

Лекция №7 ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ

Железоуглеродистые сплавы (*стали* и *чугуны*) являются самыми распространенными конструкционными и инструментальными материалами, а также специальными сплавами в машиностроении.

1. Диаграмма состояния «Fe-Fe₃C»

Диаграмма состояния «Fe-Fe₃C» (рис.1) показывает фазовый состав и структуру сплавов с концентрацией углерода от 0 % (чистое железо) до 6,67% (чистый цементит).

Особенность диаграммы «железо-цементит» – наличие на оси абсцисс также шкалы цементита, которая употребительна при структурном анализе сплавов. Координаты характерных точек диаграммы состояния «Fe-Fe₃C» приведены в табл. 1.

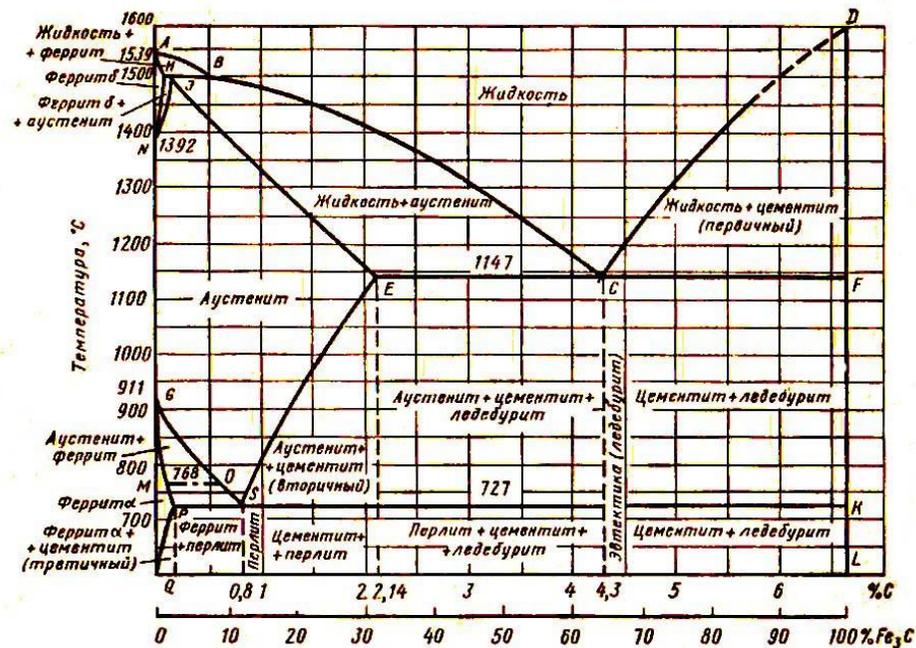


Рис.1. Диаграмма состояния «железо-цементит»

Таблица 1. Характерные точки диаграммы «Fe – Fe₃C»

Обозначение	Координаты точки			Примечания
	t, °C	C, %	Fe ₃ C, %	
1	2	3	4	5
A	1539	0	0	Точка плавления чистого железа
H	1499	0,1	1,5	Предельная концентрация углерода в высокотемпературном феррите
J	1499	0,16	2,4	Концентрация углерода в аустените при перитектическом превращении
B	1499	0,51	7,6	Концентрация углерода в жидком сплаве при перитектическом превращении
N	1392	0	0	Точка высокотемпературного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращения железа
D	1260 1550	6,67	100	Точка плавления чистого цементита (данные разнятся)
E	1147	2,14	32,1	Предельная концентрация углерода в аустените
C	1147	4,3	64,5	Эвтектическая точка сплава
F	1147	6,67	100	Правый конец эвтектической линии ECF
G	911	0	0	Точка низкотемпературного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращения железа
P	727	0,02	0,3	Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите

S	727	0,8	12,0	Эвтектоидная точка сплава
K	727	6,67	100	Правый конец эвтектоидной линии PSK
Q	500	0,006	0,09	Минимальная растворимость углерода в низкотемпературном феррите
L	500	6,67	100	Нижний конец вертикали цементита DFKL

Железо и углерод – элементы полиморфные. Fe_γ имеет решетку ГЦК, которая более компактна, чем ОЦК – решетка Fe_α . В связи с этим, при превращении $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$, объем железа уменьшается приблизительно на 1%, что является причиной возникновения в сплаве *фазовых напряжений*.

Фазы в сплавах Fe(C) представляют собой: жидкий расплав L, феррит, аустенит, цементит и свободный углерод в виде графита (в чугунах).

Феррит (Φ или α) – твердый раствор углерода в Fe_α
 $\Phi = Fe_\alpha(C)$.

При комнатной температуре феррит содержит 0,006% С. Феррит – мягкая, пластичная фаза со следующими механическими свойствами: $\sigma_B = 28 \dots 30$ кгс/мм² (280...300 МПа), 80...100 НВ, $\delta = 40 \dots 50\%$, $\psi = 70\%$, КСЧ = 25 кгс·м/см² (2,5 МДж/м²).

