

Дисциплина «Материаловедение и ТКМ», лекция 2.1

**Кристаллизация.
Диаграмма фазового
состояния «железо –
углерод». Превращения в
сталях**

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

- 1. Кристаллизация чистых металлов и сплавов.
- 2. Фазы и диаграммы состояния сплавов.
- 3. Диаграмма фазового состояния «железо – углерод».
- 4. Компоненты и фазы в системе железо-углерод.
- 5. Структурные превращения в сталях и чугунах.



Литература

- Конструкционные электротехнические материалы : учебное пособие / В.П. Горелов, С.В. Горелов, В.С. Горелов, Е.А. Григорьев ; под ред. В.П. Горелова. - 5-е изд., стер. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. - 341 с. : ил., схем., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-4475-8609-6 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=445841>. С. 21-40, 45-61, 95-98
- Валуев Н.П., Муров В.А., Пушкин И.А. Материаловедение и безопасность материалов. Неметаллические материалы. – Учебник. - Химки: АГЗ МЧС России, 2013 г., 202 с. С.28-37 с.41-54.
- Материаловедение и технологии конструкционных материалов : учебное пособие / О.А. Масанский, В.С. Казаков, А.М. Токмин и др. ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский Федеральный университет. - Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2015. - 268 с. : табл., граф., ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-7638-3322-5 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=435698>. С.41-54.

Кристаллизация чистых металлов и сплавов

- **Переход из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллов называется процессом кристаллизации**
- **Этот процесс в значительной степени зависит от температуры. Для его изучения строят экспериментальные зависимости в координатах: время-температура. Такие закономерности, полученные опытным путем, называют кривые охлаждения. Превращения из одного состояния в другое под влиянием температуры обусловлен поиском вещества более выгодных энергетических условий, то есть состояний, при которых вещество обладает меньшим запасом свободной энергии.**

- Например, тяжелый шарик из положения 1 стремится попасть в более устойчивое положение 2 (см. рисунок 1), так как потенциальная энергия в положении 2 меньше, чем в положении 1

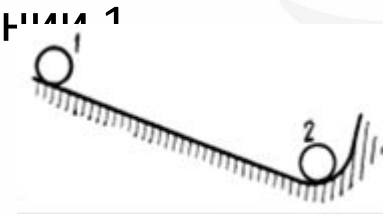
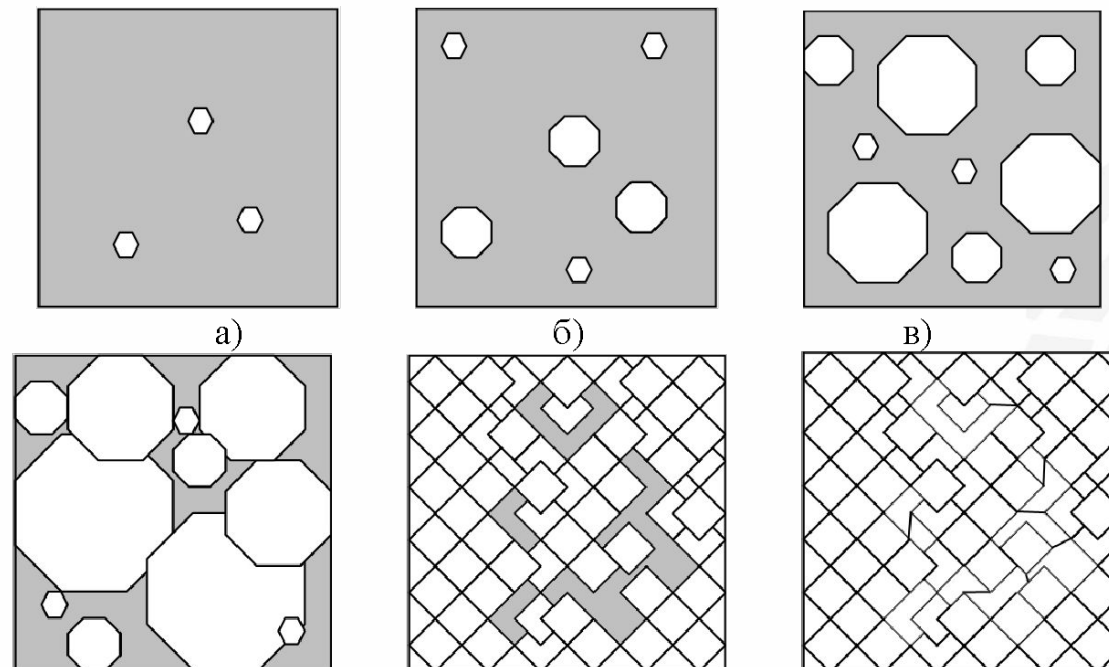



Рис. 1. Изменение потенциальной энергии стального шарика.

