

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9
ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ "ЖЕЛЕЗО - УГЛЕРОД" И
МИКРОСТРУКТУРА СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

1 Цель работы

- 1.1 Ознакомиться с взаимодействием железа и углерода в жидком и твердом состоянии и со строением фаз, возникающих при их сплавлении.
- 1.2 Ознакомиться с диаграммой состояния системы железо-углерод.
- 1.3 Научиться, пользуясь диаграммой состояния, анализировать формирование структуры сплавов при охлаждении из жидкого состояния и изменение структуры в зависимости от состава сплавов.
- 1.4 Практически ознакомиться со структурами сталей и чугунов.

2 Железо и углерод, их строение и взаимодействие

Железо - переходный металл с недостроенной 3d - электронной оболочкой, атомный номер 26, атомный вес 55,85.

Железу присущ температурный полиморфизм, оно существует в двух модификациях: α Fe с ОЦК и γ Fe с ГЦК пространственной решеткой. α Fe устойчиво при низких температурах до 911° и при высоких температурах от 1392° до плавления при 1539° . В интервале от 911° до 1392° существует γ Fe.

Углерод - типичный неметалл, атомный номер 6, атомный вес 12. Углерод может существовать в виде алмаза и графита. В сплавах с железом свободный (элементарный) углерод существует только в виде графита. Графит имеет слоистую структуру - гексагональную пространственную решетку с отношением C/a около 2,5.

При сплавлении железа с углеродом возникают следующие фазы:

- а) жидкий раствор углерода в железе (Ж);
- б) твердый раствор углерода в α железе - феррит;
- в) твердый раствор углерода в γ железе - аустенит;
- г) графит;
- д) промежуточная фаза Fe_3C - цементит (карбид железа).

В жидком состоянии углерод и железо неограниченно растворимы друг в друге, в растворе углерод статистически равномерно распределяется между атомами железа, но вблизи атомов углерода образуются октаэдрические комплексы - атом углерода, окруженный 6 атомами железа, образующими октаэдр (это играет решающую роль в процессе кристаллизации, о чем будет сказано ниже).

Обе модификации железа способны растворять углерод, образуя *твердые растворы внедрения*. *Твердый раствор углерода в α Fe называется ферритом, в γ -Fe - аустенитом.*

Растворимость углерода в твердом железе невелика, особенно в α Fe. При комнатной температуре она составляет 0,006% по массе (0,25% атомных), при повышении температуры до 727° возрастает до 0,025%. В высокотемпературном α Fe при температуре 1499° растворимость углерода достигает 0,1%. В γ Fe растворяется значительно больше углерода: при 727° - 0,8%, при повышении температуры до 1147° растворимость возрастает до 2,14%.

♦ - При содержании углерода в сплавах выше предела растворимости он может выделяться в виде *графита*. Графит - термодинамически стабильная фаза. Чаще всего он присутствует в высокоуглеродистых сплавах - чугунах, когда при кристаллизации из жидкого раствора флуктуации состава могут обеспечить образование зародышей и рост его кристаллов.

♦ - В малоуглеродистых сплавах для образования кристаллов графита нужны очень большие флуктуации состава, и при обычно достигаемых скоростях охлаждения возникает *интерметаллидная фаза* - Fe_3C . Этому способствует практическое наличие молекулы Fe_3C в жидком растворе в виде октаэдрических комплексов.

Соединение Fe_3C (цементит или карбид железа) близок к фазам внедрения. Оно имеет ромбическую пространственную решетку, составленную из октаэдров, в вершинах которых находятся ионы железа, в центре - ион углерода.

Таким образом, в твердом состоянии в сплавах Fe-C могут существовать четыре фазы: феррит - Ф, аустенит - А, цементит - Ц и графит - Г.

Соединение Fe_3C метастабильно; при длительном нагревании оно разлагается на железо и графит, при высоких температурах этот процесс идет очень быстро, что не позволяет точно определить температуру плавления цементита.

