

*Кафедра Общетехнических дисциплин,
теории и методики профессионального
образования*

**Курс «Технология
конструкционных
материалов»**

ЛЕКЦИЯ 3. СТАЛИ И ЧУГУНЫ

Учебные вопросы:

- 1. Диаграмма состояния «железо–цементит». Формирование равновесной структуры углеродистых сталей
- 2. Зависимость механических свойств железоуглеродистых сплавов от содержания углерода
- 3. Классификация и маркировка углеродистых сталей
- 4. Структура и свойства чугунов

1. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ «ЖЕЛЕЗО–ЦЕМЕНТИТ». ФОРМИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

- При сплавлении железа с углеродом (С) образуется *карбид железа Fe_3C* , называемый *цементитом*, он содержит 6,67 % С.
- Промышленные сплавы железа с углеродом содержат до ≈ 4 % С, поэтому их структуру изучают с помощью *диаграммы состояния «Железо–цементит» (Fe–Ц)*, т.е. компонентами данной системы являются Fe и Fe_3C (рис. 2.1.1).
- На этом рисунке обозначены *фазы* во всех областях диаграммы, а под рисунком указаны *структуры* сплавов с различным содержанием углерода при нормальных температурах.

Продолжение 1 вопроса

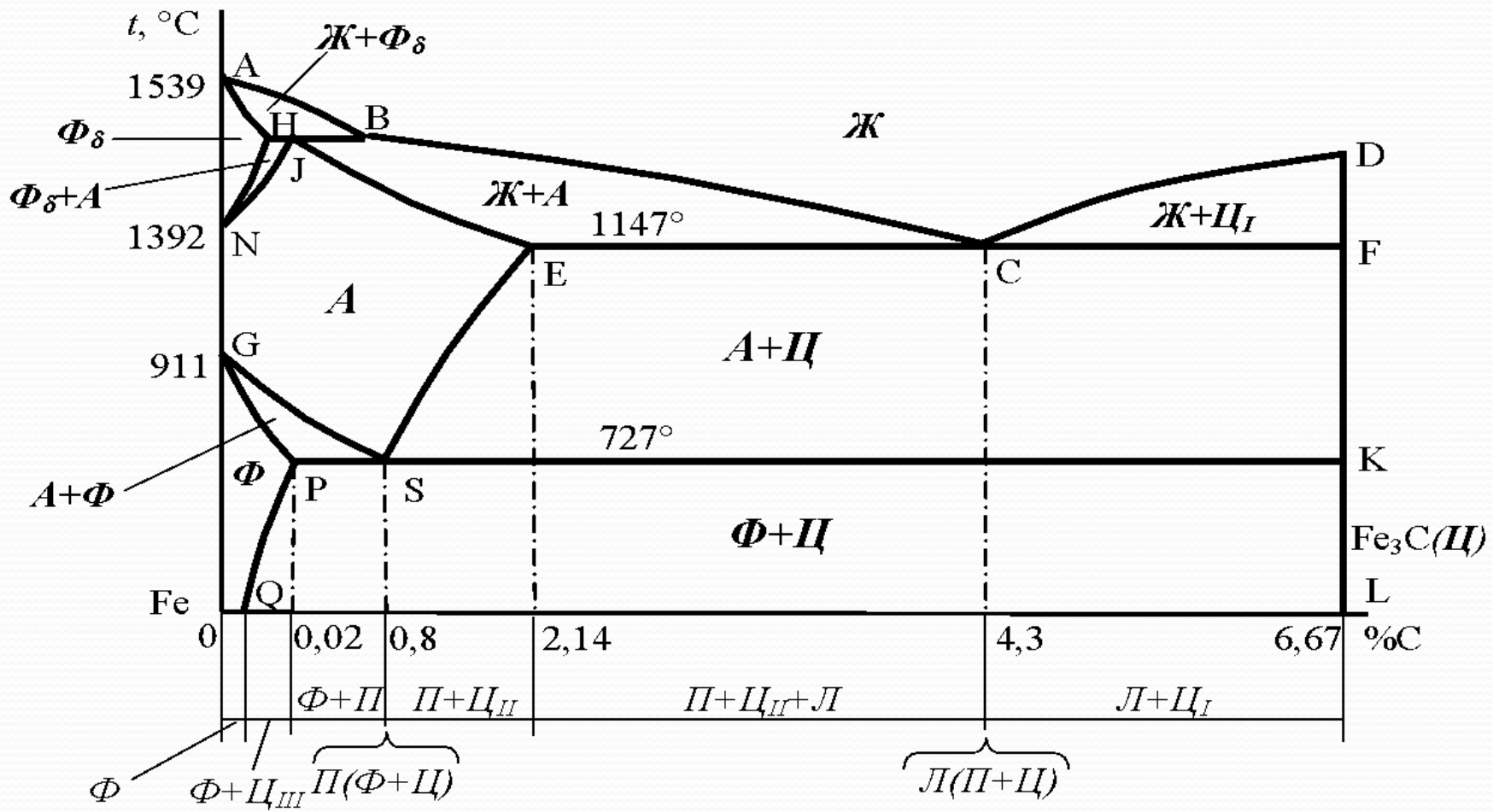


Рис. 2.1.1. Диаграмма состояния «Железо-цементит»: внизу под диаграммой – обозначения структур сплавов с различным содержанием углерода при нормальных температурах