Процесс кристаллизации

- Рассмотрим стадии процесса кристаллизации: при понижении температуры сплава ниже температуры кристаллизации на многих участках жидкого металла.

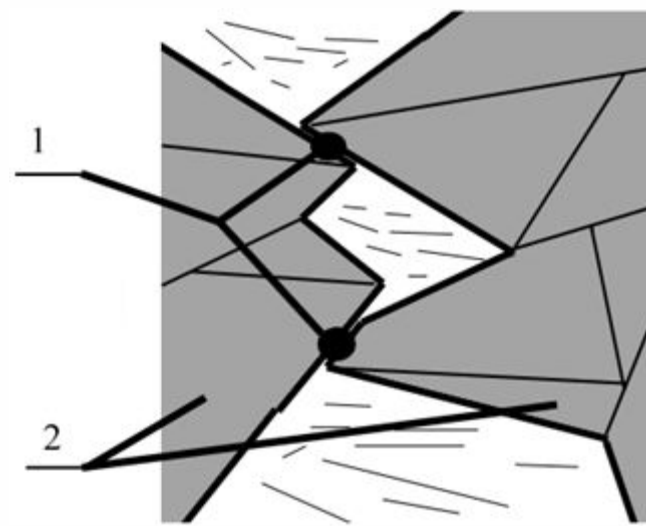
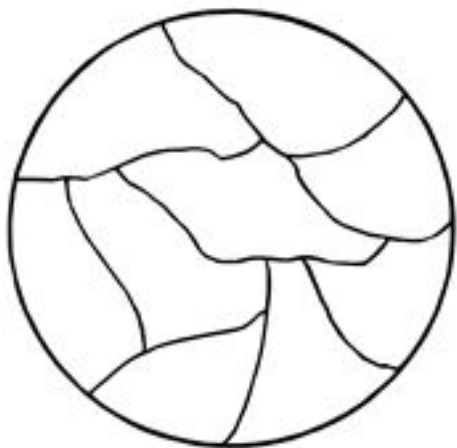




Две независимые стадии процесса кристаллизации

- **Во время протекания кристаллизации различают две стадии (процесса), которые протекают, не имея зависимости, друг от друга. Это процесс образования зародышей и процесс роста кристаллов.**
- **В зависимости от того, какая составляющая процесса кристаллизации идет более интенсивно, возникает та или иная структура. Соответственно и свойства материала, образовавшегося в процессе кристаллизации, в значительной степени зависят от размера и формы кристаллов. Рассмотрим некото-рые конкретные случаи:**

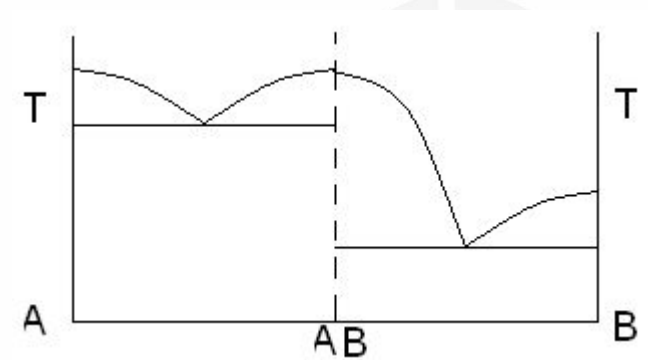
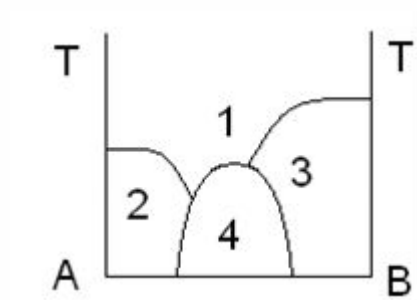
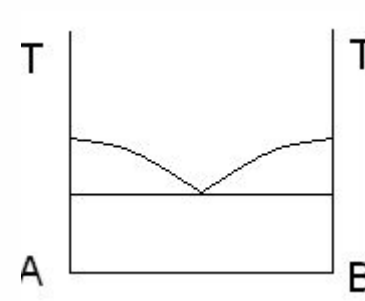
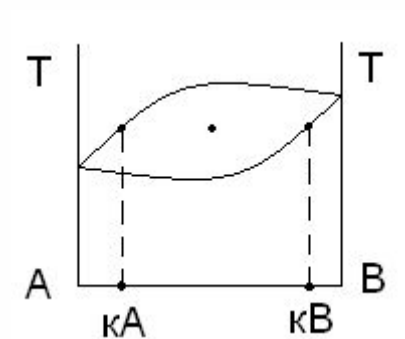
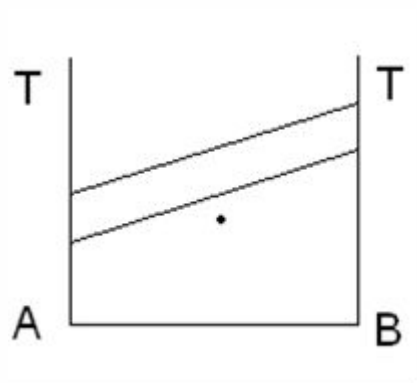
Виды кристаллических структур