В твердых растворах и в цементите атомы железа и углерода положительно ионизированы, т.е. углерод ведет себя подобно металлу, поэтому все эти фазы (Ф, А и Ц) имеют металлическую природу и обладают металлическими свойствами.

3 Диаграмма состояния "железо-углерод"

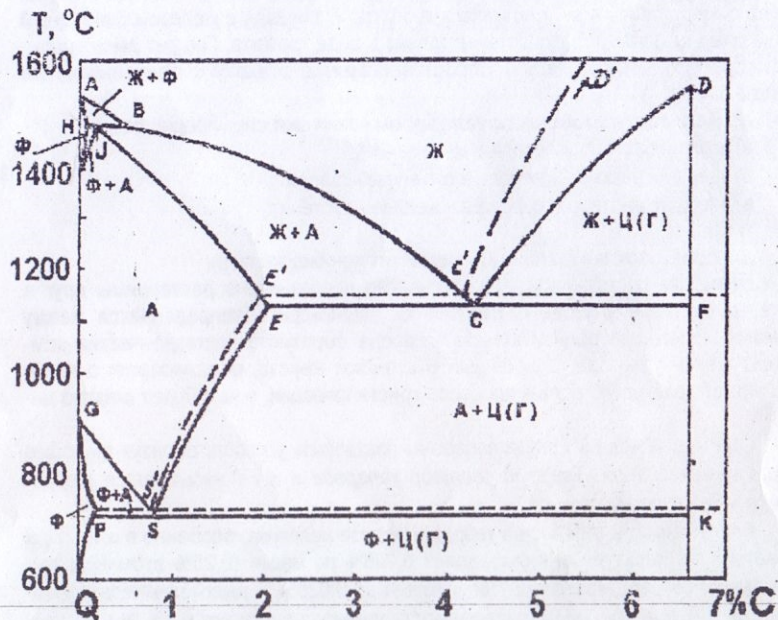


Рисунок 1 - Диаграмма состояния системы "железо-углерод"

Диаграмма состояния "железо-углерод" имеет две разновидности: стабильная (система "железо-графит") и метастабильная (система "железо-цементит"). Обычно обе системы совмещаются на одной диаграмме, только линии фазовых переходов Fe - Fe_3C проводятся сплошными, а для Fe-графит - штриховыми линиями, и характерные точки обозначаются буквами со штрихом (рисунок 1).

Роль системы Fe - Fe_3C значительно больше, так как она описывает строение сталей и белых чугунов, а по системе Fe-графит формируется структура лишь серых чугунов. Поэтому анализ начнем с системы Fe - Fe_3C .

На оси ординат (рисунок 1) отложены критические точки железа:

A - температура плавления - 1539°;

N - температура полиморфного превращения высокотемпературного α -железа в γ -железо - 1392°;

G - температура полиморфного превращения γ -железа в низкотемпературное α -железо - 911°.

Ликвидус системы ABCD состоит из трех участков:

AB - линия начала кристаллизации высокотемпературного феррита;

BC - линия начала кристаллизации аустенита;

CD - линия начала кристаллизации цементита.

Линии солидус однофазных областей: AH показывает конец кристаллизации феррита, JE - конец кристаллизации аустенита.

Кристаллизация жидких растворов углерода в железе в определенных интервалах концентрации сопровождается двумя невариантными реакциями: перитектической на линии HJB (рисунок 2), связанной с высокотемпературным полиморфным превращением железа



