

Лекция 8

Тема лекции: Железоуглеродистые сплавы. Диаграмма состояния железо – углерод.

Цель лекции:

Ознакомление с системой железо–углерод, типами железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов), их фазовым составом и структурными превращениями при охлаждении. Сформировать понимание зависимости свойств материалов от содержания углерода и термической обработки.

Основные вопросы:

1. Структуры железоуглеродистых сплавов
2. Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов
3. Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов
4. Структуры железоуглеродистых сплавов

Введение.

Структуры железоуглеродистых сплавов.

Железоуглеродистые сплавы – стали и чугуны – важнейшие металлические сплавы современной техники. Производство чугуна и стали по объему превосходит производство всех других металлов, вместе взятых более чем в десять раз.

Диаграмма состояния железо – углерод дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов.

Начало изучению диаграммы железо – углерод положил Чернов Д. К. в 1868 году. Чернов впервые указал на существование в стали критических точек и на зависимость их положения от содержания углерода.

Диаграмма железо – углерод должна распространяться от железа до углерода. Железо образует с углеродом химическое соединение: цементит – Fe_3C . Каждое устойчивое химическое соединение можно рассматривать как компонент, а диаграмму – по частям. Так как на практике применяют металлические сплавы с содержанием углерода до 5%, то рассматриваем часть диаграммы состояния от железа до химического соединения цементита, содержащего 6,67% углерода.

Диаграмма состояния железо – цементит представлена на рис. 9.1.

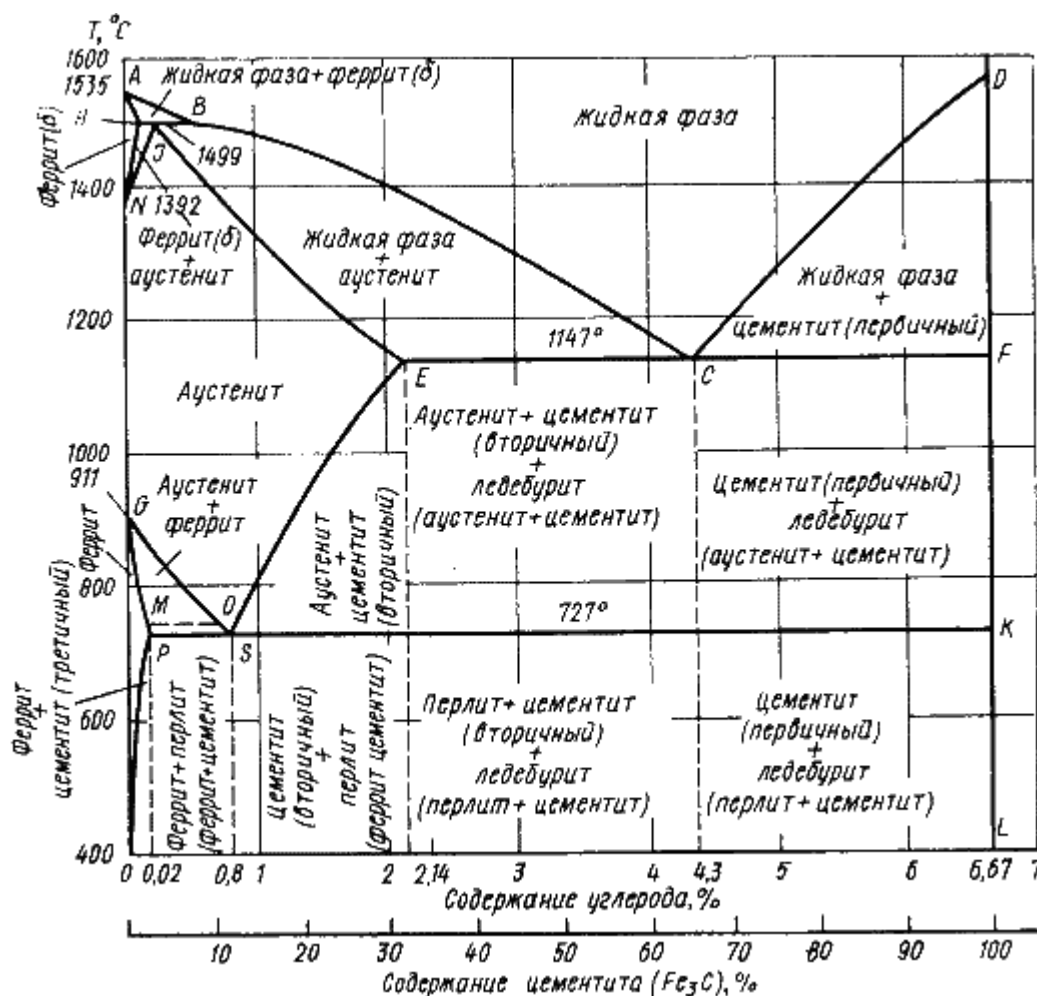


Рис. 9.1. Диаграмма состояния железо - цементит

Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо, углерод и цементит.