Фазы и диаграммы состояния сплавов.

- **Сплав** - материал, образовавшийся из жидкой фазы в результате затвердевания двух или более элементов, находившихся в расплавленном состоянии. Составляющие сплава - компоненты. Их минимальное количество равно двум - бинарный сплав.
- **Фаза** - однородная часть материала (системы), имеющая одинаковый состав, агрегатное состояние и отделённая от остальных частей системы поверхностью перехода (границей), при переходе через которую химический состав или структура вещества меняется скачкообразно. Совокупность фаз, находящихся в равновесии при определённых внешних условиях (температура, давление) - система.
- **Кривая охлаждения** - графическая зависимость в координатах: Температура - Время, отражающая изменение температуры вещества при охлаждении; процессу кристаллизации на кривой охлаждения соответствует горизонтальный участок (его начальная и конечная точки соответствуют началу и концу процесса кристаллизации).
- **Диаграммы состояния** (фазовая диаграмма) - графическое изображение соотношения между параметрами состояния термодинамической равновесной системы (температурой, давлением, компонентами и др.). Позволяет определить количество фаз, образующих систему при данной температуре и концентрации компонентов. Строится (для двухкомпонентной системы) путём проецирования кривых охлаждения на плоскость, образованную в координатах: Температура – Концентрация компонентов

