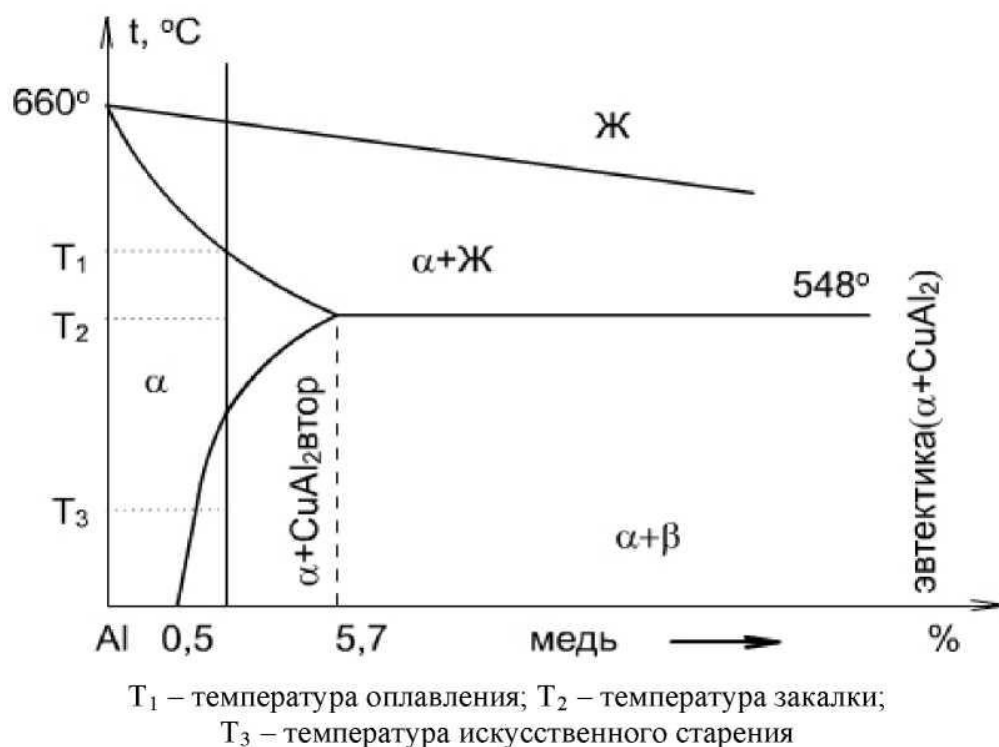


Рисунок 47 - Фрагмент диаграммы состояния «алюминий - медь».

При закалке, которая заключается в нагреве сплава выше линии переменной растворимости, выдержке при этой температуре и быстром охлаждении, фиксируется структура пересыщенного  $\alpha$  - твердого раствора (светлый фон, показанный на рисунке 47, а) и нерастворимых включений железистых и марганцовистых соединений (темные включения).

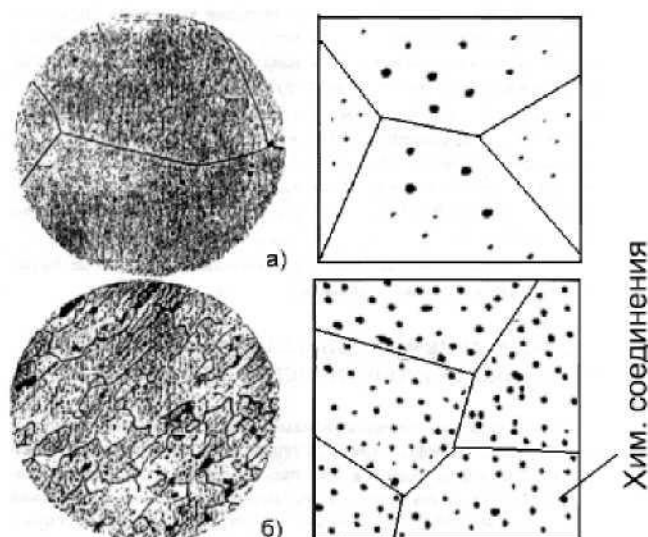


Рисунок 48 - Микроструктура дюралюмина:  
 а) закалка в воде с температуры  $T_2$ ; б) закалка и искусственное старение при  $T_3$  (справа - схематическое изображение)

«Сплав в свежезакаленном состоянии имеет небольшую прочность  $\sigma_b = 300$  МПа;  $\delta = 18\%$ ; твердость HB75. Пересыщенный твердый раствор неустойчив. Наивысшая прочность достигается при последующем старении закаленного сплава. Искусственное старение заключается в выдержке при температуре 150 - 180 °С. При этом из пересыщенного  $\alpha$  - твердого раствора выделяются упрочняющие фазы  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{CuMg}_2$ , и др.

