



АКАДЕМИЯ  
ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ  
МЧС РОССИИ

# 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

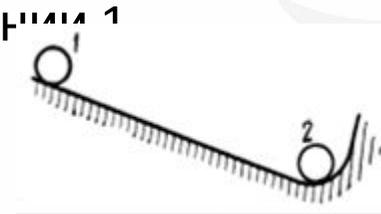
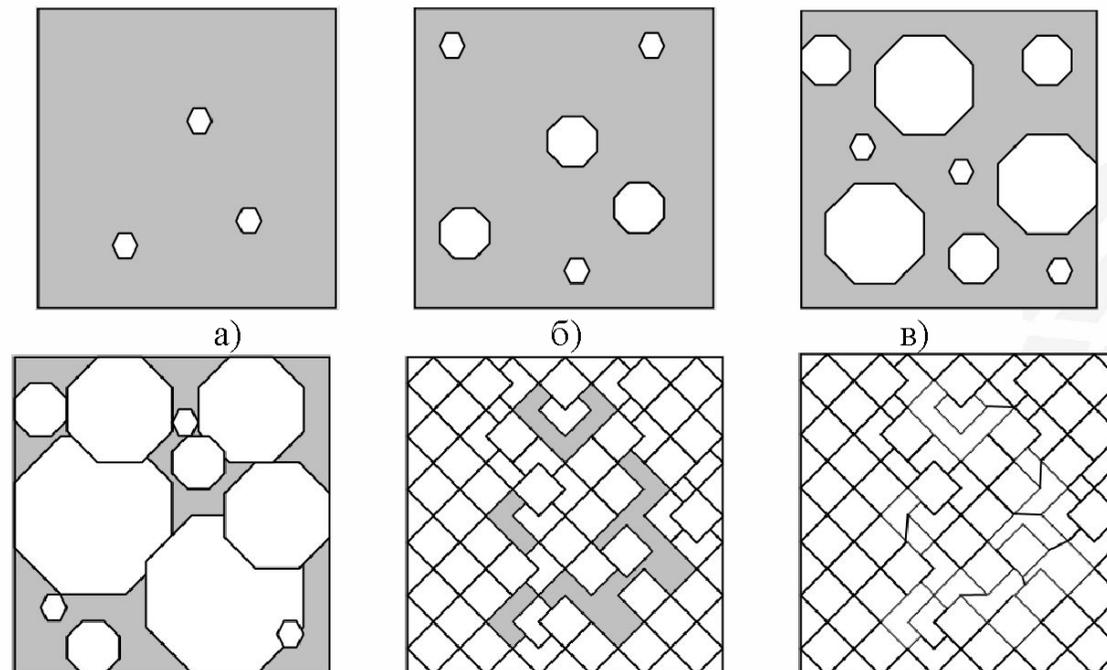


Рис. 1. Изменение потенциальной энергии стального шарика.

# Процесс кристаллизации

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

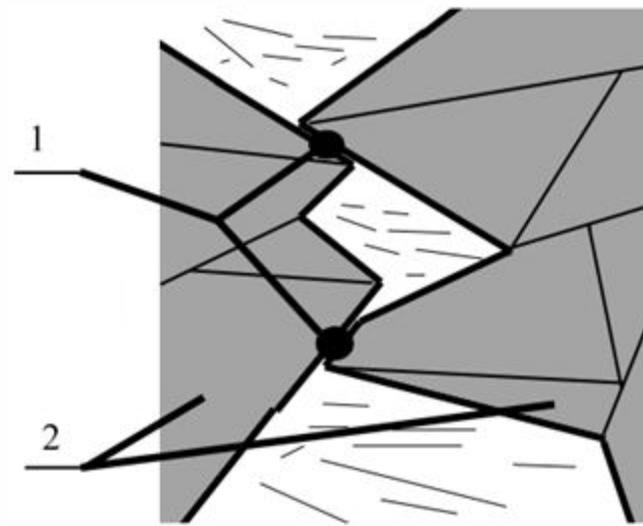
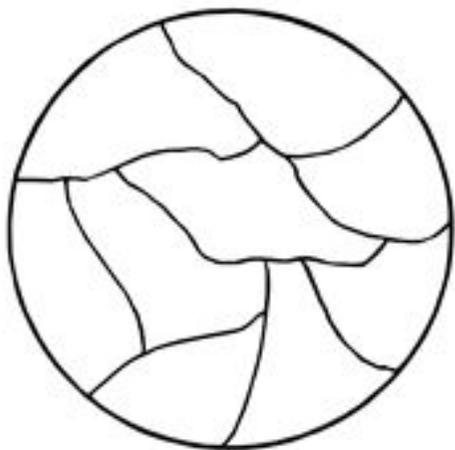