Продолжение 1 вопроса

На диаграммах состояния верхняя система линий (в данном случае ABCD) называется линией **ликвидус** (лат. – жидкий), выше нее любой сплав находится в жидком состоянии.

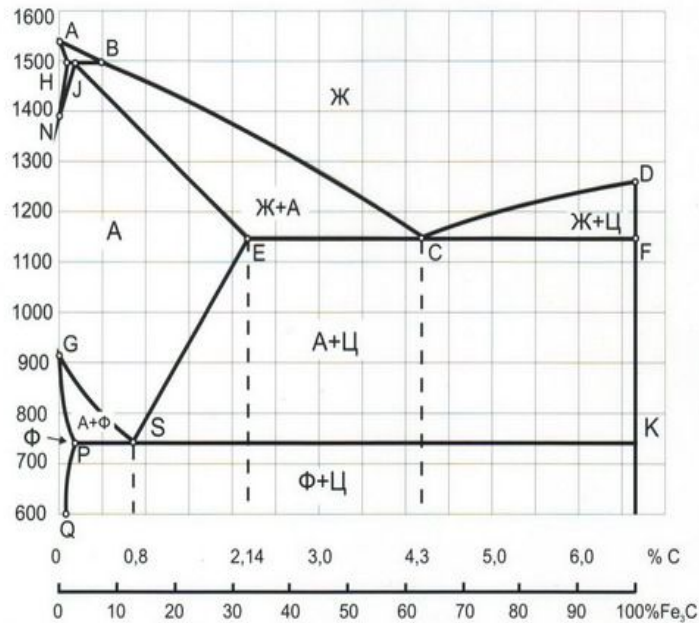
Система линий диаграммы непосредственно под ликвидусом (в данном случае ANJESF) называется линией **солидус** (лат. – твердый), ниже нее любой сплав – в твердом состоянии.

В системе Fe-Fe₃C существуют **три твердые** (кристаллические) **фазы**: **цементит** – химическое соединение (на диаграмме его однофазная «область» - линия – DFKL) и твердые растворы C в Fe – **аустенит** (область GNJES) и **феррит** (OGPQ).

Соответственно при сплавлении железа с углеродом образуются два твердых раствора внедрения C в Fe: **феррит (Ф)** – раствор C в α-Fe и **аустенит (А)** – раствор C в γ-Fe.

Продолжение 1 вопроса

Диаграмма состояний железо-цементит



Перитектическое превращение - (линия HJB) - 1499°C;
Эвтектическое превращение - (линия ECF) - 1147°C;
Эвтектоидное превращение - (линия PSK) - 727°C;

Из диаграммы Fe–Ц видно, что окончательная структура (при нормальных температурах) практически всех сплавов (правее т. Q, т.е. $>0,01\% \text{C}$) формируется из двух фаз: Ф и Ц.

