

Министерство образования и науки РФ

## **ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ**

Методические указания  
для лабораторной работы

Автор-составитель Т.Ю. Малеткина

Томск

Изучение микроструктуры сталей: методические указания /  
Сост. Т.Ю. Малеткина. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит.  
ун-та, 2015. – 14 с.

Методические указания к лабораторной работе по дисципли-  
нам «Материаловедение», «Материаловедение и технология кон-  
струкционных материалов».

Подписано в печать.

Формат 60x90/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс, печать оф-  
сет. Уч.-изд. л. 0,73. Тираж 300 экз. Заказ №

Изд-во ТГАСУ, 634050, г.Томск.

Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГУ.  
634050, г. Томск,

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить микроструктуры различных углеродистых сталей. Научиться определять их вид и устанавливать связь между составом, структурой и свойствами сталей.

## 2. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться со структурными составляющими сталей согласно диаграмме «железо – углерод».

2. Изучить классификацию сталей по содержанию углерода и фазовой микроструктуре.

3. Рассмотреть под металлографическим микроскопом шлифы образцов стали и по виду микроструктуры определить *доэвтектоидную, эвтектоидную и заэвтектоидную стали*.

4. Схематично зарисовать структуры этих сталей, указав форму и месторасположение структурных составляющих.

5. Установить марки наблюдаемых сталей согласно классификации углеродистых сталей.

## 3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Наиболее широко в промышленности распространены сплавы на основе железа. Основные из них – стали и чугуны – представляют собой сплавы железа с углеродом.

**Стали – это сплавы железа и углерода с концентрацией углерода от 0 до 2,14 %.** Возможно присутствие в стали и других химических элементов (кремния, марганца, хрома, никеля и т.п.).

Микроструктура сплавов в отличие от чистых металлов может состоять из зерен с различным типом кристаллической решётки. Зерна с одинаковым типом кристаллической решётки являются отдельной фазой.

*Фазой* называется часть сплава, имеющая определённый состав, строение и свойства и отделённая от других частей

сплава границей раздела, при переходе через которую свойства сплава меняются скачкообразно.

Свойства сплавов определяются прежде всего составом фаз и их количественным соотношением. Эти сведения можно получить из анализа диаграмм состояния.

*Диаграмма состояния* представляет собой графическое изображение фазового состава сплавов при различных температурах и разном химическом составе сплавов в координатах температура – концентрация компонентов. Зная диаграмму состояния, можно представить полную картину формирования структуры любого сплава при изменении температуры. Возможны заключения о его механических, технологических свойствах и об условиях обработки сплава при изготовлении изделий. Диаграммы состояния позволяют определить режимы термической обработки, необходимые для нужного изменения свойств сплава. Структуры железоуглеродистых сплавов – сталей – отражает диаграмма состояния: метастабильная, характеризующая превращения в системе Fe – Fe<sub>3</sub>C (цементит).

#### 4. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СТАЛЕЙ

1. **Железо** с температурой плавления 1539 °С имеет две модификации –  $\alpha$  и  $\gamma$ . Модификация Fe <sub>$\alpha$</sub>  имеет объёмноцентрированную кристаллическую решётку (ОЦК) и существует в температурном интервале от 1392 до 1539 °С (высокотемпературное состояние) и ниже 911 °С (низкотемпературное состояние). Ниже температуры 768 °С, называемой точкой Кюри, Fe <sub>$\alpha$</sub>  обладает ферромагнетизмом.

Модификация Fe <sub>$\gamma$</sub>  существует в интервале температур от 911 до 1392 °С, имеет гранцентрированную кубическую решётку (ГЦК) и обладает парамагнетизмом. Модификации Fe <sub>$\alpha$</sub>  и Fe <sub>$\gamma$</sub>  имеют и разные механические свойства.

2. **Углерод** ( $T_{пл} = 3747$  °С) в сталях находится в связанном состоянии преимущественно в цементите (Fe<sub>3</sub>C), а в свободном

состоянии в виде графита вместе с цементитом только в специальных сталях при их весьма медленном охлаждении и наличии графитизирующих добавок.

## 5. ФАЗЫ В СТАЛЯХ

Фазы в сталях могут находиться в жидком и в твёрдом состояниях. Выше температуры плавления существует жидкая фаза – расплав, а в твёрдом состоянии фазы могут существовать в виде твёрдого раствора, химического соединения (промежуточной фазы) и в виде механической смеси зерен других фаз, которая рассматривается как отдельная фаза.

1. **Феррит** (на диаграмме обозначают  $\Phi$  или  $\alpha$ ) – твёрдый раствор внедрения углерода в железо  $Fe_\alpha$ .