Микроструктура состаренного сплава представлена на рисунке 48, б. Она состоит из твердого раствора и включений различных вышеперечисленных фаз.

**Литейные алюминиевые сплавы.** Действующий в настоящее время стандарт на алюминиевые сплавы (ГОСТ 1583-89) предусматривает их деление на пять групп:

- сплавы на основе системы Al - Si - Mg
- сплавы на основе системы Al - Si - Cu
- сплавы на основе системы Al - Cu
- сплавы на основе системы Al - Mg
- сплавы на основе системы алюминий - прочие компоненты.»

В таблице 34 приведены некоторые марки сплавов этой группы и их химический состав.

Таблица 34 - Некоторые литейные алюминиевые сплавы

| Группа сплава | Марка сплава | Старая марка сплава | Массовая доля, % |         |     |     |      |              |
|---------------|--------------|---------------------|------------------|---------|-----|-----|------|--------------|
|               |              |                     | Mg               | Si      | Mn  | Cu  | Ti   |              |
| I             | AK12         | АЛ2                 | -                | 10-13   | -   | -   | -    |              |
|               | AK8л         | АЛ34                | -                | 6,5-8,5 | -   | -   | -    |              |
| II            | AK5M         | АЛ5                 | 0,5              | 5,0     | -   | 1,2 | -    |              |
|               | AK8M         | АЛ32                | 0,4              | 83,0    | 0,4 | 1,2 | 0,2  |              |
| III           | AM5          | АЛ 19               | -                | -       | 0,8 | 5,0 | 0,3  | Cd-0,2       |
|               | AM4,5Кд      | ВАЛ 10              | -                | -       | 0,6 | 4,8 | 0,3  |              |
| IV            | AMг5к        | АЛ 13               | 5,0              | 1,1     | 0,3 | -   | -    | Be-0, Zr0,12 |
|               | AMг10        | АЛ27                | 10               | -       | -   | -   | 0,1  |              |
| V             | AK7Ц9        | АЛ11                | 0,2              | 7       |     |     |      | Zn-9         |
|               | АЦ4Мг        | АЛ24                | 1                | -       | 0,3 | -   | 0,15 | Zn9          |

«Характерным представителем алюминиевых литейных сплавов являются силумины - это сплавы алюминия с кремнием, обычно содержащие от 10 % до 13 % Si (AK12). Диаграмма состояния «алюминий - кремний» приведена на рисунке 49.

Микроструктура литых доэвтектических силуминов состоит из светлых дендритов  $\alpha$  - твердого раствора кремния в алюминии и двойной эвтектики  $\alpha + \text{Si}$  игольчатого типа, как показано на рисунке 50, в (т.к. растворимость Al в Si при комнатной температуре составляет 0,05 % , допустимо считать, что в структуре сплавов при низких температурах присутствует не в -твердый раствор, а кремний).»