Феррит – твердый раствор на основе $\alpha\text{-Fe}$, содержащий $< 0,02\% \text{C}$, очень мягкая (твердость $\text{HV} \leq 800$) и пластичная (относительное удлинение $\delta \geq 30\%$) фаза.

Цементит – карбид железа, напротив, очень тверд ($\text{HV} \approx 8000$) и хрупок ($\delta \approx 0\%$). Такие характеристики Ф и Ц обуславливают существенную зависимость механических свойств железоуглеродистых сплавов от содержания С. Всюду в данном пособии твердость по Бринеллю (HV) дается в МПа.

Продолжение 1 вопроса

Как ранее отмечалось, свойства сплавов зависят не только от фазового состава, но и от конкретной структуры сплавов. Чтобы установить структуру сплава, нужно проследить, какие превращения происходят в нем при медленном охлаждении из жидкого состояния до комнатной температуры.

Рассмотрим этот процесс на примере **сталей** – сплавов с содержанием углерода от 0,02 до 2,14 % С.

На примере стали, содержащей 0,8 %С (т. S), видно, что превращение, происходящее при $T \leq 727 \text{ }^\circ\text{C}$, заключается в распаде аустенита на смесь феррита и цементита:



где индексы S и P показывают содержание С в аустените и феррите соответственно (в цементите оно не указывается, т.к. при любой температуре равно 6,67 %С).

Такое превращение, когда при постоянной температуре из одной твердой фазы образуются две другие (при фиксированных составах фаз) называется **эвтектоидным**.

Продолжение 1 вопроса

Структурная диаграмма состояний железо-цементит



В железоуглеродистых сплавах эвтектоидное превращение (2.1) называется **перлитным**, поскольку в результате него образуется **перлит** - чередующаяся смесь тонких кристаллов (пластинок) феррита и цементита – структура, напоминающая перламутровый (жемчужный) узор раковин.

Продолжение 1 вопроса

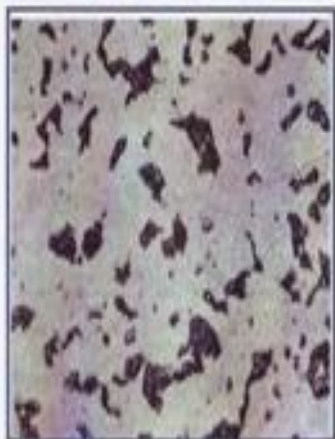
Таким образом, **основной структурной составляющей углеродистых сталей в равновесном состоянии является перлит** (см. рис. 2.1.2). *Эвтектоидная сталь содержит одну структурную составляющую (П), все остальные стали по две: доэвтектоидные П + Ф, заэвтектоидные П + Ц_{III}.*

В сплавах, содержащих $< 0,02\% \text{C}$ (левее т. Р, см. рис. 2.1.1), перлит в структуре отсутствует, т.к. в процессе охлаждения они не пересекают линию перлитного превращения (PSK). Эти сплавы называются **техническим железом** в отличие от химически чистого Fe, представленного на диаграмме Fe – C вертикалью ANG0). *Структура технического Fe – феррит* (хотя в сплавах, содержащих $0,01 \dots 0,02\% \text{C}$ присутствует небольшое количество третичного цементита – Ц_{III}).