Различают низкотемпературный и высокотемпературный феррит. Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите мала и составляет при  $727^\circ\text{C}$  около  $0,025\%$ , а с понижением температуры падает. Кристаллическая решётка феррита – объёмноцентрированная кубическая (ОЦК). Феррит – мягкая, пластичная фаза со следующими механическими свойствами:  $\sigma_b = 300$  МПа;  $\delta = 40\%$ ;  $\psi = 70\%$ ;  $KCU = 25$  Дж/см<sup>2</sup>, твёрдость –  $80 - 100$  НВ. На диаграмме состояния феррит занимает область  $GPQ$  (рис. 1).

2. **Аустенит** (на диаграмме обозначают  $A$  или  $\gamma$ ) – твёрдый раствор внедрения углерода в железо  $Fe_\gamma$ .

Аустенит имеет гранецентрированную кубическую решётку (ГЦК), расстояния между атомами в которой больше, чем в ОЦК-решётке, поэтому растворимость углерода в  $Fe_\gamma$  значительно больше и достигает  $2,14\%$  при температуре  $1147^\circ\text{C}$ . Однако с понижением температуры растворимость падает и при  $727^\circ\text{C}$  составляет  $0,8\%$ . Аустенит пластичен, но прочнее феррита, его твёрдость –  $160-200$  НВ при  $20-25^\circ\text{C}$ . На диаграмме состояния занимает область  $AESG$  (рис. 1).

3. **Цементит** (обозначают Ц) – химическое соединение Fe и C (карбид железа  $Fe_3C$ ), содержит 6,69 % C и имеет сложную ромбическую решётку.

При нормальных условиях цементит твёрд (800 НВ) и хрупок. Выделяющийся из жидкости цементит называют первичным, из аустенита – вторичным, а из феррита – третичным.

4. **Перлит** – это механическая смесь мелких зерен феррита и цементита и рассматривается как самостоятельная структурная составляющая.

Перлит формируется во всех сталях при постоянной температуре 727 °С из аустенита. В зависимости от формы зерен цементита перлит бывает пластинчатым или зернистым. Перлит содержит 0,8 % C, чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей:  $\sigma_B = 800 \dots 900$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 450$  МПа;  $\delta \leq 16$  %; твёрдость – 180...220 НВ.

## 6. ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ

Максимальное содержание углерода в сталях ограничивается точкой *E* на диаграмме Fe –  $Fe_3C$  (рис. 1) и соответствует содержанию углерода 2,14 %.

Протекающее в сталях при температуре 727 °С эвтектоидное превращение лежит в основе классификации сталей по структуре. В зависимости от сформированной при эвтектоидном превращении структуры стали делят на:

- а) **доэвтектоидные**, содержащие от 0,02 до 0,8 % углерода;
- в) **эвтектоидные**, содержащие 0,8 % углерода;
- в) **заэвтектоидные**, содержащие от 0,8 % до 2,14 % углерода (рис. 2).

Рассмотрим фазовые превращения, происходящие в соответствии с диаграммой состояния Fe –  $Fe_3C$ , при охлаждении из жидкого состояния *доэвтектоидной* стали (рис. 1, сечение *I – I*).

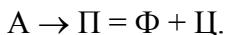
Точка 1. Сплав находится в жидком состоянии ( $L$ ). При охлаждении до линии ликвидуса ( $AC$ ) структурных превращений в жидкой стали не происходит.

Точка 2. Начало кристаллизации жидкого расплава в виде структурной составляющей – аустенита ( $A$ ). При выделении аустенита из жидкого сплава углеродное содержание в твердой фазе изменяется по линии  $AE$ , а в жидкой – по линии  $AC$ .

Точка 3. Жидкий сплав полностью закристаллизовался в аустенит, и при охлаждении от точки 3 до точки 4 никаких превращений в сплаве не происходит.

Точка 4. Начало выделения в процессе перекристаллизации из аустенита кристаллов феррита. При этом концентрация углерода в аустените увеличивается (по линии  $GS$ ), т. к. содержание углерода в образовавшемся феррите очень мало. Для того, чтобы определить концентрацию углерода в аустените при любой температуре в интервале между точками 4 и 5, необходимо провести горизонтальную линию и точку пересечения её с линией  $GS$  спроектировать на ось концентрации углерода.

Точка 5. Концентрация углерода в оставшемся аустените становится равной 0,8 % (эвтектоидная концентрация). При постоянной температуре 727 °С (линия  $PSK$ ) и неизменном составе фаз происходит эвтектоидное превращение всего оставшегося аустенита в перлит:



Перлит – это эвтектоидная смесь, состоящая из цементита (6,69 % С) и феррита (0,02 % С), образованного при эвтектоидном превращении.