Виды диаграмм состояния



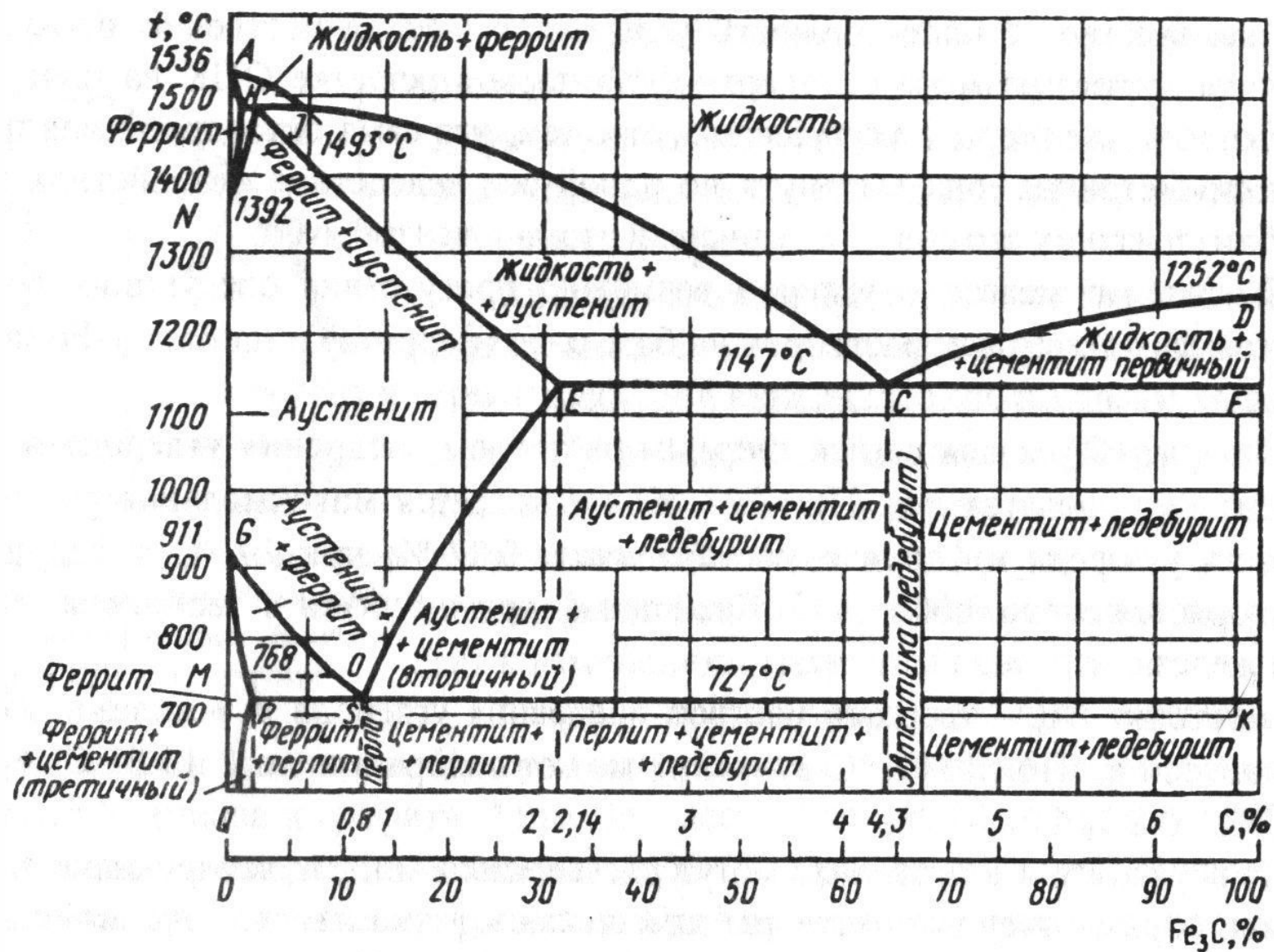
Линии на диаграммах состояния

Эвтектика - точка на диаграмме состояния, указывающая концентрацию двух и более компонентов сплава, при которой твёрдый раствор имеет наименьшую температуру плавления. Точка пересечения линий солидуса и ликвидуса. В ней происходит практически мгновенная кристаллизация обоих компонентов.

Ликвидус - линия на диаграмме состояния, соответствующая температуре начала кристаллизации сплава. Ниже неё - жидкость.

СOLIDUS - линия на диаграмме состояния, соответствующая температуре окончания кристаллизации сплава. Выше неё - твёрдое вещество.

Диаграмма Железо – Цементит (Железо – Углерод)



Компоненты и фазы в системе железо-углерод

- При атмосферном давлении железо может находиться в двух модификациях: низкотемпературная модификация α -Fe с ОЦК решеткой существует до 910 °С, выше этой температуры образуется модификация γ -Fe, которая имеет ОЦК решетку. Углерод образует твердые растворы внедрения на базе полиморфных модификаций железа.
- **Феррит** – твердый раствор углерода в α -Fe (от лат. ferrum – железо). Феррит – малопрочная и пластичная фаза, так как представляет собой почти чистое железо, при комнатной температуре растворимость углерода в α -Fe не превышает 0,005 %, при температуре 727 °С составляет 0,02 %.
- **Аустенит** (по имени английского ученого Робертс-Аустена) – это высокотемпературная пластичная фаза с невысокой прочностью, представляет собой твердый раствор углерода в γ -Fe с ГЦК решеткой, при температуре 727 °С растворимость углерода в аустените составляет 0,8 %, предельная растворимость углерода в аустените достигает 2,14 % при температуре 1147 °С. При медленном охлаждении аустенит распадается на перлит.
- **Цементит** – карбид железа Fe₃C, фаза с высокой твердостью, но хрупкая. В обычных условиях кристаллизации в двойных сплавах железа с углеродом соединение Fe₃C является достаточно стабильным и может существовать без изменений как угодно долгое время. Но, при длительных выдержках в интервале температур 650 – 730 °С или при введении графитизирующих добавок, соединение Fe₃C распадается с образованием графита и железа.
- **Перлит** – это структура, которая образуется при эвтектоидном превращении аустенита при среднем содержании углерода 0,8 %; обычно перлит состоит из чередующихся тонких пластинок феррита и цементита, обладает средней прочностью и невысокой твердостью (рис. 2). Эвтектоидные колонии зарождаются на границах зерен аустенита, по окончании эвтектоидного распада на месте каждого аустенитного зерна оказывается несколько колоний перлита. Образование перлита – это диффузионный процесс: 0,8 % С в аустените за счет диффузии перераспределяются в соответствии с диаграммой состояния, 0,02 % С находится в феррите и 6,67 % С – в цементите. Полированная и протравленная поверхность шлифа приобретает перламутровый оттенок, поэтому эвтектоидная смесь феррита с цементитом получила название перлит (от лат. pearl – жемчужина).