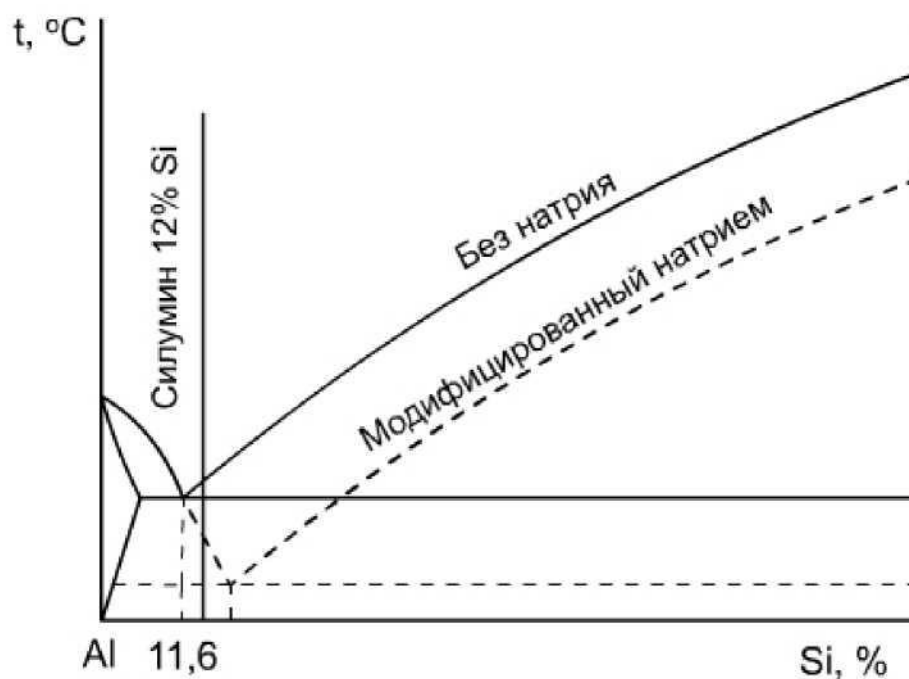


Рисунок 49 - Диаграмма состояния «алюминий - кремний»:  
а – общий вид, б – после введения модификатора

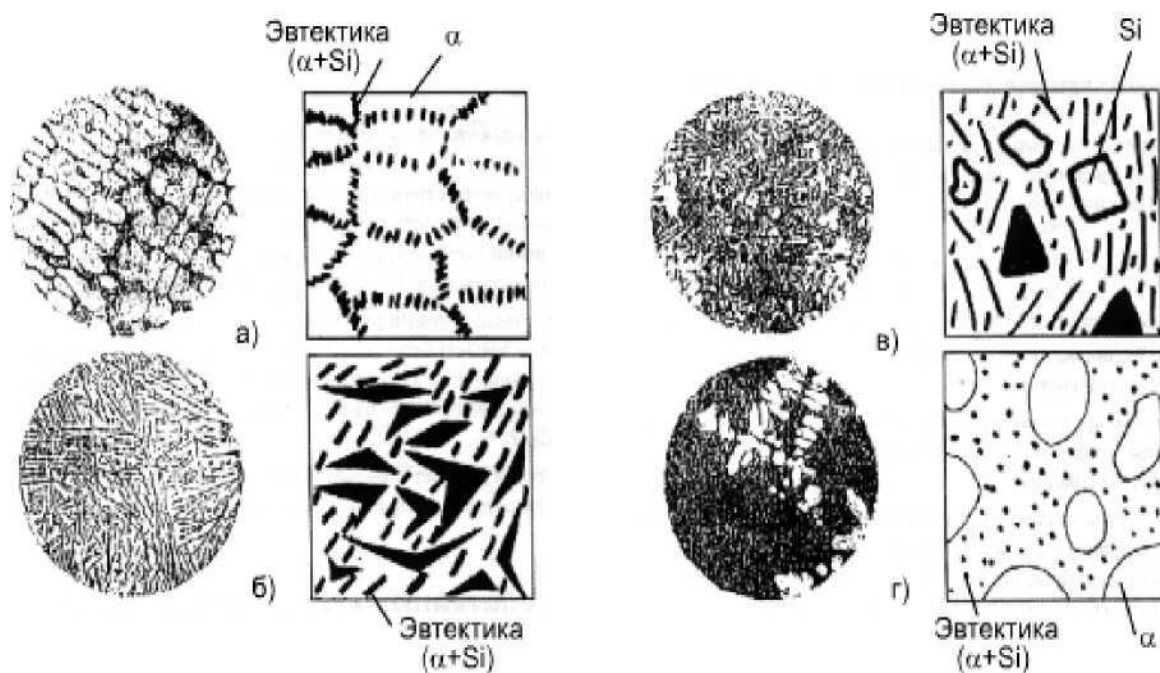


Рисунок 50 - Микроструктура силуминов (справа - схематическое изображение)  
а - доэвтектический, б - эвтектический, в - заэвтектический, г – модифицированный