Таким образом, ниже точки 5 **структура доэвтектоидной стали состоит из феррита**, образовавшегося до эвтектоидного превращения (светлая составляющая микроструктуры на рис. 2), и **перлита** (тёмная составляющая на рис. 2).

**В эвтектоидной стали содержание углерода 0,8 %, а структура представляет собой только перлит.**

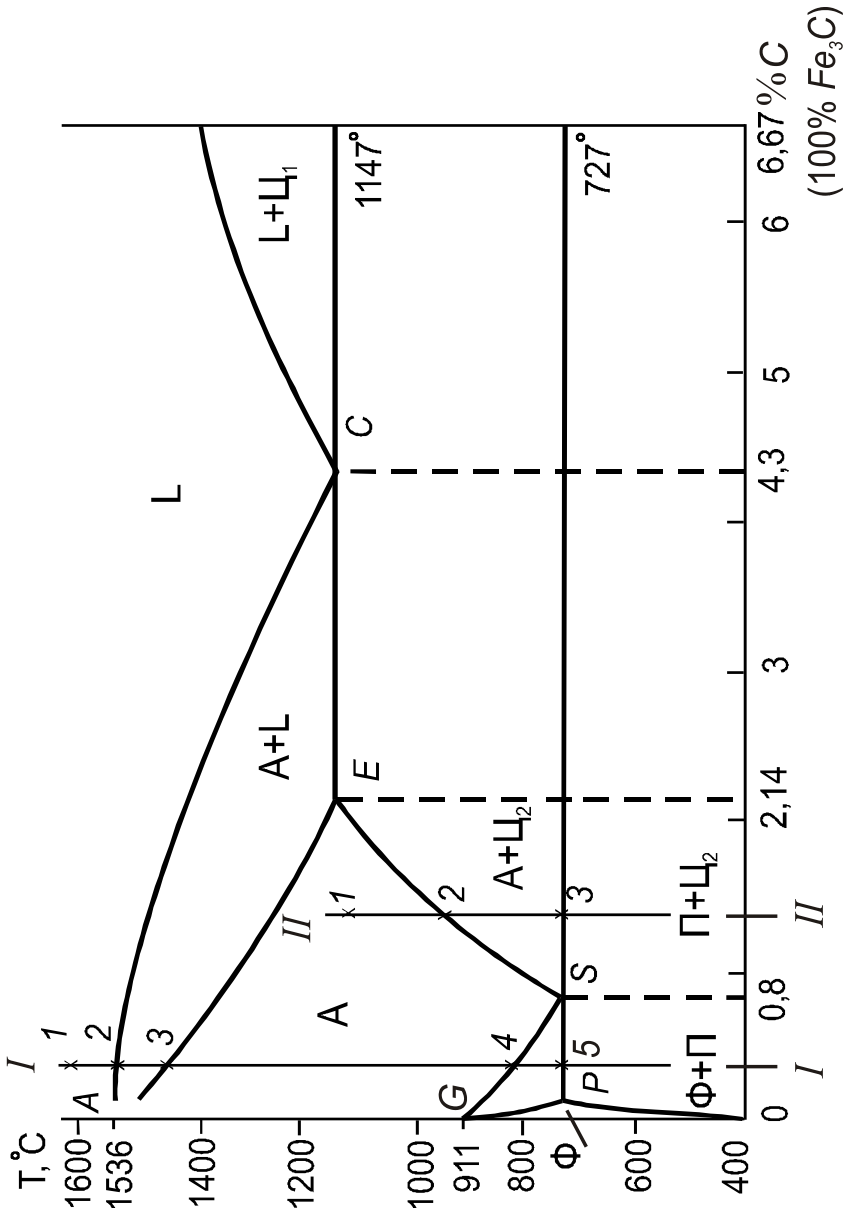


Рис. 1. Диаграмма состояния сплавов «железо – цементит»



В зависимости от условий образования перлит может иметь различное строение, определяемое формой цементита в феррито–цементитной смеси. Существуют зернистый и пластинчатый перлит.

**Стали, содержащие более 0,8 % С, называются *заэвтектоидными*. Структура заэвтектоидных сталей при комнатной температуре состоит из перлита (тёмная составляющая) и цементита (светлая составляющая). При этом цементит может залегать в виде сетки по границам зёрен перлита или иметь зернистое строение.**

Рассмотрим на диаграмме Fe – Fe<sub>3</sub>C фазовые превращения в заэвтектоидной стали, происходящие при медленном охлаждении из аустенитной области (рис. 1, сечение II – II).

Точка 1. Сплав имеет структуру аустенита. При охлаждении до линии SE превращений не происходит.