Структурные превращения в сталях и чугунах.

Сталь доэвтектоидная с содержанием 0,3 % углерода При нагреве до A_{c1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) превращений нет, и сталь имеет структуру перлит + феррит. При A_{c1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходит превращение перлита в аустенит и образуется структура аустенит + феррит. От A_{c1} до A_{c3} феррит превращается в аустенит. При A_{c3} сталь имеет структуру аустенита. От A_{c3} до t_{c1} (температуры солидуса) сталь находится в твердом состоянии и имеет структуру аустенита. При температуре солидуса начинается плавление аустенита.

От температуры солидуса t_{c1} до температуры ликвидуса t_{l1} имеется аустенит + жидкий сплав. Выше t_{l1} сталь находится в жидком состоянии.

При охлаждении до температуры t_{l1} сталь находится в жидком состоянии. При t_{l1} начинается кристаллизация аустенита. От t_{l1} до t_{c1} происходит кристаллизация аустенита, и сталь состоит из аустенита и жидкого сплава. От t_{l1} до A_{r3} сталь имеет структуру аустенита. От A_{r3} до A_{r1} часть аустенита превращается в феррит, и сталь имеет структуру: аустенит + феррит. При A_{r1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходит превращение аустенита в перлит. Ниже A_{r1} сталь до полного охлаждения имеет структуру: перлит + феррит (см. рис. 30, а).

Сталь эвтектоидная с содержанием 0,8 % углерода При нагреве до A_{c1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) превращений нет, и сталь имеет перлитную структуру. При A_{c1} происходит превращение перлита в аустенит. Выше A_{c1} до начала плавления сталь имеет аустенитную структуру. При температуре солидуса (для этой стали t_{c2}) начинается плавление аустенита. От t_{c2} до t_{l2} (температура ликвидуса) происходит плавление, и сталь состоит из аустенита и жидкого сплава. Выше t_{l2} сталь находится полностью в жидком состоянии.

При охлаждении до t_{l2} сталь находится в жидком состоянии. При t_{l2} начинается кристаллизация аустенита. От t_{l2} до t_{c2} происходит кристаллизация аустенита и сталь состоит из аустенита и жидкого сплава. От t_{l2} до A_{r1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) сталь состоит из аустенита. При A_{r1} происходит превращение аустенита в перлит. Ниже A_{r1} сталь имеет структуру перлита ..

Сталь заэвтектоидная с содержанием 1,2 % углерода При нагреве до A_{c1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) превращений нет, и сталь имеет структуру: перлит + цементит вторичный. При A_{c1} происходит превращение перлита в аустенит. От A_{c1} до A_{cT} (критическая точка, лежащая на линии SE) происходит растворение вторичного цементита в аустените. При A_{cT} сталь имеет аустенитную структуру. От A_{cT} до температуры солидуса t_{c3} , лежащей на линии AE, сталь находится в аустенитном состоянии. При t_{c3} начинается плавление аустенита. В интервале от t_{c3} до t_{l3} сталь состоит из аустенита и жидкого сплава. Выше t_{l3} сталь полностью находится в жидком состоянии.

