

## Лекция 6 ЖЕЛЕЗО И ЕГО СПЛАВЫ

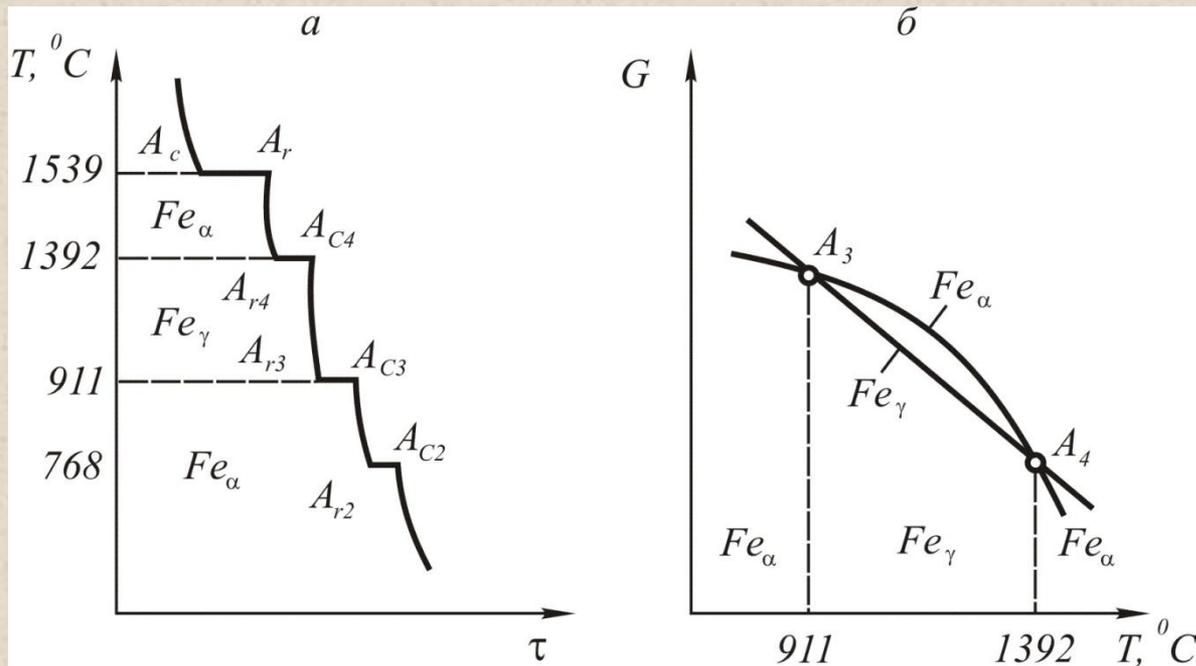
Ж е л е з о (Fe)—элемент 8-й группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, располагающийся в триаде Fe, Co, Ni. Его содержание в земной коре составляет около 4,5%. Это четвертый по распространенности в природе элемент. Температура плавления железа составляет  $1539 \pm 5^\circ\text{C}$ . Плотность железа  $7680 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности при растяжении 200...250 МПа, относительное удлинение 50...60%. твердость 70... 80 НВ. Однако следует отметить, что указанные данные относятся к технически чистому железу, содержащему около 0,1% примесей. Повышение степени очистки приводит к снижению прочности и твердости железа.

Существует шесть состояний железа: газообразное, четыре конденсированные фазы с металлической связью (жидкая и три кристаллические полиморфные модификации  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$ ) и состояние плазмы, в которое газообразное железо переходит при высоких температурах в процессе ионизации. Плазма железа отличается особыми электрическими и магнитными свойствами.

Две кристаллические модификации железа  $\alpha$  и  $\gamma$  существуют при нормальном атмосферном давлении. Появление третьей ( $\epsilon$ ) возможно при действии значительных давлений и повышенных температур, а также в специальных сталях, легированных кобальтом или марганцем. Эти модификации железа различаются типом кристаллической решетки:  $\alpha$  – Fe имеет кубическую объемно-центрированную (ОЦК),  $\gamma$ –Fe – кубическую гранецентрированную (ГЦК) и  $\epsilon$ –Fe – гексагональную плотноупакованную.