и эвтектической на линии ECF

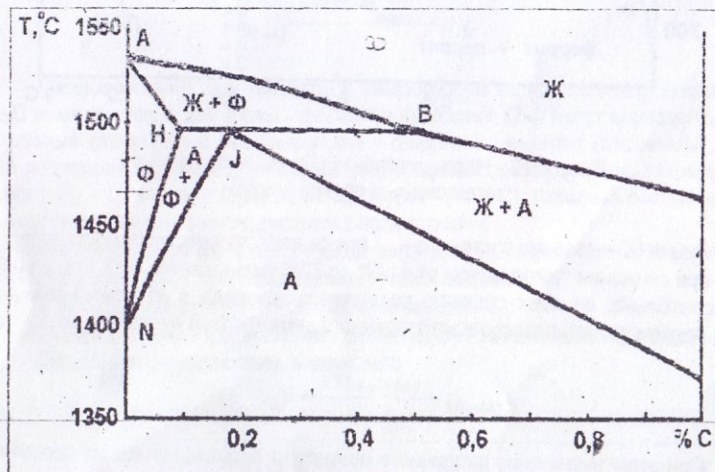
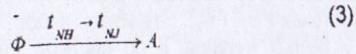


Рисунок 2 - Левый верхний угол диаграммы Fe - C

В малоуглеродистых сплавах (левее точки J) после завершения первичной кристаллизации (левее точки H) или перитектической реакции (в интервале HJ) происходит полиморфное превращение твердого раствора углерода в железе (рисунок 2)



Полиморфное превращение в чистом железе протекает при постоянной температуре, так как двухфазное равновесие (αFe и γFe) в однокомпонентной системе в соответствии с правилом фаз Гиббса невариантно, т.е. не имеет степени свободы. В присутствии углерода, т.е. в двухкомпонентной системе, полиморфное превращение (3) имеет одну степень свободы и протекает в интервале температур: начало превращения - на линиях NH и HJ, конец на линии NJ.

Таким образом, после завершения кристаллизации жидкости и высокотемпературного полиморфного превращения сплавы имеют однофазную структуру аустенита (левее точки E) или эвтектическую структуру с первичными кристаллами аустенита (сплавы участка EC) или цементита (сплавы участка CF).

Дальнейшие фазовые переходы в сплавах при охлаждении связаны с переменной растворимостью углерода в железе и его низкотемпературным полиморфным превращением (рисунок 3).

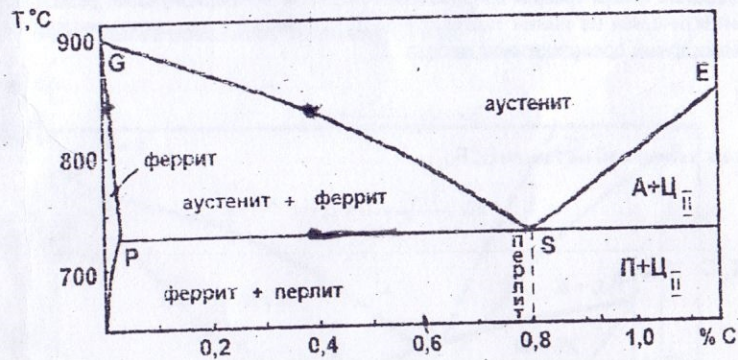
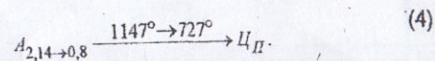


Рисунок 3 - Часть диаграммы Fe - C, связанная с эвтектоидным превращением

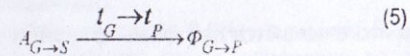
Линия SE - сольвус аустенита - показывает, что растворимость углерода в γFe при снижении температуры от 1147° до 727° уменьшается от 2,14% до 0,8%. Следовательно, во всех сплавах, содержание углерода в которых превышает 0,8%, происходит кристаллизация вторичного цементита из аустенита по реакции



При этом выделение вторичного цементита происходит как из первичного аустенита (в сплавах от 0,8% до 4,3%), так и из аустенита, входящего в состав

эвтектики (в сплавах от 2,14% до 6,67% C), и к моменту достижения температуры 727° во всех сплавах правее точки S содержится аустенит, в котором растворено 0,8% углерода.