«Микроструктура сплава эвтектического состава состоит из эвтектики  $\alpha + \text{Si}$ . При обычном способе литья эта эвтектика имеет грубое строение, это видно

из рисунка 50, б. Кремний в ней находится в виде грубых игл. В силуминах заэвтектического состава первично кристаллизуются многогранные кристаллы Si светло-серого цвета, как показано на рисунке 50, в. Кремний хрупок, поэтому силумины имеют низкие механические свойства ( $\sigma_{\text{в}} = 120 - 160 \text{ МПа}$ ,  $\delta = \text{от } 1 \% \text{ до } 2 \%$ ). Чтобы избавиться от грубой эвтектики и первичных кристаллов, сплавы модифицируют, т.е. перед разливкой в расплав вводят небольшое количество натрия (о 0,05 % до 0,08 % к массе сплава) или кальция, бора. В результате модифицирования (см. рисунок 49 - пунктир) увеличивается концентрация кремния в эвтектике (с 11,7 % до 15 %) и сплавы переохлаждаются относительно равновесно эвтектической температуры  $577^\circ\text{C}$ . Силумины заэвтектического состава, содержащие о 11,7 % до 15 % Si, становятся доэвтектическими, и в их структуре вместо первичных хрупких кристаллов кремния имеются дендриты пластического  $\alpha$  -твердого раствора (рис. 50 г). Переохлаждение приводит к формированию в структуре мелкозернистой эвтектики.

Модифицирование улучшает не только механические свойства силуминов ( $\sigma_{\text{в}} = 170 - 200 \text{ МПа}$ ,  $\delta = \text{от } 3 \% \text{ до } 5 \%$ ), но и литейные. Модифицированные силумины хорошо свариваются и имеют высокую коррозионную стойкость.

Для повышения прочности двойные силумины легируют магнием, медью и подвергают термической обработке.

По назначению конструкционные литейные алюминиевые сплавы условно делятся на следующие группы:

- сплавы, отличающиеся высокой герметичностью (АК12, АК8);
- высокопрочные жаропрочные сплавы (АМ5, АК5М);
- коррозионно-стойкие сплавы (АМг10; АЦ4Мг).»

## **11.2 Задание и порядок выполнения работы:**

1. Изучить теоретические основы и области применения алюминия и сплавов на основе алюминия.

2. Исследовать микроструктуру полученных образцов пользуясь 100 - 630 кратным увеличением и измерить твердость. Установить связи между строением, механическими свойствами и классификационными признаками.

3. Нарисовать микроструктуры предложенных образцов с указанием структурных составляющих.

## **11.3 Содержание отчета.**

Отчет должен содержать следующие пункты:

1. Наименование работы, ее цель и краткие теоретические сведения об алюминиевых сплавах, области применения.

2. Изучить фрагмент диаграммы состояния Al – Cu. Фазовые и структурные составляющие.

3. В альбомах микроструктур ознакомиться со схемой микроструктуры образцов дуралюмина в различных состояниях

4. Изучить диаграмму состояния Al – Si. Дать пояснения по равновесному и модифицированному виду. Привести примеры модификаций.

5. Зарисовать схемы микроструктур силуминов: доэвтектического, эвтектического, заэвтектического и модифицированного.

6. Сделать выводы по выполненной работе

#### **11.4 Контрольные вопросы для самопроверки:**

1. Какие алюминиевые сплавы широко используются в криогенной технике?

2. Какова структура модифицированного силумина?

3. Как примеси влияют на свойства алюминия?

4. Какова структура сплава АМг10?

5. Какую структуру имеет доэвтектический силумин?

6. Как маркируются кованные алюминиевые сплавы?

7. Как маркируется алюминий?

8. Где используется технический алюминий?

9. Какие примеси содержит алюминий?

10. Какими компонентами легируют силумины?

11. Какова цель модификации силумина?

12. Каковы свойства алюминия?

13. Как маркируются литые алюминиевые сплавы?

14. Что такое старение?

15. Какие сплавы мы называем силумином?

16. Как модифицируют силумин?

17. Приведите примеры деформируемых и термически упрочняемых сплавов.

18. Как классифицируют алюминиевые сплавы?

19. Что такое модификация?

20. Что используются для легирования алюминиевых сплавов?