1. Железо – переходный металл серебристо-светлого цвета. Имеет высокую температуру плавления – $1539^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения происходят при температурах 911°C и 1392°C . При температуре ниже 911°C существует Fe_{α} с объемно-центрированной кубической решеткой. В интервале температур $911\ldots1392^{\circ}\text{C}$ устойчивым является Fe_{γ} с гранецентрированной кубической решеткой. Выше 1392°C железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку и называется Fe_{δ} или высокотемпературное Fe_{α} . Высокотемпературная модификация Fe_{α} не представляет собой новой аллотропической формы. Критическую температуру 911°C превращения $\text{Fe}_{\alpha} \leftrightarrow \text{Fe}_{\gamma}$ обозначают точкой A_3 , а температуру 1392°C превращения $\text{Fe}_{\alpha} \leftrightarrow \text{Fe}_{\delta}$ - точкой A_4 .

При температуре ниже 768°C железо ферромагнитно, а выше – парамагнитно. Точка Кюри железа 768°C обозначается A_2 .

Железо технической чистоты обладает невысокой твердостью (80 НВ) и прочностью (предел прочности – $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$, предел текучести – $\sigma_T = 120 \text{ МПа}$) и высокими характеристиками пластичности (относительное удлинение – $\delta = 50\%$, а относительное сужение – $\psi = 80\%$). Свойства могут изменяться в некоторых пределах в зависимости от величины зерна.

Железо характеризуется высоким модулем упругости, наличие которого проявляется и в сплавах на его основе, обеспечивая высокую жесткость деталей из этих сплавов.

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами – растворы замещения, с углеродом, азотом и водородом – растворы внедрения.

2. *Углерод* относится к неметаллам. Обладает полиморфным превращением, в зависимости от условий образования существует в форме графита с гексагональной кристаллической решеткой (температура плавления – 3500°C , плотность – $2,5 \text{ г/см}^3$) или в форме алмаза со сложной кубической решеткой с координационным числом равным четырем (температура плавления – 5000°C).

В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита (Fe_3C), а также в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

3. *Цементит* (Fe_3C) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода.

Аллотропических превращений не испытывает. Кристаллическая решетка цементита состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу.

Температура плавления цементита точно не установлена ($1250, 1550^\circ \text{C}$). При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 217°C .

Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ , легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность. Такие свойства являются следствием сложного строения кристаллической решетки.

Цементит способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут замещаться атомами неметаллов: азотом, кислородом; атомы железа – металлами: марганцем, хромом, вольфрамом и др. Такой твердый раствор на базе решетки цементита называется *легированным цементитом*.

Цементит – соединение неустойчивое и при определенных условиях распадается с образованием свободного углерода в виде графита. Этот процесс имеет важное практическое значение при структурообразовании чугунов.

В системе железо – углерод существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит, аустенит, цементит.

1. Жидкая фаза. В жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

2. *Феррит* (Φ) $\text{Fe}_\alpha(\text{C})$ – твердый раствор внедрения углерода в α -железо.

Феррит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – $0,006\%$ при комнатной температуре (точка Q), максимальную – $0,02\%$ при температуре 727°C (точка P). Углерод располагается в дефектах решетки.

При температуре выше 1392°C существует высокотемпературный феррит (δ) ($\text{Fe}_{\delta}(\text{C})$), с предельной растворимостью углерода $0,1\%$ при температуре 1499°C (точка J)

Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость – 130 HB , предел прочности – $\sigma_B = 300\text{ МПа}$) и пластичен (относительное удлинение – $\delta = 30\%$), магнитен до 768°C .

3. Аустенит (A) $\text{Fe}_{\gamma}(\text{C})$ – твердый раствор внедрения углерода в γ -железо.

Углерод занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки.