## Лекция 6 Железо и его сплавы

Кривая охлаждения железа приведена на рис. а ниже. Видно, что полиморфная модификация  $\alpha$ -железа существует в двух температурных областях. Это объясняется особенностью зависимости свободной энергии или энергии Гиббса  $G$   $\alpha$ - и  $\gamma$ - фаз железа от температуры (рис. б). При температурах  $911^\circ\text{C}$  и  $1392^\circ\text{C}$  значения  $G$  для  $\text{Fe}_\alpha$  и  $\text{Fe}_\gamma$  равны, а при  $T < 911^\circ\text{C}$  и  $T > 1392^\circ\text{C}$   $G_{\text{Fe}_\alpha} < G_{\text{Fe}_\gamma}$ . Точкам  $A_{r2}$  и  $A_{c2}$  на кривой кристаллизации соответствует плато, обусловленное изменением магнитных свойств железа ( $T = 768^\circ\text{C}$  – температура Кюри). При более высоких температурах оно немагнитно, при более низких – магнитно. Немагнитное при температурах  $768\text{...}911^\circ\text{C}$   $\alpha$ -железо иногда обозначают  $\text{Fe}_\beta$ .



**Кинетическая кривая охлаждения железа (а) и зависимость его свободной энергии от температуры (б)**

## Лекция 6 Железо и его сплавы

В системе железо – углерод существуют следующие фазы: жидкий сплав, твердые растворы (феррит и аустенит), химическое соединение (цементит) и свободный углерод в виде графита. Кроме того, к структурным составляющим этой системы относят перлит и ледебурит — механические смеси.

*Феррит*—твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. У него ОЦК решетка, и поэтому растворимость углерода в феррите очень мала. Низкотемпературный  $\alpha$ -феррит содержит до 0,02% углерода, высокотемпературный  $\alpha$ -феррит (или  $\delta$ -феррит) — до 0,1% углерода. Техническое железо имеет структуру феррита, которая вытравливается на шлифах в виде однородных зерен. Феррит высокопластичен ( $\delta = 40...50 \%$ ) и мягок (80...120 НВ), хорошо обрабатывается давлением в холодном состоянии. На диаграмме состояния обозначается буквой Ф или  $\alpha$ .

*Аустенит* — твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе с содержанием углерода до 2,14%. Микроструктура—однородные зерна, существует при  $T > 911^\circ\text{C}$ . Высокопластичен, но более тверд, чем феррит (160...200 НВ). Кроме углерода растворяет другие элементы. На диаграмме состояния обозначается буквой А или  $\gamma$ .

## Лекция 6 Железо и его сплавы

Углерод может находиться в сплаве с железом в виде химического соединения (цементит), твердого раствора (феррит, аустенит) или аллотропной модификации (графит).

Атомы углерода имеют малый атомный радиус и обладают высокой диффузионной подвижностью.

На диаграмме состояния указаны области устойчивого существования трех модификаций углерода – графита, графита II и алмаза. **Графит** — аллотропная модификация углерода. Графит мягок, прочность его очень низка. Температура плавления около  $3800^{\circ}\text{C}$ , плотность  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Химически стоек и электропроводен. На диаграмме состояния обозначается буквой Г. В обычных условиях углерод существует в виде модификации графита с гексагональной слоистой решеткой. Между атомами углерода в слое действуют ковалентные связи (энергия связи  $\sim 680 \text{ Дж/кмоль}$ ).

