

## Диаграммы состояния (ДС). Классификация, структура, маркировка стали

*Металлическим сплавом* называется материал, полученный сплавлением двух или более металлов или металлов с неметаллами, обладающий металлическими свойствами. Вещества, которые образуют сплав называются компонентами. Фазой называют однородную часть сплава, характеризующуюся определенным составом и строением и отделенную от других частей сплава поверхностью раздела. Под структурой понимают форму размер и характер взаимного расположения фаз в металлах и сплавах. Структурными составляющими называют обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями.

**Виды сплавов по структуре.** По характеру взаимодействия компонентов все сплавы подразделяются на три основных типа: механические смеси, химические соединения и твердые растворы.

**Механическая смесь** двух компонентов А и В образуется, если они не способны к взаимодействию или взаимному растворению. Каждый компонент при этом кристаллизуется в свою кристаллическую решетку. Структура механических смесей неоднородная, состоящая из отдельных зерен компонента А и компонента В. Свойства механических смесей зависят от количественного соотношения компонентов: чем больше в сплаве данного компонента, тем ближе к его свойствам свойства смеси.

**Химическое соединение** образуется когда компоненты сплава А и В вступают в химическое взаимодействие. При этом при этом соотношение чисел атомов в соединении соответствует его химической формуле  $A_mB_n$ . Химическое соединение имеет свою кристаллическую решетку, которая отличается от кристаллических решеток компонентов. Химические соединения имеют однородную структуру, состоящую из одинаковых по составу и свойствам зерен.

При образовании **твердого раствора** атомы одного компонента входят в кристаллическую решетку другого. Твердые растворы замещения образуются в результате частичного замещения атомов кристаллической решетки одного компонента атомами второго (рис. 6,б.). Твердые растворы внедрения образуются когда атомы растворенного компонента внедряются в кристаллическую решетку компонента - растворителя (рис. 6,в.). Твердый раствор имеет однородную структуру, одну кристаллическую решетку. В отличие от химического соединения твердый раствор существует не при строго определенном соотношении компонентов, а в интервале концентраций. Обозначают твердые растворы строчными буквами греческого алфавита  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\beta$ ,  $\tau$ , и т. д.

**Диаграмма состояния.** Диаграмма состояния показывает строение сплава в зависимости от соотношения компонентов и от температуры. Она строится экспериментально по кривым охлаждения сплавов (рис. 8). В отличие от чистых металлов сплавы кристаллизуются не при постоянной температуре, а в интервале температур. Поэтому на кривых охлаждения сплавов имеется две критические точки. В верхней критической точке, называемой точкой *ликвидус* ( $t_l$ ), начинается кристаллизация. В нижней критической точке, которая называется точкой *солидус* ( $t_c$ ), кристаллизация завершается. Кривая охлаждения механической смеси (рис. 8,а) отличается от кривой охлаждения твердого раствора (рис. 8,б) наличием горизонтального участка. На этом участке происходит кристаллизация эвтектики.

Эвтектикой называют механическую смесь двух фаз, одновременно кристаллизовавшихся из жидкого сплава. Эвтектика имеет определенный химический состав и образуется при постоянной температуре.

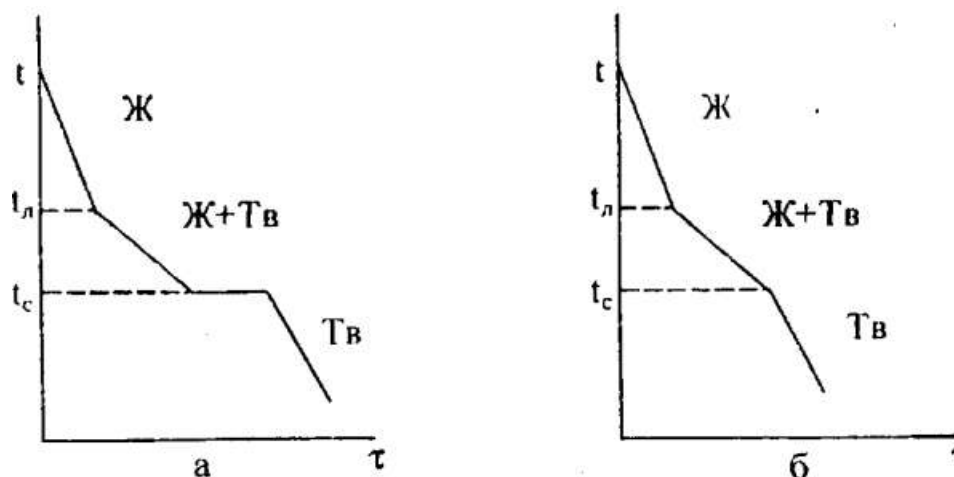


Рис. 8. Кривые охлаждения сплавов: а - механической смеси, б - твердого раствора

Диаграмму состояния строят в координатах температура-концентрация.