Точка 2. Начало выделения из аустенита избыточного вторичного цементита. Между 2 и 3 концентрация углерода в аустените уменьшается по линии SE.

Точка 3. Концентрация углерода в оставшемся аустените равна 0,8 %. Аустенит при постоянной температуре 727 °С превращается в перлит (эвтектоидное превращение). Ниже точки 3 структура состоит из перлита и выделившегося вторичного цементита.

На микроструктуре с достаточной для практических целей точностью можно определить содержание углерода в сталях. Рассмотрим в качестве примера отожжённую доэвтектоидную сталь, структура которой состоит из зерен феррита и перлита. Содержание углерода в феррите из-за незначительности этой величины (0,0002 % при температуре 20 – 25 °С) не учитывают и считают, что весь углерод доэвтектоидной стали находится в перлите. Известно, что перлит содержит 0,8 % С.

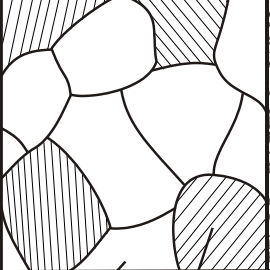
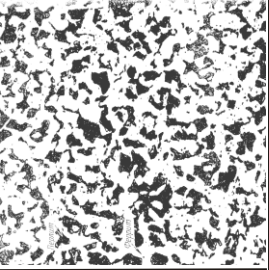
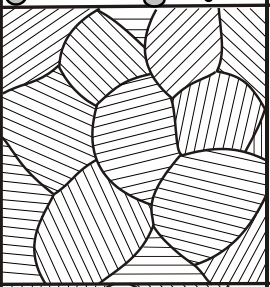
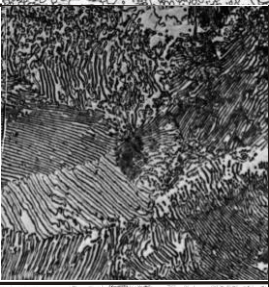
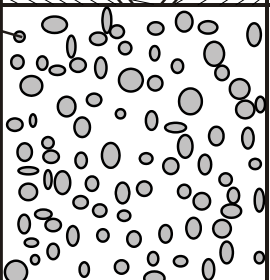
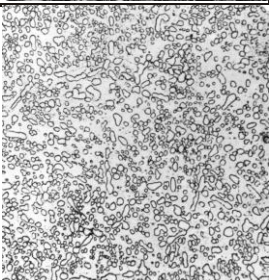
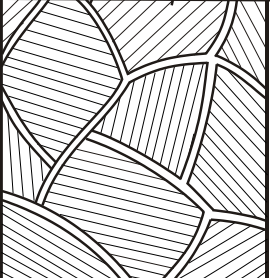
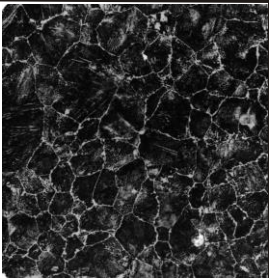
Сталь	Дозэвтектоидная $C < 0,8 \%$	Феррит+перлит		
	Эвтектоидная $C = 0,8 \%$	Перлит пластинчатый		
Сталь	Эвтектоидная $C = 0,8 \%$	Перлит Ц(П) зернистый		
	Заэвтектоидная $C > 0,8 \%$	Перлит+цементит		

Рис. 2. Классификация сталей по структуре

Если определить процентное содержание зерен перлита в микроструктуре доэвтектоидной стали (например, 25 %), то можно рассчитать содержание углерода в ней из следующего соотношения:

$$\begin{aligned} 100 \% \text{ площади} &- 0,8 \% \text{ C} \\ 25 \% \text{ площади} &- X \% \text{ C}. \end{aligned}$$

Отсюда 
$$X = \frac{25 \cdot 0,8}{100} = 0,2 \% \text{ C}. \quad (1)$$

## 7. СВЯЗЬ МЕЖДУ СТРУКТУРОЙ СТАЛИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Вид структуры и доля каждой из фаз в структуре стали определяют её механические свойства. В общем виде связь между структурой и некоторыми механическими свойствами приведена на рис. 3.