Продолжение 1 вопроса

МИКРОСТРУКТУРЫ ДОЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ

Светлые зерна - ферритные, темные зерна пластинчатый перлит



Сталь 10



Сталь 20



Сталь 30



Сталь 40



Сталь 60

Продолжение 1 вопроса

МИКРОСТРУКТУРЫ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ



Сталь У8

Пластинчатый перлит



Сталь У12

Пластинчатый перлит
и цементитная сетка

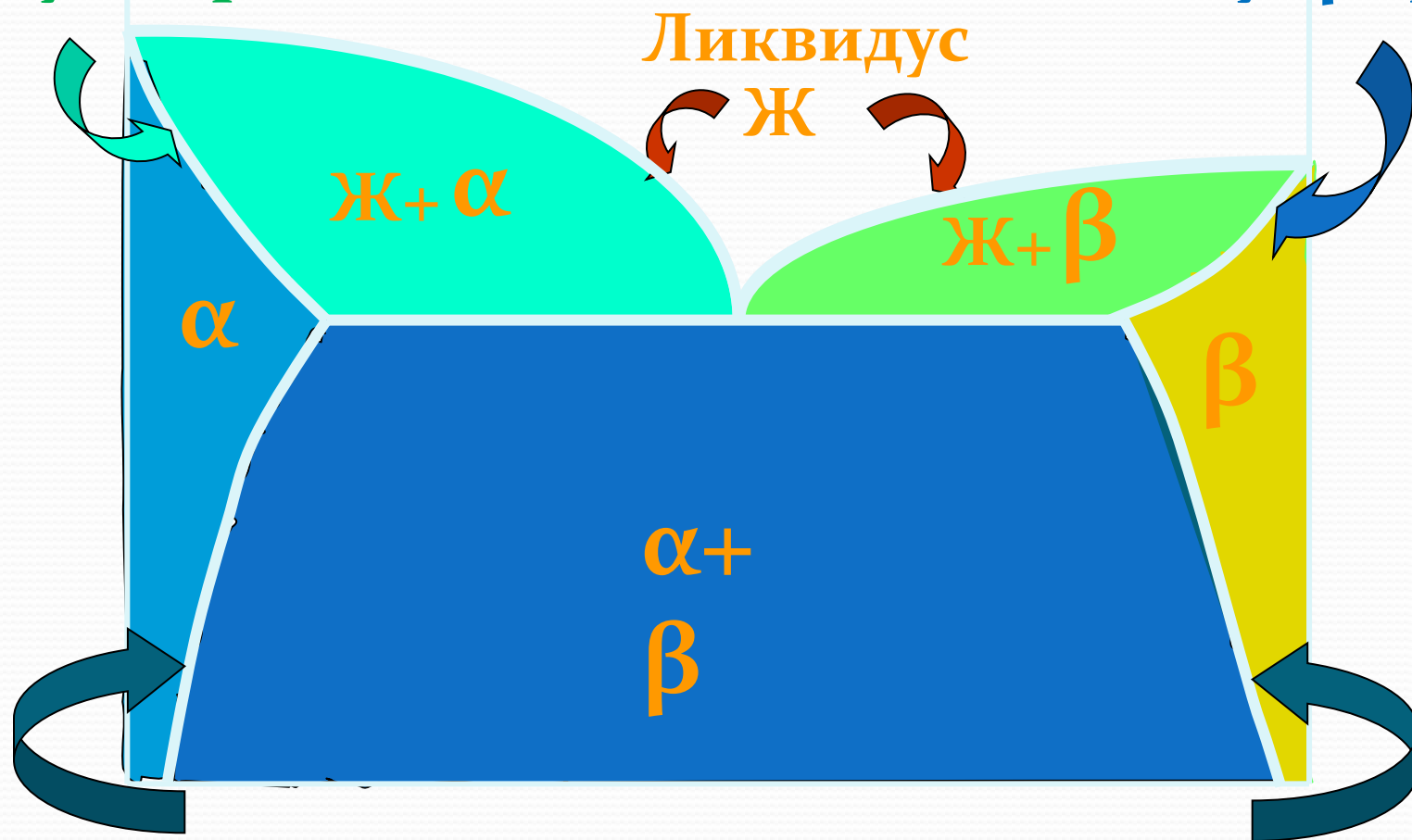


Зернистый перлит

Диаграмма состояния эвтектического типа

Солидус α -фазы

Солидус β -фазы



Ликвидус
 $Ж$

$Ж + \alpha$

$Ж + \beta$

α

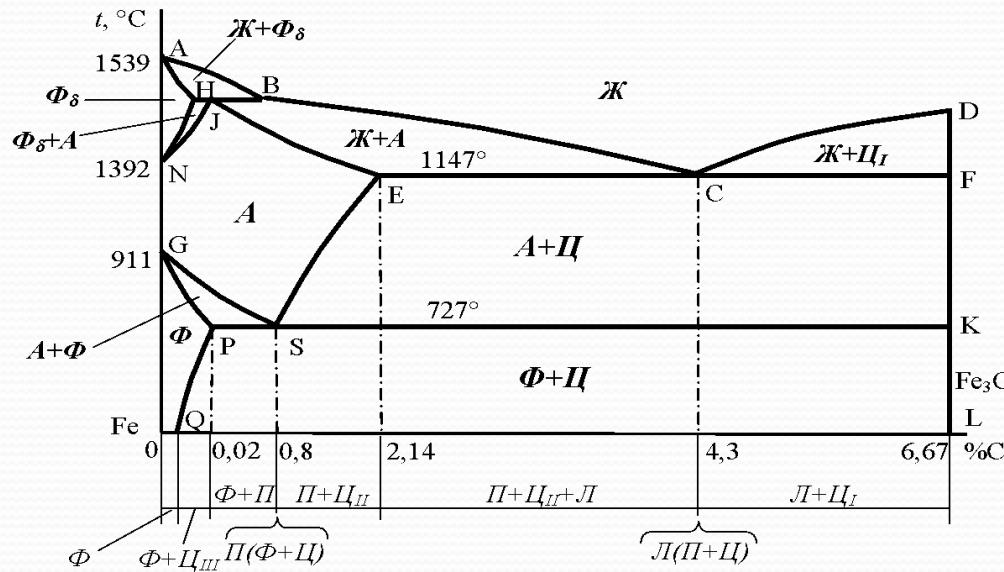
β

$\alpha + \beta$

Сольвус α -фазы

Сольвус β -фазы

2. ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА



Из диаграммы Fe–Ц следует, что структуры практически всех ($>0,01\%$ C) сплавов при нормальных температурах формируются из двух фаз – феррита (Ф) и цементита (Ц).