Линии диаграммы разграничивают области одинаковых фазовых состояний. Вид диаграммы зависит от того, как взаимодействуют между собой компоненты. Для построения диаграммы состояния используют большое количество кривых охлаждения для сплавов различных концентраций. При построении диаграммы критические точки переносятся с кривых охлаждения на диаграмму и соединяются линией. В получившихся на диаграмме областях записывают фазы или структурные составляющие. Линия диаграммы состояния на которой при охлаждении начинается кристаллизация сплава называется линией ликвидус, а линия на которой кристаллизация завершается — *линией солидус*.

**Виды диаграмм состояния.** Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси (рис. 9), характеризуется отсутствием растворения компонентов в твердом состоянии. Поэтому в этом сплаве возможно образование трех фаз: жидкого сплава Ж, кристаллов А и кристаллов В. Линия АСВ диаграммы является *линией ликвидус*: на участке АС при охлаждении начинается кристаллизация компонента А, а на участке СД — компонента В. Линия ДС В является линией *солидус*, на ней завершается кристаллизация А или В и при постоянной температуре происходит кристаллизация эвтектики Э. Сплавы концентрация которых соответствует точке С диаграммы называются эвтектическими, их структура представляет собой чистую эвтектику. Сплавы, расположенные на диаграмме левее эвтектического, называются *доэвтектическими*, их структура состоит из зерен А и эвтектики. Те сплавы которые на диаграмме расположены правее эвтектического, называются *заэвтектическими*, их структура представляет собой зерна В, окруженные эвтектикой.

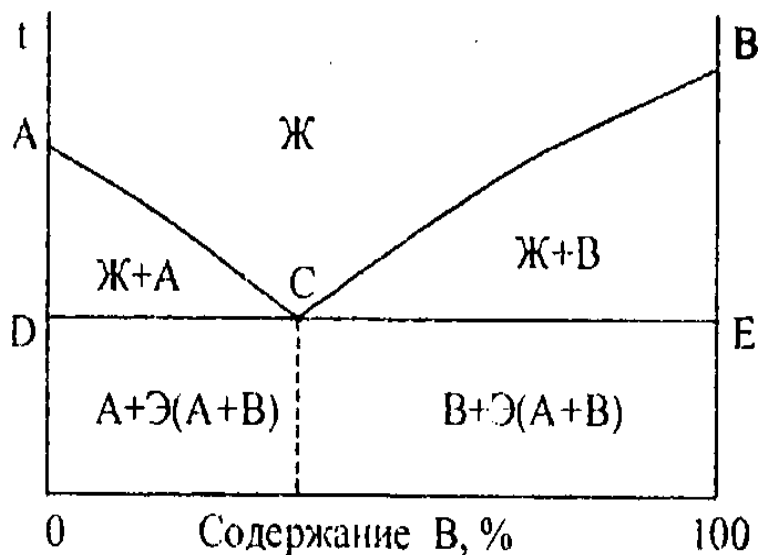


Рис. 9. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии изображена на рис. 10. Для этого сплава возможно образование двух фаз: жидкого сплава и твердого раствора  $\alpha$ . На диаграмме имеется всего две линии, верхняя является линией ликвидус, а нижняя — линией солидус.