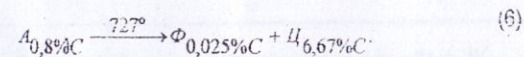
В чистом железе низкотемпературное полиморфное превращение происходит при температуре 911° . Превращение же аустенита в феррит протекает в интервале температур от линии GS до линии GP (в сплавах левее точки P) или PS (в сплавах участка PS) по реакции



При этом превращении кристаллизующийся феррит почти не содержит углерода, а остающийся аустенит обогащается углеродом, что легко установить по правилу коноды, и к моменту достижения температуры 727° во всех сплавах участка PS кроме феррита остается аустенит, в котором растворено 0,8% C.

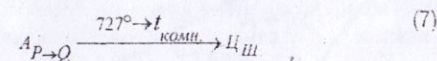
Таким образом, во всех сплавах, содержащих углерода более 0,025% при температуре 727° имеется аустенит, содержащий 0,8% C; в сплавах левее точки S он образовался в результате полиморфного превращения железа с выделением феррита и обогащением углеродом остающегося аустенита, а в сплавах правее точки S - в результате кристаллизации вторичного цементита и обеднения углеродом остающегося аустенита.

При температуре 727° этот аустенит распадается по эвтектоидной (подобной эвтектической) реакции на смесь двух фаз - феррита и цементита



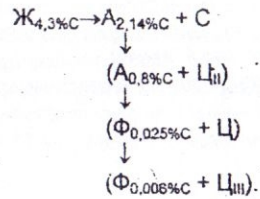
Эвтектоидная смесь феррита и цементита называется перлитом (П).

И, наконец, ниже 727° из феррита в соответствии с линией сольвус PQ кристаллизуется третичный цементит по реакции



Следовательно, при комнатной температуре во всех сплавах системы Fe - Fe₃C имеются лишь две фазы - феррит и цементит. Они могут образовывать как однофазные структурные составляющие - феррит и цементит (первичный, вторичный и третичный), так и двухфазные структурные составляющие: эвтектоидную - перлит ($\Phi + C$) и эвтектическую - ледебурит ($\Phi + C$). Фазовый состав эвтектики хорошо выявляется при следующем рассмотрении:

- ♦ - непосредственно из эвтектической жидкости кристаллизуется твердая эвтектика ледебурит (Л), представляющая собой смесь A + C;
 - ♦ - при охлаждении из аустенита кристаллизуется C_{II};
 - ♦ - обедненный до 0,8% C аустенит претерпевает эвтектоидный распад A → $\Phi + C$.
- Объединяя в одну схему, видим, что



То есть в конечном итоге остаются две фазы: феррит и цементит.

4 Классификация сплавов Fe - C

Сплавы железа с углеродом разделяются на три группы:

- техническое железо;
- сталь;
- чугун.

Классификация основана на структуре сплавов. Техническим железом называются сплавы, содержащие углерод менее его предельной растворимости в α -железе, т.е. менее 0,025% (точка P диаграммы Fe - Fe₃C). В их структуре имеется только феррит (если содержание углерода менее 0,006%) или феррит с небольшим количеством третичного цементита (при содержании углерода более 0,006%, но менее 0,025%).