Аустенит (A или γ) – твердый раствор углерода в Fe_γ
 $A = Fe_\gamma(C)$.

ГКЦ решетка аустенита имеет больше межатомных пор, чем ОЦК решетка феррита, поэтому растворимость углеро-

да в Fe_γ достигает 2,14% при $t = 1147^\circ\text{C}$. Аустенит – пластичная фаза, более прочная (160...200 НВ), чем феррит. В железоуглеродистых сплавах аустенит существует при температурах выше $t = 727^\circ\text{C}$ (линия PSK диаграммы).

Цементит (Ψ) – карбид железа Fe_3C , содержит 6,67% С. Твердая (НВ > 800) и хрупкая ($\delta \rightarrow 0$) фаза. При нагреве до высоких температур ($t = 738^\circ\text{C}$) распадается по реакции *графитизации*



Графит (Γ) – низкотемпературная модификация углерода, выделяющаяся в Fe(C) сплавах в свободном состоянии при содержании углерода > 2,14 %. Графит электропроводен, химически стоек, малопрочен, мягок.

Железоуглеродистым сплавам присущи следующие изотермические превращения:

Перитектическое ($t = 1499^\circ\text{C}$) – жидкость L_B состава точки B взаимодействует с кристаллами феррита Φ_H состава точки H с образованием аустенита A_J состава точки J .



Эвтектическое ($t = 1147^\circ\text{C}$)



Эвтектика $L = (A_E + \Psi)$, представляющая собой механическую смесь аустенита состава точки E и цементита, носит название *ледебурит*.

Эвтектоидное ($t = 727^\circ\text{C}$)



Эвтектоид $\Pi = (\Phi + \Psi)$, представляющий собой механическую смесь феррита и цементита, носит название *перлита*.

Перлит (0,8% С) и ледебурит (4,3% С) рассматривается как *самостоятельные структурные составляющие сплавов*. Они оказывают основное влияние на свойства

сплавов. Перлит чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной малопластичной структурной составляющей сплава: $\sigma_B = 80 \dots 90 \text{ кгс/мм}^2$ (800...900 МПа); $\sigma_{0,2} = 45 \text{ кгс/мм}^2$ (450 МПа); $\delta = 15\%$; $\psi = 20\%$; 180...200 НВ.

Ледебурит в сплавах присутствует до температур выше линии SK -727°C (см. рис. 1), при более низких температурах аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит. При комнатной температуре ледебурит представляет собой смесь цементита и перлита. Цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита. Присутствие матрицы цементита служит причиной большой твердости (более 600 НВ) и хрупкости ледебуридных сплавов. Их нельзя обрабатывать давлением и трудно обрабатывать резанием.

Описание процессов, протекающих на линиях диаграммы «Fe-Fe₃C» при охлаждении железоуглеродистых сплавов, представлено в табл. 8.

Таблица 2. Линии диаграммы «Fe – Fe₃C» и соответствующие им процессы в сплавах при охлаждении

Линия	Название (обозначение)	Процессы
ABCD	Ликвидус	Начало кристаллизации (выделение аустенита (при $C < 4,3\%$) или первичного цементита (при $C > 4,3\%$))
АНЕС F	Солидус	Конец кристаллизации
HN	Начало полиморфного	Высокотемпературное $\Phi \rightarrow A$ превращение

	превращения	
JN	Конец полиморфного превращения (A ₄)	
HJB	Изотерма $t = 1499^\circ\text{C}$	Перитектическая реакция $L_B + \Phi_H \rightarrow A_J$
ECF	Изотерма $t = 1147^\circ\text{C}$	Эвтектическая реакция $L_C \rightarrow (A_E + \text{Ц}_F)$
GS	Начало полиморфного превращения (A ₃)	Низкотемпературное $A \rightarrow \Phi$ превращение
GP	Конец полиморфного превращения	
MO	Изотерма $t = 768^\circ\text{C}$ (A ₂)	Появление ферромагнитных свойств у сплава
ES	Сольвус (A _{cm})	Выделение вторичного цементита
PSK	Изотерма $t = 727^\circ\text{C}$ (A ₁)	Эвтектоидная реакция $A_S \rightarrow (\Phi_P + \text{Ц}_K)$
PQ	Сольвус	Выделение третичного цементита

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы железо - цементит, т.е. критические точки, имеют условные обозначения.

Обозначаются буквой **A** (от французского **arrêt** - остановка):

A₁ - линия PSK (727⁰C) - превращение **П** ↔ **A**:

A₂ - линия MO (768⁰C, т. Кюри) - магнитные превращения;

A₃ - линия GS (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) - превращение **Ф** ↔ **A**:

A₄ - линия NJ (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) - превращение **A** ↔ **Ф(δ)**;

A_{cm} - линия SE (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) - начало выделения цемента вторичного (иногда обозначается **A₃**).

Так как при нагреве и охлаждении превращения совершаются при различных температурах, чтобы отличить эти процессы вводятся дополнительные обозначения. При нагреве добавляют букву *c*, т.е. **A_{c1}**, при охлаждении - букву *r*, т.е. **A_{r1}**.