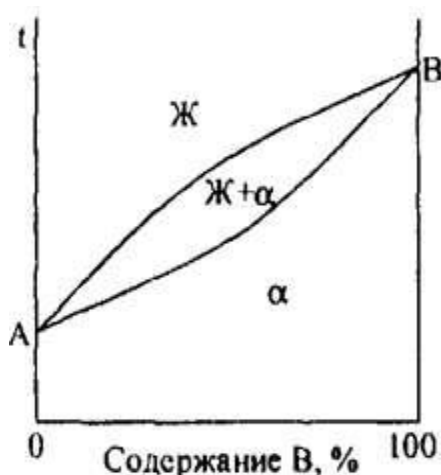


Рис. 10. Диаграмма с неограниченной

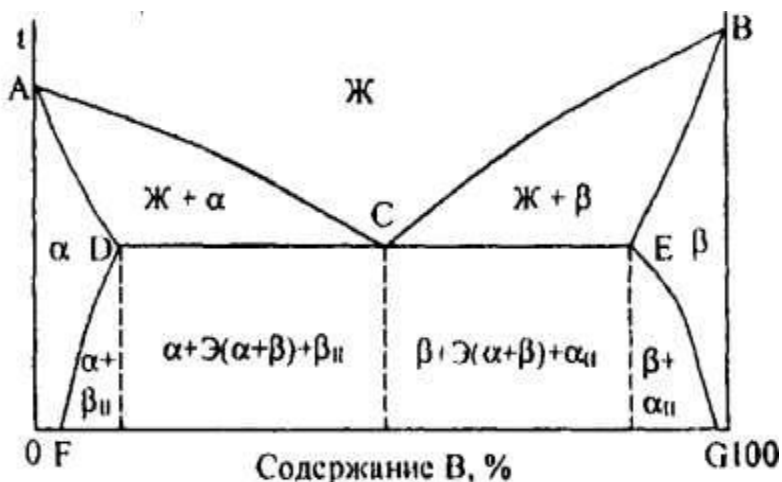


Рис. 11. Диаграмма состояния сплавов с состоянием сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии показана на рис. 11. В этом сплаве могут существовать три фазы — жидкий сплав, твердый раствор  $\alpha$  компонента В в компоненте А и твердый раствор  $\beta$  компонента А в компоненте В. Данная диаграмма содержит в себе элементы двух предыдущих. Линия АСВ является линией ликвидус, линия ADCEB — линией солидус. Здесь также образуется эвтектика, имеются эвтектический, доэвтектический и заэвтектический сплавы. По линиям FD и EG происходит выделение вторичных кристаллов  $\alpha_{II}$  и  $\beta_{II}$  (вследствие уменьшения растворимости с понижением температуры). Процесс выделения вторичных кристаллов из твердой фазы называется вторичной кристаллизацией.

Диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение (рис.12) характеризуется наличием вертикальной линии, соответствующей соотношению компонентов в химическом соединении  $A_mB_n$ . Эта линия делит диаграмму на две части, которые можно рассматривать как самостоятельные диаграммы сплавов, образуемых

одним из компонентов с химическим соединением. На рис. 12 изображена диаграмма для случая, когда каждый из компонентов образует с химическим соединением механическую смесь.