# **Две независимые стадии процесса кристаллизации**

- **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:**

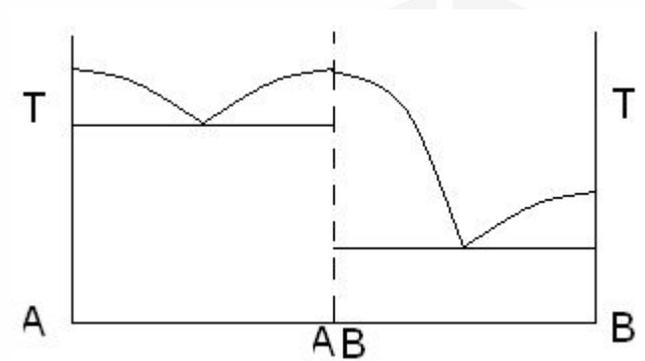
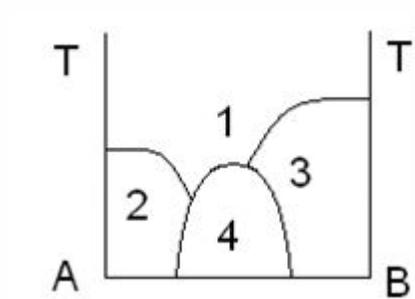
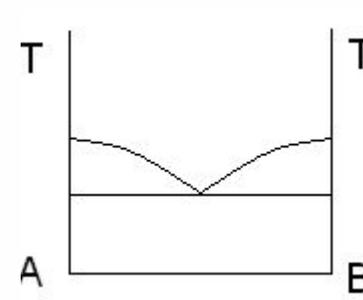
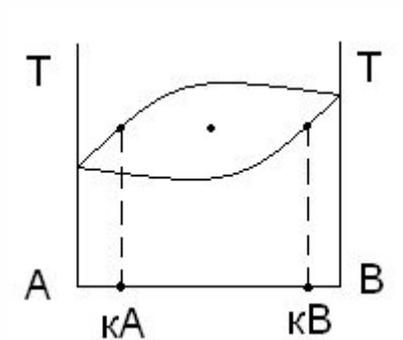
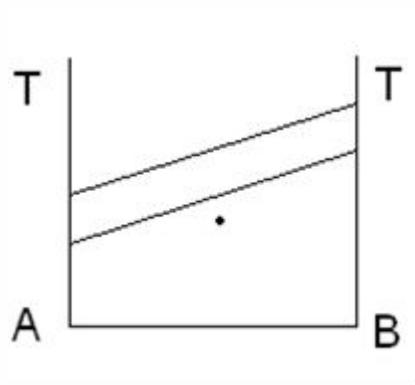
# Виды кристаллических структур