2. Классификация железоуглеродистых сплавов

Железоуглеродистые сплавы подразделяются на две большие группы: **стали** – сплавы, содержащие до 2,14% C, и **чугуны**, содержащие более 2,14% C (табл. 3).

Особую группу составляют сплавы с содержанием углерода менее 0,02% (точка **P**), их называют **техническое железо**. Микроструктуры сплавов представлены на рис.9.2. Структура таких сплавов после окончания кристаллизации состоит или из зерен феррита (рис.2 а), при содержании углерода менее 0,006 %. или из зерен феррита и кристаллов цемента третичного (рис.2 б).

Свойства железоуглеродистых сплавов определяются их структурой, которая в свою очередь определяется со-

держанием в сплаве углерода. Структура сплавов определяет также их область применения.

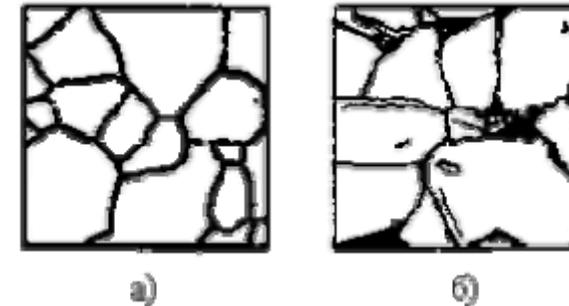


Рис.2. Микроструктура технического железа: а – менее 0,006% C; б – 0,006 – 0,02%С

Таблица 3. Структурная классификация железоуглеродистых сплавов

<i>Со- держ. С,%</i>	<i>Название сплава</i>	<i>Структура при комнат- ной темпе- ратуре</i>	<i>Применение сплавов</i>
0,006- 0,02	Техническое железо	Ф+Ц _{III}	Сердечники транс- форматоров
0,02- 0,8	Доэвтектоидная сталь	Ф+П	Детали машин и кон- струкций
0,8	Эвтектоидная сталь	П	Режущий и меритель- ный инструмент
0,8- 2,14	Заэвтектоидная сталь	П+Ц _{II}	
2,14- 4,3	Доэвтектиче- ский чугун	1. Ферритная Ф+Г	Детали машин, полу- чаемые литьем
4,3	Эвтектический чугун	2. Ферритно- перлитная Ф+П+Г	

		3. Перлитная – П+Г	
4,3- 6,67	Заэвтектиче- ский чугун	(П+Ц)+Ц _I	Исследовательские сплавы
Примечания:			
1. Сокращения: Ф=Fe _α (С) – феррит; П=(Ф+П) – перлит; Ц _I , Ц _{II} , Ц _{III} – цементит (первичный, вторичный, третичный).			
2. Структура конструкционных чугунов характеризуется структурой матрицы и формой графитных включений (пластинчатый, хлопьевидный и шаровидный графит).			

Углеродистыми сталями называют сплавы железа с углеродом, содержащие 0,02...2,14 % углерода, заканчивающие кристаллизацию образованием аустенита.

Они обладают высокой пластичностью, особенно в аустенитном состоянии.

По микроструктуре сплавов можно приблизительно определить количество углерода в составе сплава, учитывая следующее: количество углерода в перлите составляет 0,8%, в цементите – 6,67%. Ввиду малой растворимости углерода в феррите, принимается, что в нем углерода нет.

$$\%C = \%C_{П} = 0,8 \frac{П}{100} - \text{доэвтектоидные стали}$$

$$\%C = \%C_{П} + \%C_{Ц} = 0,8 \frac{П}{100} + 6,67 \frac{Ц}{100} - \text{заэвтек-}$$

тоидные стали

Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода более 2,14 % (до 6,67 %), заканчивающие кристаллизацию образованием эвтектики (ледебурита), называют **чугунами**.

Наличие легкоплавкого ледебурита в структуре чугунов повышает их литейные свойства.

Чугуны, кристаллизующиеся в соответствии с диаграммой состояния железо - цементит, отличаются высокой хрупкостью. Цвет их излома - серебристо-белый. Такие чугуны называются **белыми чугунами**.

По количеству углерода и по структуре **белые чугуны** подразделяются на: **доэвтектические** (2,14-4,3%С) структура **перлит + ледебурит + цементит вторичный**; **эвтектические** (С=4,3%) структура **ледебурит (Л)**; **заэвтектические** (4,3 - 6,67%С) структура **ледебурит - цементит первичный**.

В структуре доэвтектических белых чугунов присутствует цементит вторичный, который образуется в результате изменения состава аустенита при охлаждении (по линии ЕЗ). В структуре цементит вторичный сливается с цементитом, входящим в состав ледебурита.

Фазовый состав сталей и чугунов при нормальных температурах один и тот же, они состоят из феррита и цементита. Однако свойства сталей и белых чугунов значительно различаются. Таким образом, основным фактором, определяющим свойства сплавов системы железо - цементит является их структура.