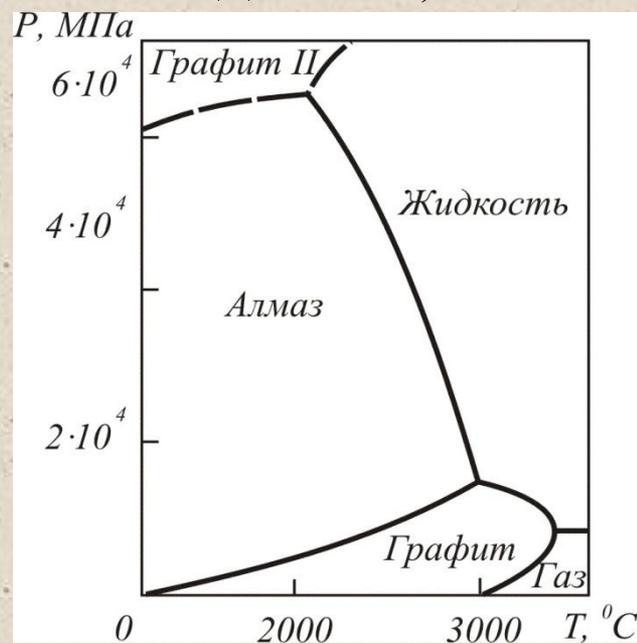


Диаграмма состояния углерода

## Лекция 6 Железо и его сплавы

*Перлит*—механическая смесь феррита и цементита, содержащая 0,83% углерода. Образуется при перекристаллизации (распаде) аустенита при  $T=723^{\circ}\text{C}$ . Этот распад называется эвтектоидным, а его продукт – перлит – эвтектоидом. Перлит обладает высокими прочностью ( $\sigma_{\text{в}}=800$  МПа), твердостью (200 НВ) и в составе сплава повышает его механические свойства. Структура перлита — чередующиеся пластинки феррита и цементита. На диаграмме состояния обозначается буквой П.

*Ледебурит*—механическая смесь аустенита и цементита, образуется при кристаллизации сплава с 4,3 % углерода при  $T=1147^{\circ}\text{C}$ . При температурах ниже  $727^{\circ}\text{C}$  аустенит в ледебурите превращается в перлит, и после охлаждения ледебурит представляет собой эвтектику – смесь перлита с цементитом. Ледебурит тверд (700 НВ). имеет сотовое или пластинчатое строение и содержится во всех белых чугунах. На диаграмме состояния обозначается буквой Л.

*Цементит*—химическое соединение  $\text{Fe}_3\text{C}$ , содержит 6,67% углерода. Самая твердая (800 НВ) и хрупкая составляющая сплавов железа с углеродом. Решетка сложная ромбическая, плотно-упакованная. Температура плавления равна  $1250^{\circ}\text{C}$ . До  $T = 210^{\circ}\text{C}$  цементит магнитен. При высоких температурах разлагается на графит и аустенит. Образует твердые растворы замещения, в которых углерод замещается неметаллами (кислородом, азотом), а железо—металлами (марганцем, хромом, вольфрамом и т. д.). Материалы на основе цементита в чистом виде не используют. Чем больше цементита в железо – углеродистом сплаве, тем твердость последнего выше. Обозначают на диаграмме состояния буквой Ц.

### ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД

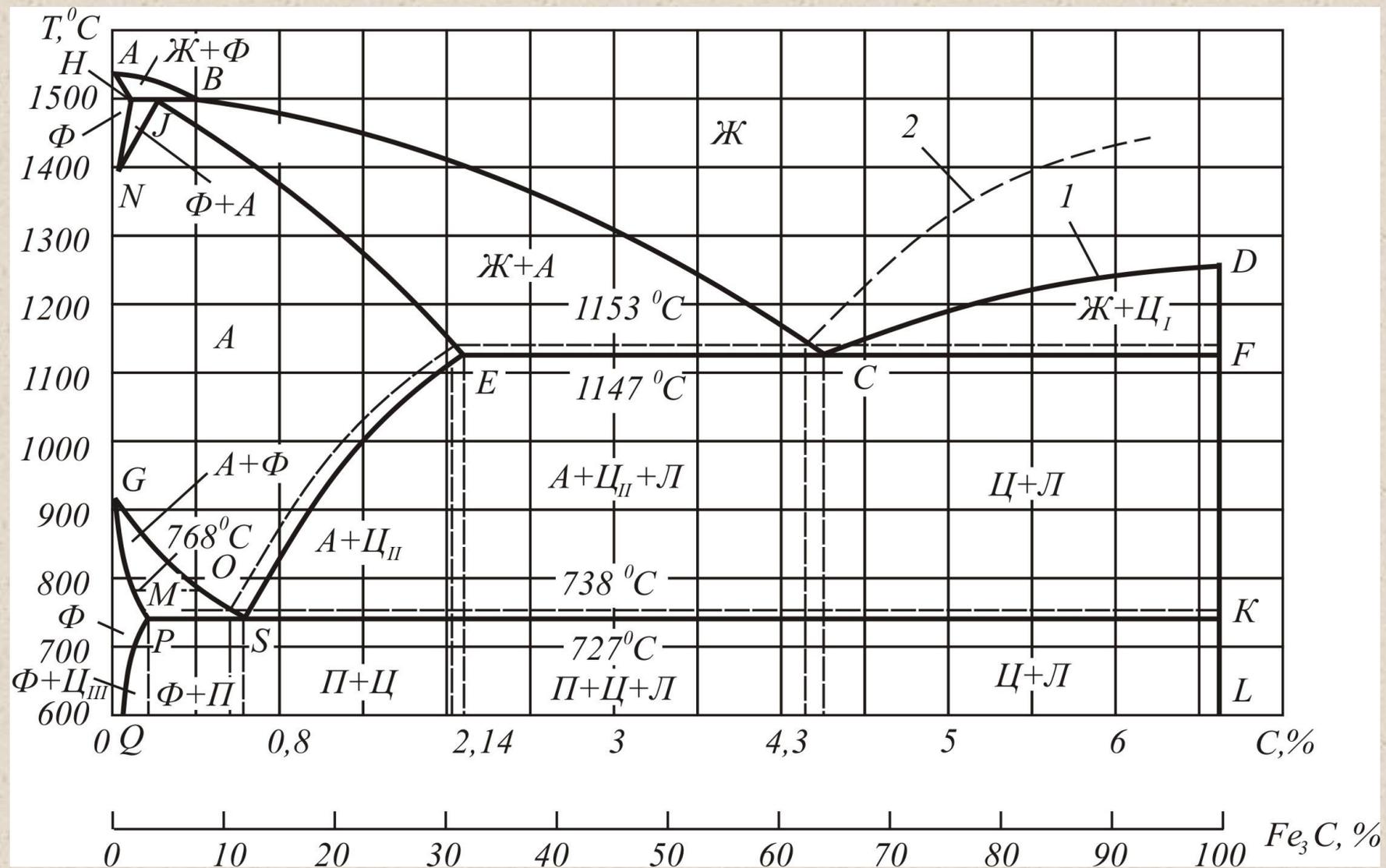


Диаграмма состояния системы железо – углерод:  
1 – метастабильная система; 2 – стабильная

## Лекция 6 Железо и его сплавы

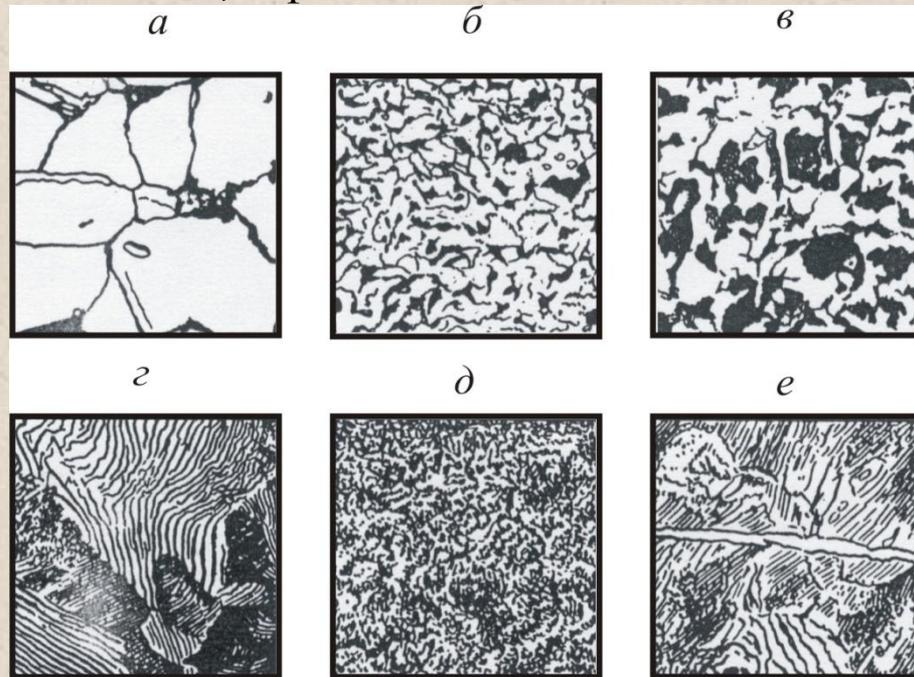
Для сплавов железа с углеродом строят две диаграммы состояния: неравновесную (метастабильную), которая характеризует превращения в системе железо — цементит, и стабильную, соответствующую превращениям в системе железо — графит.