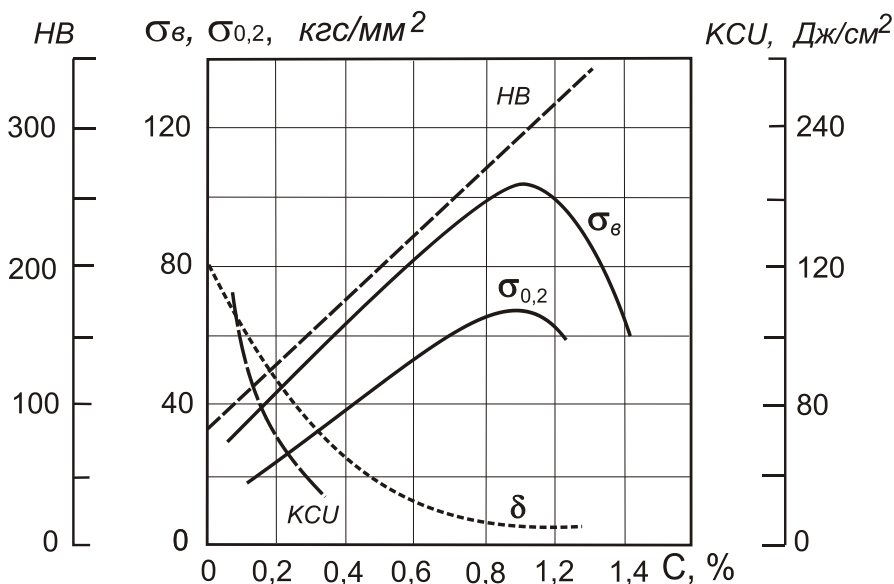


Рис. 3. Влияние углерода на свойства сталей

Приведённые данные касаются свойств стали в отожжённом состоянии. Анализируя приведённые зависимости, можно сделать выводы о том, что наиболее пластичными и вязкими являются стали с большой долей зерен феррита. Увеличение доли самой прочной фазы – перлита – приводит к увеличению показателей прочности и твёрдости, но снижению показателей вязкости и пластичности ( КСУ и  $\delta$  ). Максимальной прочностью обладают стали с преобладанием перлита (цементит в нём находится в сильно измельчённом состоянии). Появление и увеличение в структуре сталей доли крупноразмерного свободного цементита – высокотвёрдой и хрупкой фазы – ведёт уменьшению прочности и ещё более низким значениям пластичности и вязкости.

## 8. МАРКИРОВКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

*Доэвтектоидные* стали – это конструкционные углеродистые стали обыкновенного качества и качественные.

Углеродистые стали обыкновенного качества в соответствии с ГОСТ 380–94 обозначают следующим образом: Ст1кп, Ст2пс, Ст3сп, Ст4пс и т. Д. Буквы «Ст» обозначают «Сталь», цифры – условный номер марки, буквы «кп», «пс», « П» – степень раскисления («кп» – кипящая, « П» – спокойная, «пс» – полуспокойная. Чем выше условный номер марки, тем больше в стали углерода. Так в стали Ст1сп содержание углерода соответствует интервалу [0,06–0,12], в Ст2сп – [0,09–0,15], в Ст3сп – [0,14–0,22], в Ст4сп – [0,18–0,27], в Ст5сп – [0,28–0,37], в Ст6сп – [0,38–0,49].

Качественные углеродистые стали в соответствии с ГОСТ1050–88\* маркируются следующим образом: 08, 08кп, 10, 10кп, 10пс и т. Д. Числа показывают содержание углерода в сотых долях процента, а буквы – степень раскисления. Стали, в

марках которых степень раскисления не указана, являются спокойными.

*Эвтектоидная и заэвтектоидная* стали – это инструментальные стали. Согласно ГОСТ 1435–74 эти стали маркируются следующим образом: У10, У12 и т. д. Числа в марках этих сталей показывают содержание углерода в десятых долях процента. Например, в стали У12 содержание углерода 1,2 %.

## **9. ОБОРУДОВАНИЕ**

Подготовленные микрошлифы доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталей анализируются с помощью металлографических микроскопов МИМ-6 и МИМ-7.

## **10. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И СОСТАВЛЕНИЯ ОТЧЕТА**

1. Дать определение структурным составляющим сталей.
2. Определить по микроструктуре тип сплава (сталь доэвтектоидная, эвтектоидная, заэвтектоидная).
3. В доэвтектоидных сталях определить содержание углерода по соотношению площадей феррита и перлита, пользуясь формулой (1). По содержанию углерода определить и марку стали.
4. Зарисовать просмотренные структуры доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталей. Рисунок представляет собой схематичное изображение видимой в микроскоп картины диаметром 25...30 мм. На рисунке указать все структурные составляющие стали.
5. Укажите наиболее характерные механические свойства рассмотренных сталей.

## 11. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите классификацию сталей в зависимости от содержания углерода и в зависимости от структуры.
2. Дайте определение структурным составляющим сталей.
3. Пользуясь диаграммой «железо–цементит», объясните структурные превращения в сталях.
4. Объясните, как определяется количество углерода в доэвтектоидных сталях.
5. Объясните закономерности изменения структуры свойств сталей при изменении концентрации углерода.