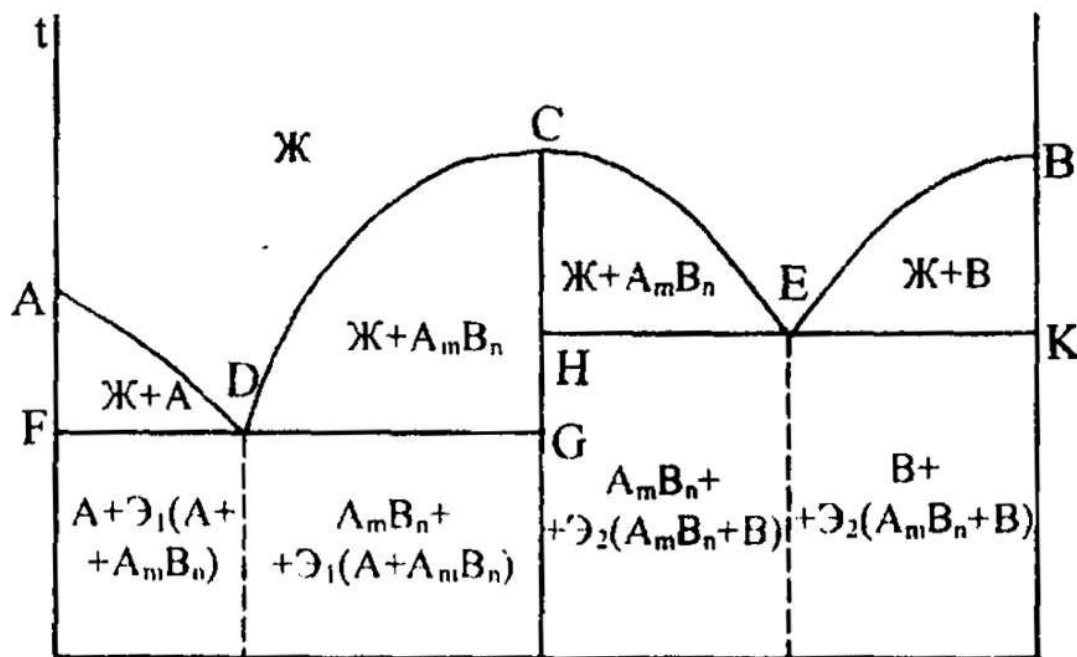


Рис.12 Диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение

### Сплавы железа с углеродом

#### Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов дает представление о строении основных конструкционных сплавов — сталей и чугунов.

#### Компоненты, фазы и структурные составляющие сплавов железа с углеродом.

**Железо** — пластичный металл серебристо-белого цвета с невысокой твердостью (НВ 80). Температура плавления — 1539°C, плотность 7,83 г/см<sup>3</sup>.

Имеет полиморфные модификации (см. раздел 2.1.). С углеродом железо образует химическое соединение и твердые растворы.

**Ферритом** называется твердый раствор углерода в α- железе. Содержание углерода в феррите очень невелико — максимальное 0,02% при температуре 727°C. Благодаря столь малому содержанию углерода свойства феррита совпадают со свойствами железа (низкая твердость и высокая пластичность). Твердый раствор углерода в высокотемпературной модификации Feγ (т.е. в Feδ) часто называют δ- ферритом или высокотемпературным ферритом.

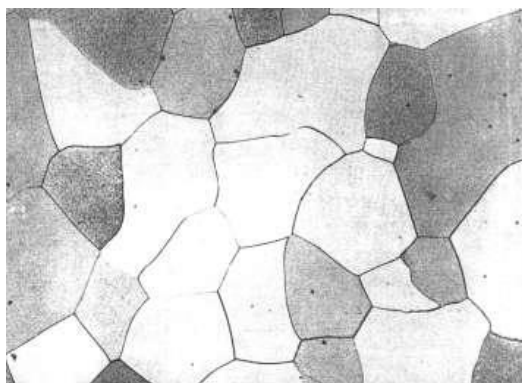


Рис. 13 Феррит

**Аустенит** — это твердый раствор углерода в  $\gamma$ - железе. Максимальное содержание углерода в аустените составляет 2,14% (при температуре 1147°C). Имеет твердость HB 220

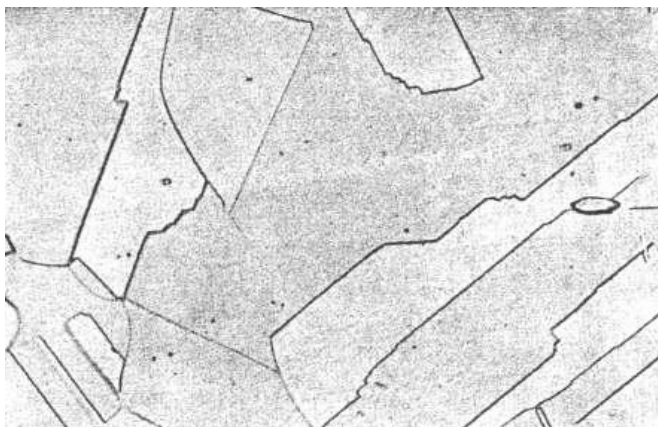


Рис. 14 Аустенит

**Цементит** — это химическое соединение железа с углеродом (карбид железа)  $Fe_3C$ . В нем содержится 6,67 % углерода (по массе). Имеет сложную ромбическую кристаллическую решетку. Характеризуется очень высокой твердостью (HB 800), крайне низкой пластичностью и хрупкостью.