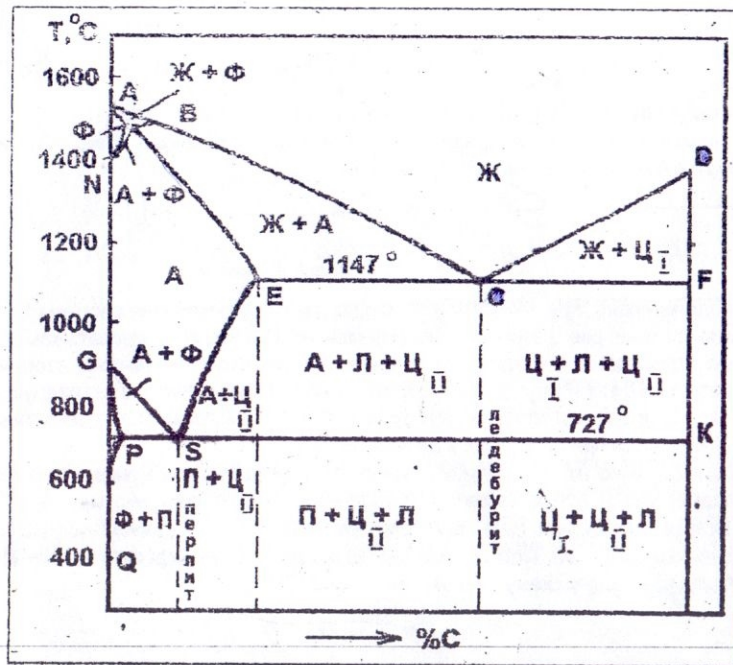


Рисунок 4 - Структурная диаграмма системы "железо-цементит"

На рисунке 4 представлена структурная диаграмма системы "железо-цементит". В сталях содержание углерода больше его предельной растворимости в α -железе, но меньше предельной растворимости в γ -железе (от 0,25% - точка P, до 2,14% - точка E). Выше линий GS и SE стали однофазные - в их структуре лишь одна составляющая - аустенит. При охлаждении в сталях, содержащих углерод менее 0,8% (точка S), на линии GS начинается полиморфное превращение железа, а затем - эвтектоидное превращение оставшегося аустенита. Эти стали называются *доэвтектоидными*.

В высокоуглеродистых сталях (> 0,8%) на линии SE начинается выделение вторичного цементита из аустенита, после завершения которого протекает эвтектоидное превращение. Эти стали называются *заэвтектоидными*.

Сталь, содержащая 0,8%, называется *эвтектоидной*.

Таким образом, структурным признаком стали служит наличие эвтектоидной составляющей - перлита:

- в доэвтектоидной - вместе с ферритом;
- в эвтектоидной - других составляющих, кроме перлита, нет;
- в заэвтектоидной - вместе со вторичным цементитом.

Чугунами называются высокоуглеродистые сплавы, содержание углерода в которых больше его растворимости в γ -железе (точка E). Структурный признак чугунов - наличие эвтектической составляющей - ледебурита. Такие чугуны называются *белыми*.

5 Стабильная диаграмма состояния системы "железо-графит" и серые чугуны

Образ диаграммы *железо-графит* практически мало отличается от образа диаграммы *железо-цементит*.

Различия заключаются в следующем:

- ликвидус графита C'D' идет круче ликвидуса цементита CD ;
- эвтектическая реакция $\text{Ж}_C \rightarrow \text{A} + \text{Г}$ имеет место при температуре 1153°, образующаяся при этом смесь двух фаз называется графитной эвтектикой;
- предельная растворимость графита в γ -железе несколько меньше - 2,03% (точка E);
- распад аустенита на эвтектоидную смесь графита и феррита происходит при 738°, и эвтектоидная точка соответствует содержанию 0,69% C.

Высокоуглеродистые сплавы, содержащие в структуре элементарный графит, называются *серыми чугунами*.

Другие фазовые превращения в системе "железо-графит" аналогичны соответствующим превращениям в системе "железо-цементит".

6 Фазы и структурные составляющие сплавов Fe - C

Как показано при анализе диаграммы состояния системы "железо-углерод", при комнатной температуре в сплавах могут присутствовать лишь три фазы: феррит, цементит и графит. Взаимодействие этих фаз определяет все многообразие структуры сплавов разного состава. В них могут присутствовать как однофазные, так и двухфазные структурные составляющие, отличающиеся друг от друга механическими свойствами (таблица 1, рисунок 5).