### Приложение 1

#### **Пример использования диаграммы состояния для построения кривых нагрева и охлаждения, применения правила определения состава фаз (правила концентраций) и количественного соотношения фаз (правила отрезков)**

Рассмотрим фазовые превращения, происходящие в соответствии с диаграммой состояния «железо – цементит» при охлаждении из жидкого состояния *заэвтектоидной* стали с концентрацией углерода 1,2 % (рис. 1, сечение  $I - I$ ). Скорости фазовых переходов зависят от типа фаз, поэтому наклон на *кривой охлаждения* (рис.1) в координатах «температура – время» - для разных фазовых переходов будет различным.

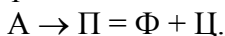
Точка 1. Сплав находится в жидком состоянии (L). При охлаждении до линии ликвидуса (AC) структурных превращений в жидкой стали не происходит.

Точка 2. Начало кристаллизации жидкого расплава в виде структурной составляющей – аустенита (A). При выделении кристаллов аустенита из жидкого сплава содержание углерода в нём изменяется по линии AE, а в жидкой фазе – по линии AC.

Точка 3. Жидкий сплав полностью закристаллизовался в аустенит, и при охлаждении от точки 3 до точки 4 никаких превращений в сплаве не происходит.

Точка 4. Начало выделения из аустенита зерен цементита. При этом концентрация углерода в аустените уменьшается по линии  $ES$ .

Точка 5. Концентрация углерода в оставшемся аустените становится равной 0,8 % (эвтектоидная концентрация). При постоянной температуре 727 °С (линия  $PSK$ ) и неизменном составе фаз в стали происходит эвтектоидное превращение всего оставшегося аустенита в перлит:



Перлит – это эвтектоидная смесь, состоящая из цементита (6,69 % С) и феррита (0,02 % С), образованного при эвтектоидном превращении.

Таким образом, ниже точки 5 структура *заэвтектоидной* стали состоит из цементита, образовавшегося до эвтектоидного превращения ( $A \rightarrow П$ ) и перлита, образовавшегося в процессе эвтектоидного превращения при температуре 727 °С.

*Кривая нагрева* строится аналогичным образом от комнатной температуры до температуры, соответствующей жидкому состоянию (рис. 2).

Рассмотрим фазовые превращения, происходящие в соответствии с диаграммой при нагреве доэвтектического чугуна, содержащего 3,5 % С (рис. 2, сечение  $II - II$ ).

Структура доэвтектического белого чугуна при комнатной температуре состоит из ледебурита, вторичного цементита и перлита  $[(П+Ц_2)_Д+Ц_2+П]$ .

***Ледебурит*** при температуре ниже 727 °С представляет собой механическую смесь перлита (0,8 % С) и цементита (6,67 % С).

При нагреве от комнатной температуры до температуры, соответствующей точке 1 в сплаве происходит изотермическое эвтектоидное превращение, т.е. перлит (П), содержащий

0,8 % С, превращается в аустенит. Превращение идёт при постоянной температуре 727 °С (линия РК). После превращения структура чугуна состоит из ледебурита, вторичного цементита и аустенита  $[(A+Ц_2)_Л+Ц_2+A]$ . Выше температуры 727 °С **ледебурит – эвтектическая смесь мелких зерен аустенита и цементита (6,67 % С)**. Концентрация углерода в аустените увеличивается по линии SE диаграммы. Сказанное в полной мере относится и к аустениту, входящему в состав ледебурита.

При достижении температуры, соответствующей точки 2 происходит распад ледебурита (Л) (обратное эвтектическое превращение) с образованием жидкой фазы и кристаллов аустенита (L+A). Этот процесс идёт при постоянной температуре 1147 °С (точка 2 на кривой нагрева, рис.2). При завершении распада ледебурита, начинается процесс плавления кристаллов аустенита (А), который идёт в температурном интервале между точками 2 и 3 (L+A). При температуре, соответствующей точке 3, плавление завершается, и выше этой температуре (точка 1) чугун находится в жидком состоянии (L) в виде расплава.

Для определения состава фаз при любой температуре применяют *правило концентраций*, которое заключается в следующем. Для определения концентрации компонентов в двух фазах при заданной температуре через точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область. Проекция точек пересечения (*a* и *b*) на горизонтальную ось диаграммы покажут составы фаз ( $x_a$  и  $x_b$ ) (рис. 1 и 3). Например, в сплаве с концентрацией углерода 1,2 % при температуре 1400 °С концентрация углерода в твёрдой фазе – аустените –  $x_a \sim 0,6 \%$ , а в жидкой фазе  $x_b \sim 1,2 \%$  (рис.3).