Аустенит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – $0,8\%$ при температуре 727°C (точка S), максимальную – $2,14\%$ при температуре 1147°C (точка E).

Аустенит имеет твердость $200\ldots 250\text{ HB}$, пластичен (относительное удлинение – $\delta = 40\ldots 50\%$), парамагнитен.

При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования.

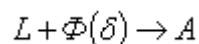
4. Цементит – характеристика дана выше.

В железоуглеродистых сплавах присутствуют фазы: цементит первичный ($Ц_I$), цементит вторичный ($Ц_{II}$), цементит третичный ($Ц_{III}$). Химические и физические свойства этих фаз одинаковы. Влияние на механические свойства сплавов оказывает различие в размерах, количестве и расположении этих выделений. Цементит первичный выделяется из жидкой фазы в виде крупных пластинчатых кристаллов. Цементит вторичный выделяется из аустенита и располагается в виде сетки вокруг зерен аустенита (при охлаждении – вокруг зерен перлита). Цементит третичный выделяется из феррита и в виде мелких включений располагается у границ ферритных зерен.

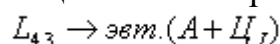
Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов

Линия $ABCD$ – ликвидус системы. На участке AB начинается кристаллизация феррита (δ), на участке BC начинается кристаллизация аустенита, на участке CD – кристаллизация цементита первичного.

Линия $АНЕСС$ – линия солидус. На участке $АН$ заканчивается кристаллизация феррита (δ). На линии $НВ$ при постоянной температуре 1499°C идет перетектическое превращение, заключающееся в том, что жидкая фаза реагирует с ранее образовавшимися кристаллами феррита (δ), в результате чего образуется аустенит:



На участке JE заканчивается кристаллизация аустенита. На участке $ЕСС$ при постоянной температуре 1147°C идет эвтектическое превращение, заключающееся в том, что жидкость, содержащая $4,3\%$ углерода превращается в эвтектическую смесь аустенита и цементита первичного:



Эвтектика системы железо – цементит называется ледебуритом (L), по имени немецкого ученого Ледебура, содержит $4,3\%$ углерода.

При температуре ниже 727°C в состав ледебурита входят цементит первичный и перлит, его называют ледебурит превращенный (ЛП).

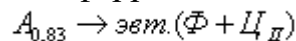
По линии HN начинается превращение феррита (δ) в аустенит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии NJ превращение феррита (δ) в аустенит заканчивается.

По линии GS превращение аустенита в феррит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии PG превращение аустенита в феррит заканчивается.

По линии ES начинается выделение цементита вторичного из аустенита, обусловленное снижением растворимости углерода в аустените при понижении температуры.

По линии MO при постоянной температуре 768°C имеют место магнитные превращения.

По линии PSK при постоянной температуре 727°C идет эвтектоидное превращение, заключающееся в том, что аустенит, содержащий 0,8 % углерода, превращается в эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного:



По механизму данное превращение похоже на эвтектическое, но протекает в твердом состоянии.

Эвтектоид системы железо – цементит называется перлитом (П), содержит 0,8 % углерода.

Название получил за то, что на полированном и протравленном шлифе наблюдается перламутровый блеск.

Перлит может существовать в зернистой и пластинчатой форме, в зависимости от условий образования.

По линии PQ начинается выделение цементита третичного из феррита, обусловленное снижением растворимости углерода в феррите при понижении температуры.

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

Обозначаются буквой А (от французского *arret* – остановка):

A1 – линия PSK (727°C) – превращение $\Pi \leftrightarrow A$;

A2 – линия MO (768°C , т. Кюри) – магнитные превращения;

A3 – линия GOS (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – превращение $\Phi \leftrightarrow A$;

A4 – линия NJ (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – превращение $A \leftrightarrow \Phi(\delta)$;

Acm – линия SE (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – начало выделения цементита 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 с, т.е. A_{c1} , при охлаждении – букву r, т.е. A_{r1} .

Структуры железоуглеродистых сплавов

Все сплавы системы железо – цементит по структурному признаку делят на две большие группы: стали и чугуны.

Особую группу составляют сплавы с содержанием углерода менее 0,02% (точка Р), их называют техническое железо. Микроструктуры сплавов представлены на рис.9.2. Структура таких сплавов после окончания кристаллизации состоит или из зерен феррита (рис.9.2 а), при содержании углерода менее 0,006 %, или из зерен феррита и кристаллов цементита третичного, расположенных по границам зерен феррита (рис.9.2.б), если содержание углерода от 0,006 до 0,02 %.