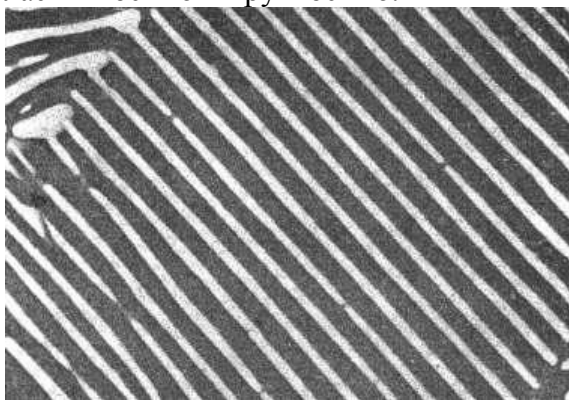


Рис. 15 Пластинчатый перлит

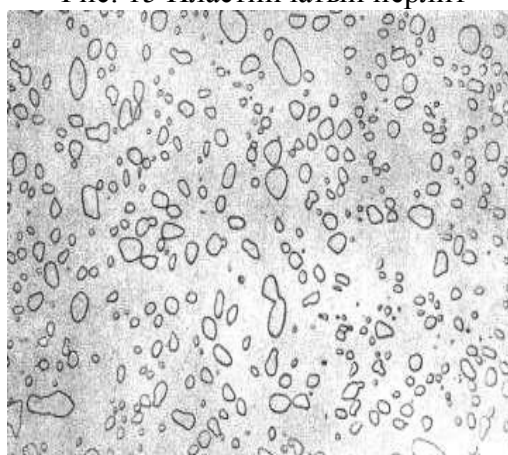


Рис. 16 Зернистый перлит

**Перлит** — это механическая смесь феррита с цементитом. Содержит 0,8% углерода, образуется из аустенита при температуре 727°C. Имеет пластинчатое строение, т.е. его зерна состоят из чередующихся пластинок феррита и цементита. Перлит является эвтектоидом.

**Эвтектоид** — это механическая смесь двух фаз, образующаяся из твердого раствора (а не из жидкого сплава, как эвтектика).

**Ледебурит** представляет собой эвтектическую смесь аустенита с цементитом. Содержит 4,3% углерода, образуется из жидкого сплава при температуре 1147°C. При температуре 727°C аустенит, входящий в состав ледебурита превращается в перлит и ниже этой температуры ледебурит представляет собой механическую смесь перлита с цементитом. Фаза цементита имеет пять структурных форм: цементит первичный, образующийся из жидкого сплава; цементит вторичный, образующийся из аустенита; цементит третичный, образующийся из феррита; цементит ледебурита; цементит перлита.

**Диаграмма Fe-Fe<sub>3</sub>C.** На рис. 17 приведена диаграмма состояния сплавов железа с цементитом. На горизонтальной оси концентраций отложено содержание углерода от 0 до 6,67%. Левая вертикальная ось соответствует 100% содержанию железа. На ней отложены температура плавления железа и температуры его полиморфных превращений. Правая вертикальная ось (6,67% углерода) соответствует 100% содержанию цементита. Буквенное обозначение точек диаграммы принято согласно международному стандарту и изменению не подлежит.

Точка	Температура, °C	Предельная концентрация	
A	1539	0	Температура плавления железа
B	1499	0.51	Состав жидкой фазы при перитектической реакции
C	1147	4.3	Состав эвтектики - ледебурита
D	1260	6.67	Состав эвтектики - ледебурита
E	1147	2.14	Предельная растворимость углерода в $\gamma$ - железе
J	1499	0.16	Состав аустенита при перитектической реакции
H	1499	0.1	Состав феррита при перитектической реакции
N	1399	0	Превращение $\delta$ - железа в $\gamma$ - железо
G	911	0	Превращение $\alpha$ - железа в $\gamma$ - железо
S	727	0.8	Состав эвтектоида - перлит
P	727	0.025	Предельная растворимость углерода в $\alpha$ - железе
Q	20	0.01	Минимальная растворимость углерода в $\alpha$ - железе