Для определения количественного соотношения фаз в микроструктуре сплава при заданной температуре применяют



*правило отрезков.* Отрезки проведённой линии между точкой *c* и точками *a* и *b*, определяющие составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз:

$$V_{\text{жидкости}} / V_{\text{твёрд}} = ac / cb.$$

Например, в сплаве с концентрацией углерода 1,2 % при температуре 1400 °С:

$$V_{\text{жидкости}} / V_{\text{твёрд}} \sim 2,$$

то есть доля жидкой фазы от общего объёма сплава составляет 2 части, а доля твёрдой фазы – 1 часть.

В этом же сплаве при температуре 800 °С структура состоит из зерен аустенита и цементита (рис. 1). Для определения концентрации углерода в аустените необходимо провести горизонтальную линию, соответствующую данной температуре и точку пересечения её с линией *ES* спроектировать на ось концентрации углерода. Таким образом, при температуре 800 °С содержание углерода в аустените 1 %. Для определения концентрации углерода во второй фазе – цементите необходимо провести горизонтальную линию до пересечения с линией *FK*, которая соответствует концентрации углерода 6,67 %. То есть концентрация углерода в цементите 6,67 %.

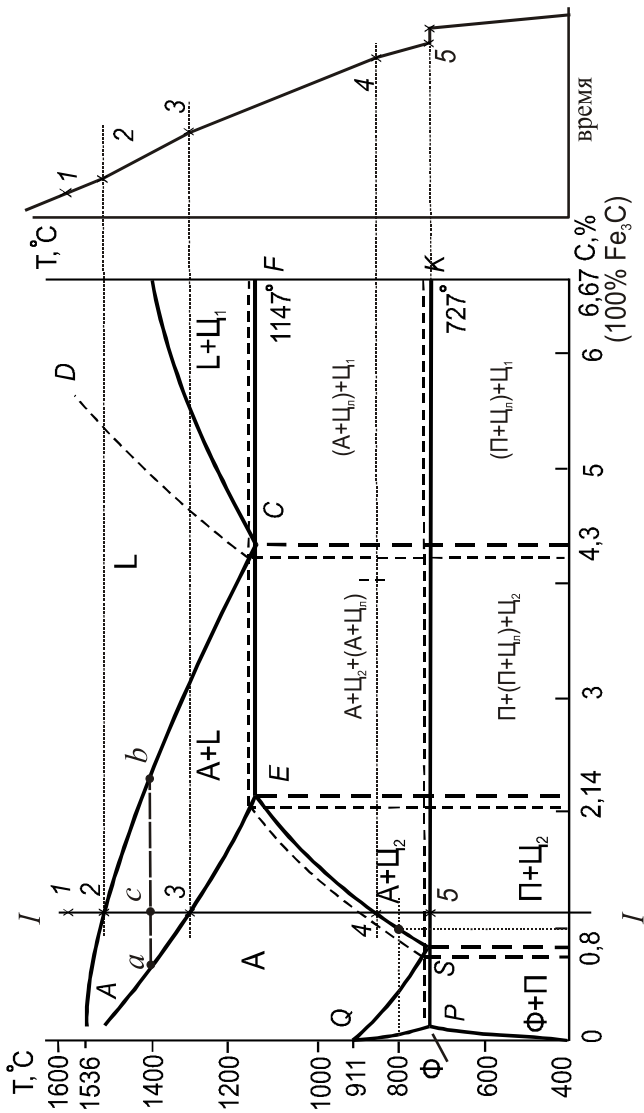


Рис. 1. Диаграмма состояния сплавов «железо – цементит» (пунктиром – диаграмма состояния «железо – углерод») и кривая охлаждения для стали с концентрацией углерода 1,2 % (сечение  $I - I$ )