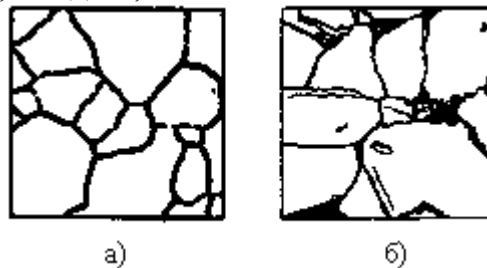


Рис.9.2. Микроструктуры технического железа: а – содержание углерода менее 0,006%; б – содержание углерода 0,006...0,02 %

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.

Структура сталей формируется в результате перекристаллизации аустенита. Микроструктуры сталей представлены на рис. 9.3.

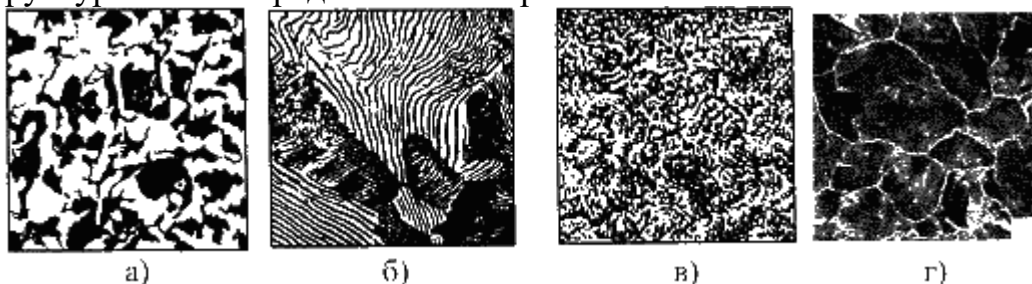


Рис. 9.3. Микроструктуры сталей: а – доэвтектоидная сталь ($\Phi + П$); б – эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит); в – эвтектоидная сталь (зернистый перлит); г – заэвтектоидная сталь ($П + Ц_{II}$).

По содержанию углерода и по структуре стали подразделяются на доэвтектоидные ($0,02\% < C < 0,8\%$), структура феррит + перлит ($\Phi + П$) (рис.9.3 а); эвтектоидные ($C = 0,8\%$), структура перлит (П), перлит может быть пластинчатый или зернистый (рис. 9.3 б и 9.3 в); заэвтектоидные ($0,8\% < C < 2,14\%$), структура перлит + цементит вторичный (П + ЦII), цементитная сетка располагается вокруг зерен перлита.

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.

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.

Микроструктуры белых чугунов представлены на рис. 9.4.



Рис. 9.4. Микроструктуры белых чугунов: а – доэвтектический белый чугун ($\Pi + Л + Ц_{II}$); б – эвтектический белый чугун (Л); в – заэвтектический белый чугун ($Л + Ц_I$).

По количеству углерода и по структуре белые чугуны подразделяются на: доэвтектические ($2,14\% < C < 4,3\%$), структура перлит + ледебурит + цементит вторичный ($\Pi + Л + Ц_{II}$); эвтектические ($C = 4,3\%$), структура ледебурит (Л) (рис. 9.4 б); заэвтектические ($4,3\% < C < 6,67\%$), структура ледебурит + цементит первичный ($Л + Ц_I$) (рис. 9.4 в).

В структуре доэвтектических белых чугунов присутствует цементит вторичный, который образуется в результате изменения состава аустенита при охлаждении (по линии ES). 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.

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Что представляет собой система железо–углерод?
2. Какие фазы входят в диаграмму состояния Fe–C?
3. В чём отличие эвтектического и эвтектоидного превращений?
4. Какой состав соответствует эвтектоидной стали?
5. Чем отличаются стали и чугуны по содержанию углерода и структуре?
6. Почему диаграмма Fe–C имеет важное практическое значение?

Список литературных источников:

1. Улицкий А. Р. Физика материалов. — М.: Физматлит, 2021.
2. Новиков И. И. Материаловедение. — М.: Metallurgy, 2019.
3. Callister W. D., Rethwisch D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. — Wiley, 2022.
4. Ashby M., Jones D. Engineering Materials 1–2. — Elsevier, 2021.
5. Лившиц Б.Г., Краношин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1980, -320 с