Таблица 1 - Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов

Структурная составляющая	Фазовый состав	Содержание углерода, %	Сплавы, в которых присутствует составляющая
Феррит	100%Ф	До 0,006	Техническое железо, доэвтектоидные стали, ферритные и феррито-перлитные серые чугуны
Цементит	100%Ц	6,67	Заэвтектоидные стали, белые чугуны
Графит	100%Г	100	Серые чугуны
Перлит	12%Ц 88%Ф	0,8	Стали, белые и серые (кроме ферритного) чугуны
Ледебурит	64,5%Ц 35,5%Ф	4,3	Белые чугуны
Графитная эвтектика	4,26%Г 95,74%Ф	4,26	Серые чугуны

В связи с этим наличие и количество тех или иных структурных составляющих в железо-углеродистых сплавах определяют их свойства.

Рассмотрим отдельные структурные составляющие.

Феррит - практически чистое α - железо, имеет зернистое строение [2].

При травлении 5%-м спиртовым раствором азотной кислоты в целом это светлая структурная составляющая.

Отдельные зерна вследствие анизотропии могут быть несколько темнее. В равновесном состоянии зерна феррита имеют равноосную, близкую к полиэдрической, форму.

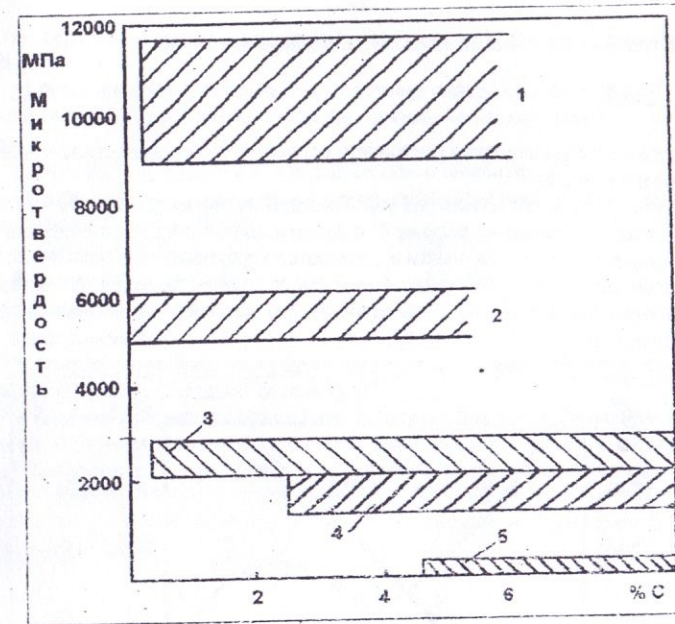
Цементит - очень светлая блестящая структурная составляющая. Форма кристаллов цементита зависит от их происхождения: первичный цементит из жидкого раствора кристаллизуется в виде вытянутых хорошо огранных кристаллов, подобно кристаллам каменной соли [2], и на шлифе имеет форму длинных пластин.

Вторичный цементит, выделяющийся из аустенита согласно линии SE, кристаллизуется чаще всего на готовых поверхностях раздела, то есть по границам бывших зерен аустенита. После эвтектоидного распада аустенита вторичный цементит оказывается на границах перлитных колоний, образуя цементитную сетку. В крупных зернах аустенита вторичный цементит может выделиться и внутри зерна, так как диффузионный путь атомов углерода от центра зерна аустенита до его границ оказывается очень большим. В этом случае при комнатной температуре внутри перлитной колонии кристаллы вторичного цементита имеют игольчатую форму.

Третичный цементит выявляется очень редко, только в техническом железе в виде тонких пластин, выделившихся на границе зерен феррита.

Графит в связи с низкой твердостью и хрупкостью в процессе изготовления шлифа выкрашивается, и на нетравленной поверхности серых чугунов наблюдаются ямки, оставшиеся на месте бывших выделений графита.

Ледебурит непосредственно после кристаллизации представляет собой эвтектическую смесь аустенита и цементита. Но после выделения вторичного



- 1 - цементит;
2 - ледебурит;
3 - перлит;
4 - графитная эвтектика;
5 - графит [3]

Рисунок 5 - Микротвердость отдельных структурных составляющих железоуглеродистых сплавов

цементита из аустенита и эвтектоидного распада аустенита он состоит из цементита эвтектики (1), вторичного цементита (2) и перлита (3) и при комнатной температуре имеет зернистое строение.