# 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



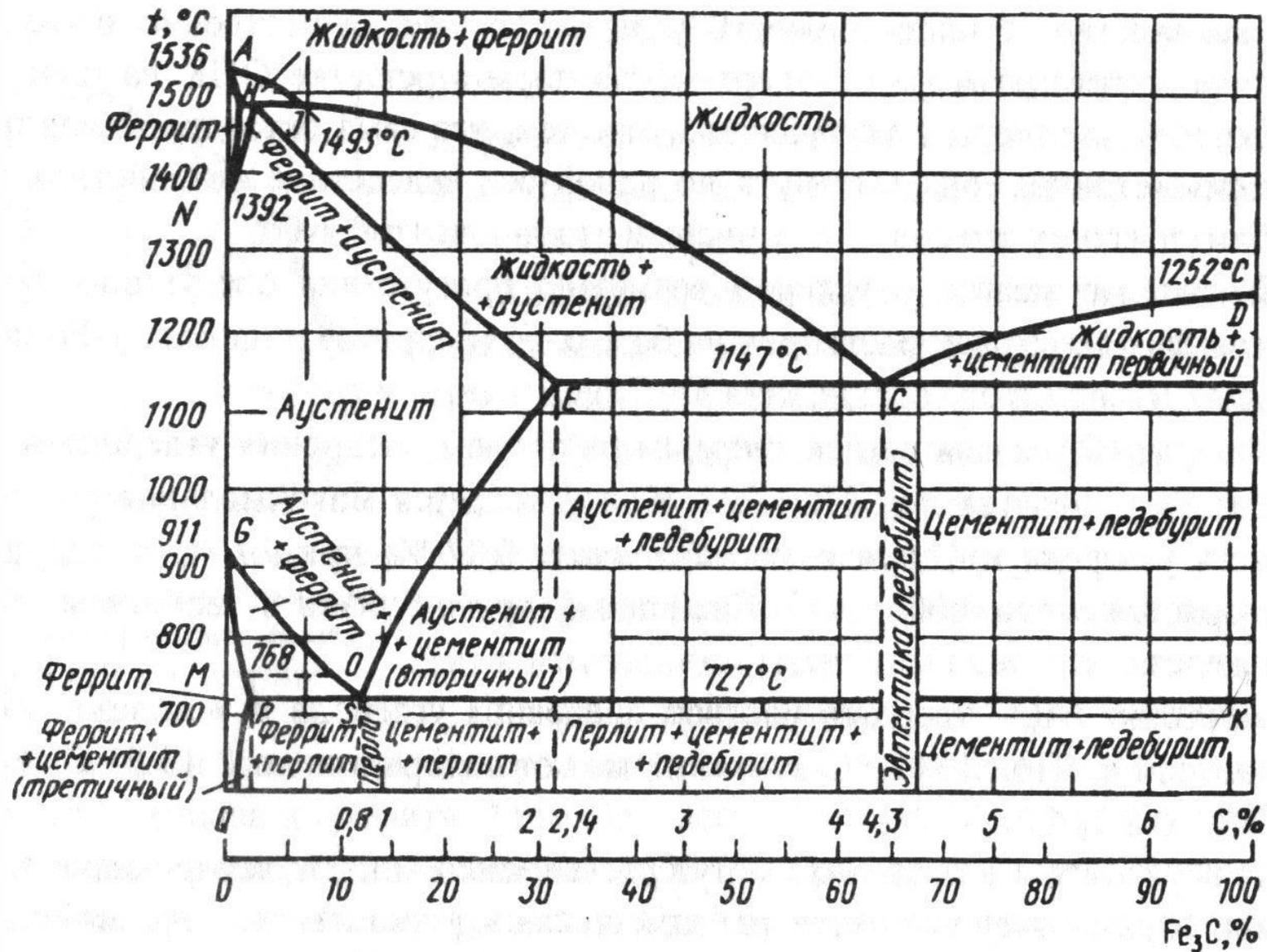
# Линии на диаграммах состояния

**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  $\alpha$ -Fe с ОЦК решеткой существует до 910 °C, выше этой температуры образуется модификация  $\gamma$ -Fe, которая имеет ФЦК решетку. Углерод образует твердые растворы внедрения на базе полиморфных модификаций железа.
- **Феррит** – твердый раствор углерода в  $\alpha$ -Fe (от лат. ferrum – железо). Феррит – малопрочная и пластичная фаза, так как представляет собой почти чистое железо, при комнатной температуре растворимость углерода в  $\alpha$ -Fe не превышает 0,005 %, при температуре 727 °C составляет 0,02 %.
- **Аустенит** (по имени английского ученого Робертс-Аустена) – это высокотемпературная пластичная фаза с невысокой прочностью, представляет собой твердый раствор углерода в  $\gamma$ -Fe с ФЦК решеткой, при температуре 727 °C растворимость углерода в аустените составляет 0,8 %, предельная растворимость углерода в аустените достигает 2,14 % при температуре 1147 °C. При медленном охлаждении аустенит распадается на перлит.
- **Цементит** – карбид железа Fe<sub>3</sub>C, фаза с высокой твердостью, но хрупкая. В обычных условиях кристаллизации в двойных сплавах железа с углеродом соединение Fe<sub>3</sub>C является достаточно стабильным и может существовать без изменений как угодно долгое время. Но, при длительных выдержках в интервале температур 650 – 730 °C или при введении графитизирующих добавок, соединение Fe<sub>3</sub>C 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 % C в аустените за счет диффузии перераспределяются в соответствии с диаграммой состояния, 0,02 % C находится в феррите и 6,67 % C – 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 °C) 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**