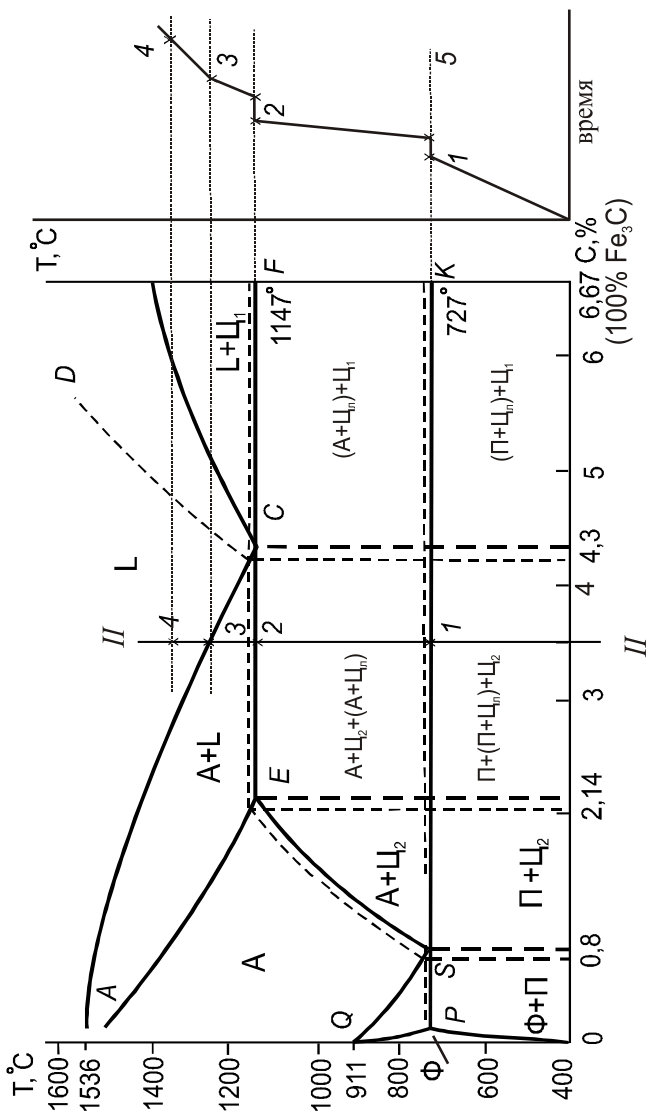


Рис. 2. Диаграмма состояния сплавов «железо – цементит» (пунктиром – диаграмма состояния «железо – углерод») и кривая нагрева для белого чугуна с концентрацией углерода 3,5 % (сечение II – II)

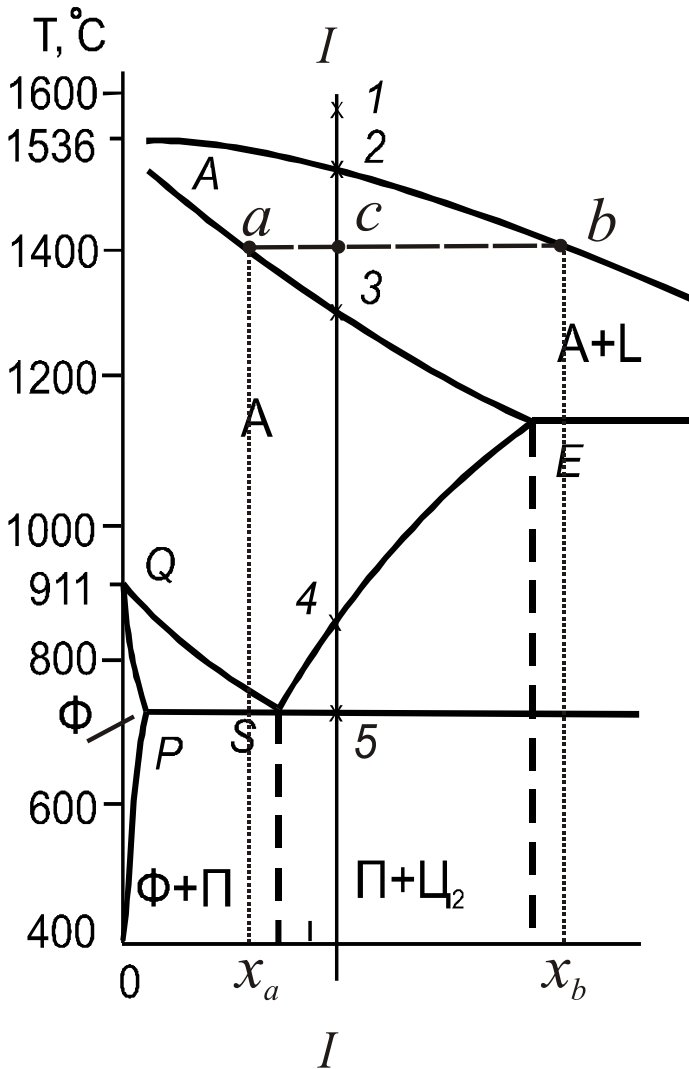


Рис.3 Определение состава фаз и количественного соотношения фаз стали с концентрацией углерода 1,2 %.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.– 648 с.
2. Гуляев, А.П. Металловедение/ А.П. Гуляев. – М.: Metallurgia, 1977.– 647 с.
3. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1980.– 493 с.
4. Болдырев, А.М. Сварочные работы в строительстве и основы технологии металлов / А.М. Болдырев, А.С. Орлов.– М.: АСВ, 1994. – 432 с.