## Диаграмма состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C

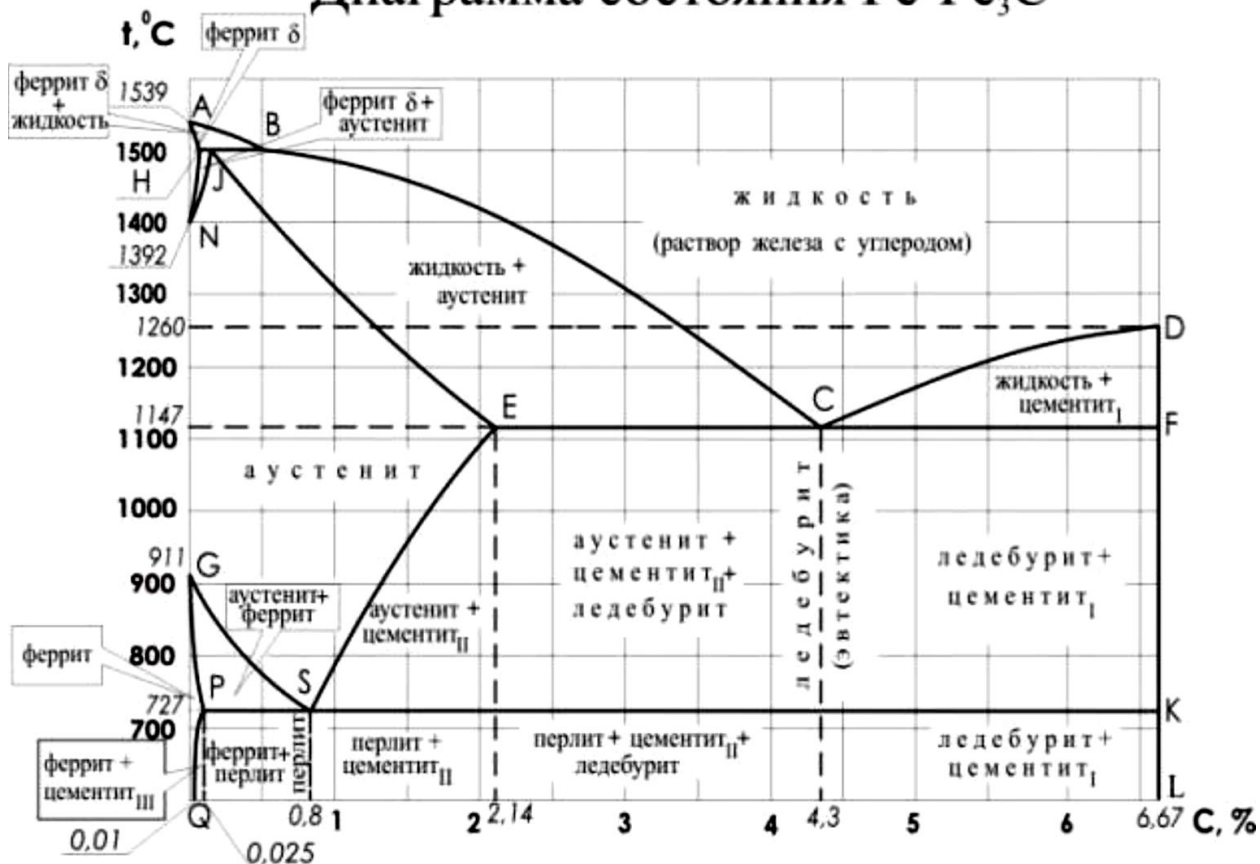


Рис. 17 Диаграмма состояния железо-углерод

Железоуглеродистые сплавы в зависимости от содержания углерода делятся на техническое железо (до 0,02% C), сталь (от 0,02 до 2,14 % C) и чугун (от 2,14 до 6,67% C). Сталь, содержащая до 0,8% C называется доэвтектоидной, 0,8% C — эвтектоидной и свыше 0,8% C — заэвтектоидной. Чугун, содержащий от 2,14 до 4,3% C называется доэвтекктическим, ровно 4,3% — эвтекктическим и от 4,3 до 6,67% C — заэвтекктическим.

Структура технической железа представляет собой зерна феррита или феррит с небольшим количеством третичного цементита. Обязательной структурной составляющей стали является перлит. Структура доэвтектоидной стали, состоит из равномерно распределенных зерен феррита и перлита. Эвтектоидная сталь состоит только из перлита. Структура заэвтектоидной стали представляет собой зерна перлита, окруженные сплошной или прерывистой сеткой вторичного цементита. Для чугуна характерно наличие ледебурита в структуре. Структура доэвтекктического чугуна состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита, эвтекктическую — из ледебурита и заэвтекктического — из ледебурита и первичного цементита. Значение диаграммы железо - цементит состоит в том, что она позволяет объяснить зависимость структуры и, соответственно, свойств сталей и чугунов от содержания углерода и определить режимы термической обработки для изменения свойств сталей.