Графитная эвтектика - смесь графита и металлической основы, в которой хорошо видны тонкие ветви дендритов графита.

Перлит - эвтектоидная смесь феррита и цементита, состоящая из сплетенных дендритов этих фаз. На шлифе в сталях, не прошедших термическую обработку, имеет пластинчатое строение. Каждая перлитная колония представляет собой смесь чередующихся пластинок цементита и феррита. Такой перлит называется **пластинчатым**.

Ввиду чрезвычайно тонкого строения пластин и развитости межфазовых границ перлит при небольших увеличениях выглядит темной структурной составляющей (хотя и феррит и цементит в отдельности светлые фазы).

6.1 Строение и свойства железоуглеродных сплавов

6.1.1 Стали

Как следует из диаграммы состояния, основной структурной составляющей сталей является перлит.

В горячекатаном состоянии без упрочняющей термической обработки свойства стали изменяются как на рисунке 6: с увеличением содержания углерода повышаются характеристики прочности и снижаются характеристики пластичности.

В литом состоянии, когда сталь имеет более грубую структуру, свойства ее ниже, особенно характеристики пластичности, но характер изменения свойств остается таким же.

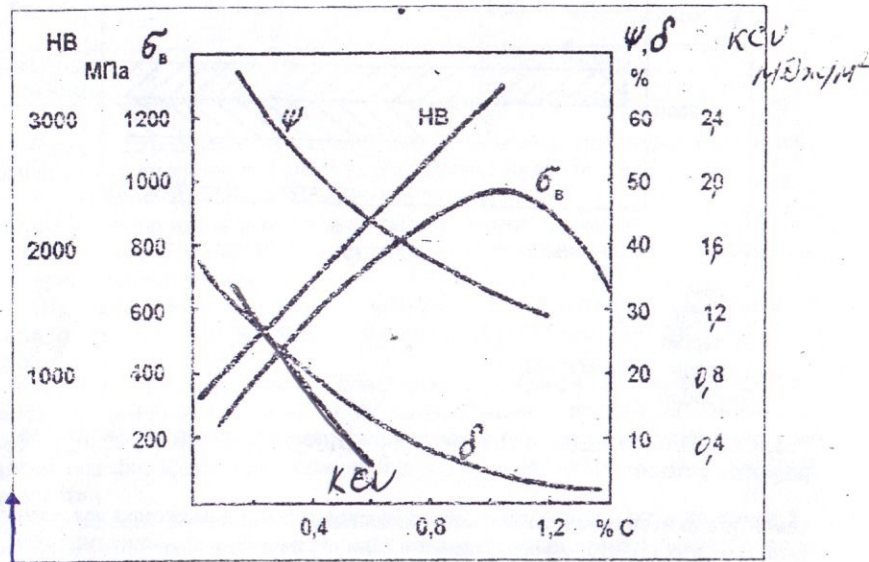


Рисунок 6 - Влияние содержания углерода на свойства стали

6.1.2 Чугуны

Особенности строения чугунов определяются двумя факторами.

Во первых, степенью графитизации, т.е. тем, насколько полно углерод выделился в свободном состоянии. От степени графитизации зависит структура металлической основы.

Во-вторых, формой выделения графита.

В зависимости от степени графитизации чугуны могут быть:

- а) ферритными (весь углерод выделился в виде графита);
- б) феррито-перлитными (часть углерода, а именно более 0,01%, но менее 0,8% связана в цементит);
- в) перлитными (количество связанного углерода около 0,8%);

г) перлито-цементитными (связанного углерода более 0,8%, но менее 2,14%);

д) половинчатыми, в которых содержание связанного в цементит углерода более 2,14%, поэтому в их структуре одновременно присутствуют и ледебурит и графит;

е) белыми, в которых весь углерод связан в цементит.