Структурные превращения в сталях и чугунах

- **Доэвтектический чугун** с содержанием 3,0 % углерода (рис. 33). При нагреве до A_{c1} превращений нет, и чугун имеет структуру: ледебурит + перлит + вторичный цементит. При этом эвтектика состоит из цементита и перлита. При A_{c1} происходит превращение перлита в аустенит. Это превращение претерпевает как свободный перлит, так и перлит, входящий в эвтектику. Выше A_{c1} чугун состоит из аустенита, вторичного цементита и ледебурита. При этом эвтектика состоит из цементита и аустенита.
- От A_{c1} до t_3 (1147 °C) происходит растворение вторичного цементита в аустените и аустенит насыщается углеродом до 2,14 %.
- При t_3 плавится ледебурит. Выше t_3 чугун состоит из аустенита и жидкого сплава. От t_3 до t_{l4} плавится аустенит. Выше t_{l4} чугун находится полностью в жидком состоянии.
- При охлаждении до t_{l4} чугун находится в жидком состоянии. При t_{l4} начинается кристаллизация аустенита. От t_{l4} до t_3 (1147° C) происходит кристаллизация аустенита и при t_3 чугун состоит из аустенита с содержанием 2,14 % углерода и жидкого сплава эвтектического состава (4,3 % углерода).
- При t_3 происходит эвтектическая кристаллизация, и образуется ледебурит, состоящий из цементита и аустенита с содержанием углерода 2,14 %. От t_3 (1147 °C) до A_{r1} (727 °C) из аустенита как свободного, так и входящего в ледебурит, выделяется вторичный цементит, и содержание углерода понижается до 0,8 %. Следовательно, в этом интервале температур чугун состоит из ледебурита, аустенита и вторичного цементита. При A_{r1} (727 °C) происходит превращение аустенита в перлит. Ниже A_{r1} чугун состоит из ледебурита, перлита и вторичного цементита.
- **Эвтектический чугун** с содержанием 4,3 % углерода. При нагреве до A_{c1} превращений нет, и чугун имеет структуру ледебурит, состоящий из цементита, перлита и вторичного цементита. При A_{c1} происходит превращение перлита в аустенит. Выше A_{c1} чугун имеет структуру – ледебурит, состоящий из цементита, аустенита и вторичного цементита. От A_{c1} до t_3 происходит растворение вторичного цементита и аустенит насыщается углеродом до 2,14 %. При t_3 чугун полностью расплавляется. Выше t_3 чугун находится полностью в жидком состоянии.
- При охлаждении до t_3 (1147 °C) чугун находится в жидком состоянии. При t_3 (1147 °C) чугун полностью затвердевает, и образуется структура – ледебурит, состоящий из аустенита, содержащего 2,14 % углерода и цементита. От t_3 до A_{r1} из аустенита выделяется вторичный цементит, и содержание углерода в аустените понижается до 0,8 %. При A_{r1} аустенит превращается в перлит. Ниже A_{r1} чугун имеет структуру – ледебурит, состоящий из цементита, перлита и вторичного цементита
- **Заэвтектический чугун** с содержанием 5,0 % углерода При нагреве до A_{c1} превращений нет, и чугун имеет структуру – ледебурит + первичный цементит. При A_{c1} (727 °C) перлит, находящийся в эвтектике, превращается в аустенит. Выше A_{c1} чугун имеет структуру – ледебурит и первичный цементит, но эвтектика состоит из цементита и аустенита. От A_{c1} до t_3 (1147 °C) происходит насыщение аустенита углеродом вследствие растворения вторичного цементита и при 1147 °C в аустените содержится 2,14 % углерода.
- При t_3 плавится эвтектика. Выше t_3 чугун состоит из жидкого сплава и первичного цементита.
- От t_3 до t_{l5} происходит плавление первичного цементита. Выше t_{l5} чугун находится полностью в жидком состоянии.
- При охлаждении до t_{l5} чугун находится в жидком состоянии. При t_{l5} начинается кристаллизация первичного цементита. От t_{l5} до t_3 (1147 °C) происходит кристаллизация первичного цементита, и чугун состоит из жидкого сплава и первичного цементита. При t_3 чугун состоит из первичного

Структурные превращения в сталях и чугунах (2)

- От t_3 до t_{l5} происходит плавление первичного цементита. Выше t_{l5} чугун полностью находится в жидком состоянии.
- При охлаждении до t_{l5} чугун находится в жидком состоянии. При t_{l5} начинается кристаллизация первичного цементита. От t_{l5} до t_3 (1147 °С) происходит кристаллизация первичного цементита, и чугун состоит из жидкого сплава и первичного цементита. При t_3 чугун состоит из первичного цементита и жидкого сплава эвтектического состава, т. е. содержащего 4,3 % углерода, который, кристаллизуясь при этой температуре, образует ледебурит, состоящий из цементита и аустенита с содержанием 2,14 % углерода.
- Ниже t_3 превращение претерпевает только ледебурит, а первичный цементит не изменяется. Превращение в ледебурите такое, как описано выше при рассмотрении доэвтектического и эвтектического чугуна, т. е. от t_3 до A_{r1} внутри ледебурита выделяется вторичный цементит, и чугун состоит из ледебурита и первичного цементита.
- При A_{r1} внутри эвтектики аустенит превращается в перлит. Ниже A_{r1} чугун состоит из ледебурита и первичного цементита .



Благодарю за внимание!

tvernick@ mail.ru