На диаграмме область первичной кристаллизации находится между линиями ликвидус  $ABCD$  и солидус  $AHJECF$ . Линия  $ABC$  определяет температуру начала кристаллизации аустенита из жидкости,  $CD$  — температуру начала кристаллизации первичного цементита из жидкости.  $AH$  — граница области, соответствующей смеси кристаллов феррита и жидкости, ниже нее область феррита,  $HJB$  — линия перитектического превращения феррита и жидкого сплава в аустенит. Линия  $ECF$  соответствует кристаллизации эвтектики — ледебурита,  $PSK$  — эвтектоидному превращению аустенита в феррит и цементит. Точка  $A$  на диаграмме системы железо — цементит соответствует температуре плавления чистого железа,  $D$  — температуре плавления цементита,  $N$  и  $G$  — температурам полиморфных превращений железа. Точки  $H$  и  $P$  определяют предельное содержание углерода в высокотемпературном и низкотемпературном ферритах,  $E$  — предельное содержание углерода в аустените. Остальные точки характеризуют эвтектические ( $C, F$ ), эвтектоидные ( $S, K$ ) и перитектические ( $J, B$ ) превращения.

Сплавы, содержащие менее 0,02% углерода, называют *техническим железом*, от 0,02 до 2,14% — *сталями*, более 2,14 % — *чугунами*. Стали, содержащие 0,02...0,83% углерода, называют доэвтектоидными, 0,83% — эвтектоидными, 0,83...2,14% углерода — заэвтектоидными. Чугуны, содержащие 2,14...4,3% углерода—доэвтектические, более 4,3% — заэвтектические, 4,3 % — эвтектические.

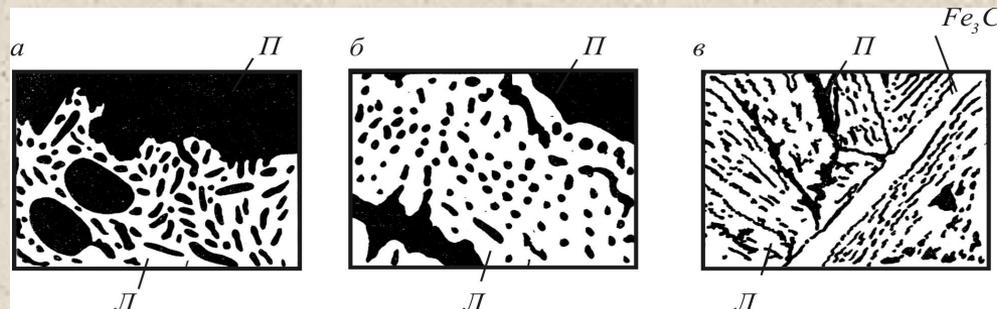
## Лекция 6 Железо и его сплавы

Характерные микроструктуры сталей с разным содержанием углерода приведены на рисунке слайда. Их структурный состав определяется присутствием перлита, феррита и цементита, а фазовый состав — сочетанием феррита с цементитом.



### Микроструктура сталей:

- $a - c = 0,05\%$ , структура  $\Phi + Ц_{III}$ ;  $b - c = 0,15\%$ , доэвтектоидная сталь, структура  $\Phi + П$ ;  $c - c = 0,35\%$ , доэвтектоидная сталь, структура  $\Phi + П$ ;
- $z - c = 0,8\%$ , эвтектоидная сталь, структура — пластинчатый перлит  $П$ ;
- $d - c = 0,8\%$ , эвтектоидная сталь, структура — зернистый перлит  $П$ ;
- $e - c = 12\%$ , заэвтектоидная сталь, структура  $П + Ц_{II}$ ; увеличение  $\times 500$



### Микроструктура чугунов:

$a$  — доэвтектического,  $b$  — эвтектического,  $c$  — заэвтектического

# Лекция 6 Железо и его сплавы

# Лекция 6 Железо и его сплавы