### Стали

*Сталью* называется сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится не более 2,14%. Это теоретическое определение. На практике в сталях, как правило, не содержится углерода более 1,5%.

**Влияние углерода и примесей на свойства стали.** Углерод существенно влияет на свойства стали даже при незначительном изменении его содержания. В стали имеются две фазы — феррит и цементит (частично в виде перлита). Количество цементита

возрастает прямо пропорционально содержанию углерода. Как уже говорилось, феррит характеризуется высокой пластичностью и низкой твердостью, а цементит, напротив, очень низкой пластичностью и высокой твердостью. Поэтому с повышением содержания углерода до 1,2% снижаются пластичность и вязкость стали и повышаются твердость и прочность. Повышение содержания углерода влияет и на технологические свойства стали. Ковкость, свариваемость и обрабатываемость резанием ухудшаются, но литейные свойства улучшаются.

Кроме железа и углерода в стали всегда присутствуют постоянные примеси.

Наличие примесей объясняется технологическими особенностями производства стали (марганец, кремний) и невозможностью полного удаления примесей, попавших в сталь из железной руды (сера, фосфор, кислород, водород, азот).

Возможны также случайные примеси (хром, никель, медь и др.).

**Марганец и кремний** вводят в любую сталь для раскисления, т.е. для удаления вредных примесей оксида железа FeO. Марганец также устраняет вредные сернистые соединения железа. При этом содержание марганца обычно не превышает 0,8%, а кремния — 0,4%. Марганец повышает прочность, а кремний упругость стали.

**Фосфор** растворяется в феррите, сильно искажает кристаллическую решетку, снижая при этом пластичность и вязкость, но повышая прочность. Вредное влияние фосфора заключается в том, что он сильно повышает температуру перехода стали в хрупкое состояние, т.е. вызывает ее хладноломкость. Вредность фосфора усугубляется тем, что он может распределяться в стали неравномерно. Поэтому содержания фосфора в стали ограничивается величиной 0,045%.

**Сера** также является вредной примесью. Она нерастворима в железе и образует с ним сульфид железа FeS, который образует с железом легкоплавкую эвтектику. Эвтектика располагается по границам зерен и делает сталь хрупкой при высоких температурах. Это явление называется **красноломкостью**. Количество серы в стали ограничивается 0,05%.

**Водород, азот и кислород** содержатся в стали в небольших количествах.

Они являются вредными примесями, ухудшающими свойства стали.

**Классификация сталей.** По химическому составу стали могут быть углеродистыми, содержащими железо, углерод и примеси и легированными, содержащими дополнительно легирующие элементы, введенные в сталь с целью изменения ее свойств.

**По содержанию углерода** стали делятся на низкоуглеродистые (до 0,25% С), среднеуглеродистые (0,25 — 0,7% С) и высокоуглеродистые (более 0,7% С).

**По назначению** различают стали конструкционные, идущие на изготовление деталей машин, конструкций и сооружений, инструментальные, идущие на изготовление различного инструмента, а также стали специального назначения с особыми свойствами: нержавеющие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, с особыми электрическими и магнитными свойствами и др.

**По показателям качества** стали классифицируются на обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные.

Качество стали характеризуется совокупностью свойств, определяемых процессом производства, химическим составом, содержанием газов и вредных примесей (серы и фосфора). В соответствии с ГОСТом стали обыкновенного качества должны содержать не более 0,045% Р и 0,05% S, качественные — не более 0,035% Р и 0,04% S, высококачественные — не более 0,025% Р и 0,025% S и особовысококачественные — не более 0,025% Р и 0,015% S. Углеродистые конструкционные стали могут быть только обыкновенного качества и качественными.

**Углеродистые стали обыкновенного качества** в зависимости от назначения и гарантируемых свойств делятся на три группы: А, Б и В.



Стали *группы А* имеют гарантируемые механические свойства. Они используются в состоянии поставки без горячей обработки или сварки. Эти стали маркируются буквами Ст и цифрами, обозначающими порядковый номер марки. Выпускается семь марок сталей группы А: Ст0, Ст1, Ст2, Ст6. Чем выше номер марки, тем больше содержание углерода и, соответственно, выше прочность и ниже пластичность.

Стали *группы Б* имеют гарантируемый химический состав. Эти стали подвергаются горячей обработке. При этом их механические свойства не сохраняются, а химический состав важен для определения режима обработки.