## **Заключение**

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Технология конструкционных материалов» формирует у обучающихся базовые знания о строении материалов, структурных составляющих сплавов, классификации металлов, неметаллов и металлических сплавов, формирует общие профессиональные и личностные компетенции в разрезе общетехнических дисциплин.

Учебный материал в указаниях расположен в последовательности, указанной в силлабусе дисциплины «Технология конструкционных материалов». Задания, предложенные в данном пособии, являются базовыми в освоении дисциплины «Технология конструкционных материалов» и затрагивают все темы итогового государственного экзамена по данному разделу. Ввиду ограниченного объема учебно-методического пособия некоторые вопросы изложены сжато, поэтому студентам рекомендуется изучить дополнительную литературу, указанную в рабочей учебной программе дисциплины.

Учебно-методическое пособие содержит 50 рисунков и 34 таблиц для наглядности материала.

Оценивание работ происходит непосредственно на занятии по критериям оценивания, представленным в силлабусе дисциплины.

### Список использованных источников

- 1 Е Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. Материаловедение: учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. - СПб.:ХИМИЗДАТ, 2007. - 784 с.
- 2 А.П. Еуляев. Материаловедение: учебник для вузов. - М.: Металлургия, 1986. -544 с.
- 3 Солнцев Ю.П., Вологжанина С.А. Материаловедение – М.: Академия, 2013. – 80 с.
- 4 Моряков О.С Материаловедение: учеб. для СПО – М.: Академия, 2014. – 240 с.
- 5 Никифоров В.М. Технология металлов и других конструкционных материалов: учеб. для техникумов и колледжей. – СПб: Политехника, 2009.
- 6 <https://infourok.ru/laboratornoprakticheskaya-rabota-tema-makroanaliz-metallov-i-splavov-781246.html> МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ по выполнению лабораторно-практических работ – доступ свободный
- 7 Тарасенко Л. В. Материаловедение: учебное пособие для вузов / Л. В. Тарасенко, С. А. Пахомова и др.; под ред. Л. В. Тарасенко. - Москва: НИЦ Инфра-М, 2012. - 475 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-16-004868-0. –
- 8 Материаловедение и технология материалов [Электронный ресурс]: учебное пособие / под ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина. - Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 288 с. - (Высшее образование: Бакалавриат). - В пер. - ISBN 978-5-16-004821-5.
- 9 Токмин А. М. Выбор материалов и технологий в машиностроении [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.М. Токмин, В. И. Темных, Л. А. Свечникова. - Москва: НИЦ ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. - 235 с. - В пер.- ISBN 978-5-16-006377-5
- 10 Стуканов В. А. Материаловедение: учебное пособие [Электронный ресурс] / В. А. Стуканов. - Москва: ИД ФОРУМ: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 368 с.: ил. - В пер. - ISBN 978-5-8199-0352-0
- 11 Горохов В. А. Материалы и их технологии: В 2 ч.: учебник [Электронный ресурс] / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе; под ред. В. А. Горохова. - Москва: НИЦ ИНФРА-М; Минск: Новое знание, 2014. Ч. 1. - 589 с.- (Высшее образование). - В пер.- ISBN 978-5-16-009531-8

“ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ  
ҰЛТТЫҚ МЕМЛЕКЕТТІК КІТАП ПАЛАТАСЫ”

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ СТАНДАРТТЫҚ КІТАП НОМЕРІ  
ISBN.

ӘМБЕБАП ОНДЫҚ ЖІКТЕУ,  
КІТАПХАНАЛЫҚ-БИБЛИОГРАФИЯЛЫҚ ЖІКТЕУ,  
ШТРИХ - КОД  
БЕРІЛДІ (ТІРКЕЛДІ)

“НАЦИОНАЛЬНАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ КНИЖНАЯ ПАЛАТА  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН”

ПРИСВОЕНЫ (ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫ)  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТАНДАРТНЫЙ КНИЖНЫЙ НОМЕР  
ISBN  
УНИФИЦИРОВАННЫЙ ДЕСЯТИЧНЫЙ КЛАССИФИКАТОР,  
БИБЛИОТЕЧНО-БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ КЛАССИФИКАТОР,  
ШТРИХ-КОД.

ISBN 978-601-356-152-3