Степень графитизации и строение металлической основы серых чугунов определяет их твердость:

- а) ферритный чугун НВ 150;
- б) феррито-перлитный НВ 200;
- в) перлитный НВ 250;
- г) половинчатый до НВ 400,

т.е. чем больше связанного углерода в чугуне, тем больше его твердость. Самой высокой твердостью обладают белые чугуны.

Включения графита в связи с низкой прочностью и пластичностью подобны пустотам, и серый чугун можно в первом приближении рассматривать как сталь со структурой металлической основы, содержащую большое количество пор и трещин. Поскольку мягкие и хрупкие частицы графита не сопротивляются внешним нагрузкам, около каждого включения при нагружении чугуна происходит концентрация напряжения

$$\sigma_k = \sigma_n \left(1 + \sqrt{\frac{l}{r}}\right), \quad (6)$$

где σ_n - внешнее номинальное напряжение;

l - полудлина включения, ориентированного нормально действующим напряжением;

r - радиус кривизны у края пластины графита.

Чем более вытянуты пластины графита, тем больше концентрация напряжений, и тем ниже допустимые напряжения на чугун в целом. В связи с этим серые чугуны имеют очень низкую прочность и пластичность и не могут работать на растяжение: чугун марки СЧ 12 имеет при растяжении $\sigma_b = 120$ МПа, при изгибе $\sigma_b = 280$ МПа, $\delta = 0,2-0,5\%$.

Повысить прочность чугуна можно, если частицам графита придать форму, близкую к округлой. Это достигается путем модифицирования чугуна перед разливкой, введением магния или церия (шаровидный графит) или отжигом белого чугуна на ковкий (хлопьевидный графит).

Таблица 2 - Механические свойства чугуна

Класс чугуна	Марка	Механические свойства			
		МПа	МПа	Относительное удлинение	Твердость НВ, МПа
1	2	3	4	5	6
Серый литейный	СЧ 15	150	320	0,5	1630-2290
	СЧ 32	320	520	0,2	1870-2550
	СЧ 38	380	600	0,2	2070-2690

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6
Модифицированный высокопрочный	ВЧ 40	400		10	1560-1970
	ВЧ 50	500			
	ВЧ 60	600			
Ковкий	КЧ 45-6	450		6	2410
	КЧ 56-4	560		4	2690
	КЧ 63-2	630		2	2690

7 Задание и порядок выполнения работы

7.1 Постройте кривые нагрева и охлаждения железа с обозначением всех превращений.

7.2 Проанализируйте формирование структуры с построением кривых охлаждения и обозначением реакций всех фазовых переходов, начиная от жидкого состояния, для следующих сплавов:

- дозвтектоидная сталь;
- эвтектоидная сталь;
- заэвтектоидная сталь;
- доэвтектрический чугун;
- эвтектический чугун.

7.3 Проведите сравнительный анализ фазовых превращений в заэвтектическом чугуне для случаев в соответствии с системами "железо-цементит" и "железо-графит".

7.4 Просмотреть структуры образцов сталей и чугунов (на готовых шлифах) в связи с диаграммой состояния Fe-C.

7.5 Определить принадлежность каждого образца к классу сплавов к чугунам или сталям.

7.6 Зарисовать структуры всех образцов, указав на рисунках фазы и структурные составляющие.

7.7 Классифицировать стали и чугуны по структуре.

7.8 Определить состав дозвтектоидной стали.

7.9 Оценить прочность серых чугунов.

8 Отчет по работе

Отчет должен содержать:

- а) цель работы;
- б) диаграмму состояния системы Fe-C с обозначением фазовых областей;
- в) зарисовку структуры всех образцов;
- г) расчет химического состава дозвтектоидной стали точечным методом;
- д) кривые охлаждения исследованных сплавов с анализом фазовых превращений и формирования структуры.

9 Контрольные вопросы

1. Почему растворимость углерода в γ -железе больше, чем в α -железе?
2. Что общего и какие различия между ферритом и аустенитом?