Маркируются они так же, как стали группы А, но перед буквами Ст ставится буква Б. Чем выше номер марки, тем больше содержание в стали углерода, марганца и кремния.

Стали *группы В* имеют гарантируемые механические свойства и химический состав. Эти стали используются для сварки, так как для выбора режима сварки надо знать химический состав, а механические свойства частей изделий, не подвергшихся тепловому воздействию, остаются без изменений. В марках сталей этой группы на первое место ставится буква В. При этом механические свойства соответствуют свойствам аналогичной марки из группы А, а химический состав — составу аналогичной марки из группы Б.

**Качественные конструкционные углеродистые** стали маркируются цифрами 08, 10, 15, 20, 25, 85, которые обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Эти стали отличаются от сталей обыкновенного качества большей прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Если для сталей обыкновенного качества максимальная прочность составляет 700 МПа, то для качественной она достигает 1100 Мпа.

### ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

*Легированной* называют сталь, содержащую специально введенные в нее с целью изменения строения и свойств легирующие элементы.

Легированные стали имеют целый ряд преимуществ перед углеродистыми. Они имеют более высокие механические свойства, прежде всего, прочность.

Легированные стали обеспечивают большую прокаливаемость, а также возможность получения структуры мартенсита при закалке в масле, что уменьшает опасность появления трещин и коробления деталей. С помощью легирования можно придать стали различные специальные свойства (коррозионную стойкость, жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, магнитные и электрические свойства).

Отметим, что если стали обыкновенного качества могут быть только углеродистыми, т.е. легированные стали, как минимум, являются качественными.

### Подробно маркировка сталей изучается на практических занятиях.

Таблица 1 - Легированная сталь по количеству легирующих элементов.

Класс	Общая масса легирующих элементов
высоколегирующая	более 10%;
среднелегирующая	более 2,5-10%;
низколегирующая	до 2,5%.

Таблица 2 - Легированные стали по назначению.

Класс	Пояснения
конструкционные	Применяют для изготовления несущих конструкций, например: рамы, опоры, балки, каркасы вагонов, мостовые переходы, элементы строения пути, детали машин и механизмов и т.д.
инструментальные	Изготавливают инструмент для обработки других материалов с заведомо меньшей твердостью, например: резцы, сверла, пилы, ключи и т.д.

С особыми свойствами	электротехнические, нержавеющей, жаропрочные и др. для решения конкретных задач с более напряженными условиями эксплуатации.
----------------------	--

Таблица 3 - Легированные стали по способу дальнейшей обработки.

Класс	Способ дальнейшей обработки
а	горячекатаная и кованая металлопродукция для горячей обработки давлением и холодного волочения без контроля структурных характеристик
б	горячекатаная и кованая металлопродукция для холодной механической обработки с полным объемом испытаний

Таблица 4 - Легированная сталь по качеству изготовления.

Класс	Обозначение
обычная	Стандартное обозначение компонентов.
высококачественная	Буква «А» в конце — сталь высококачественная. Например, 5ХА – высококачественная.

Таблица 5 - Классификация легированных сталей по качеству и отделке поверхностей.

Класс	Обозначение
горячекатаная и кованая	2ГП — для подгруппы «а», 3ГП — для подгруппы «б» повышенного качества, 4ГП — для подгруппы «б» обычного качества
калиброванная	Б и В
со специальной отделкой поверхности	В, Г, Д

Таблица 6 - Легированные стали по производителю.

Обозначение	Производитель
ЭИ	завод «Электросталь»
ЗИ	Златоустовский металлургический завод

Таблица 7 – Легированные стали по структуре.

Класс	Пояснения
перлитные	знакомая нам структура перлита или перлита с ферритом, либо при более быстром охлаждении, сорбита или троостита.
мартенситные	уже при охлаждении на воздухе аустенит превращается в чрезвычайно твердый и хрупкий мартенсит без специальной закалки, требующейся для углеродистых сталей.
аустенитные	даже при комнатной температуре аустенит сохраняется, а не распадается на перлит, сорбит, тростит, как у углеродистых сталей.
ферритные	при нагревании и охлаждении этих сталей феррит не превращается в аустенит и наоборот
карбидные	содержат повышенное кол-во углерода и карбидообразующих элементов; структура таких сталей характеризуется наличием карбидов.