Очевидно, что с увеличением содержания углерода в структуре сплавов возрастает количество твердого и хрупкого Ц и уменьшается количество мягкого, пластичного Ф. Твердые частицы Ц повышают сопротивление сплава пластической деформации.

Продолжение 2 вопроса

Поэтому с увеличением содержания углерода растут твердость (НВ) и прочность (σ_B) сплавов, падают их пластичность (δ , ψ) и ударная вязкость (КСУ) – рис. 2.1.3.

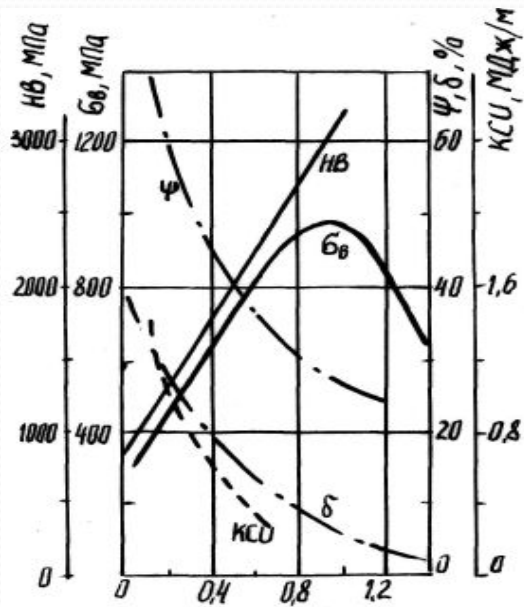


Рис. 2.1.3. Зависимость механических свойств углеродистых сталей в равновесном состоянии от содержания углерода

Очевидно, что с увеличением содержания углерода в структуре сплавов возрастает количество твердого и хрупкого Ц и уменьшается количество мягкого, пластичного Ф . Твердые частицы Ц повышают сопротивление сплава пластической деформации.

Продолжение 2 вопроса

Поэтому с увеличением содержания углерода растут твердость (НВ) и прочность (σ_b) сплавов, падают их пластичность (δ , ψ) и ударная вязкость (КСУ) – рис. 2.1.3.

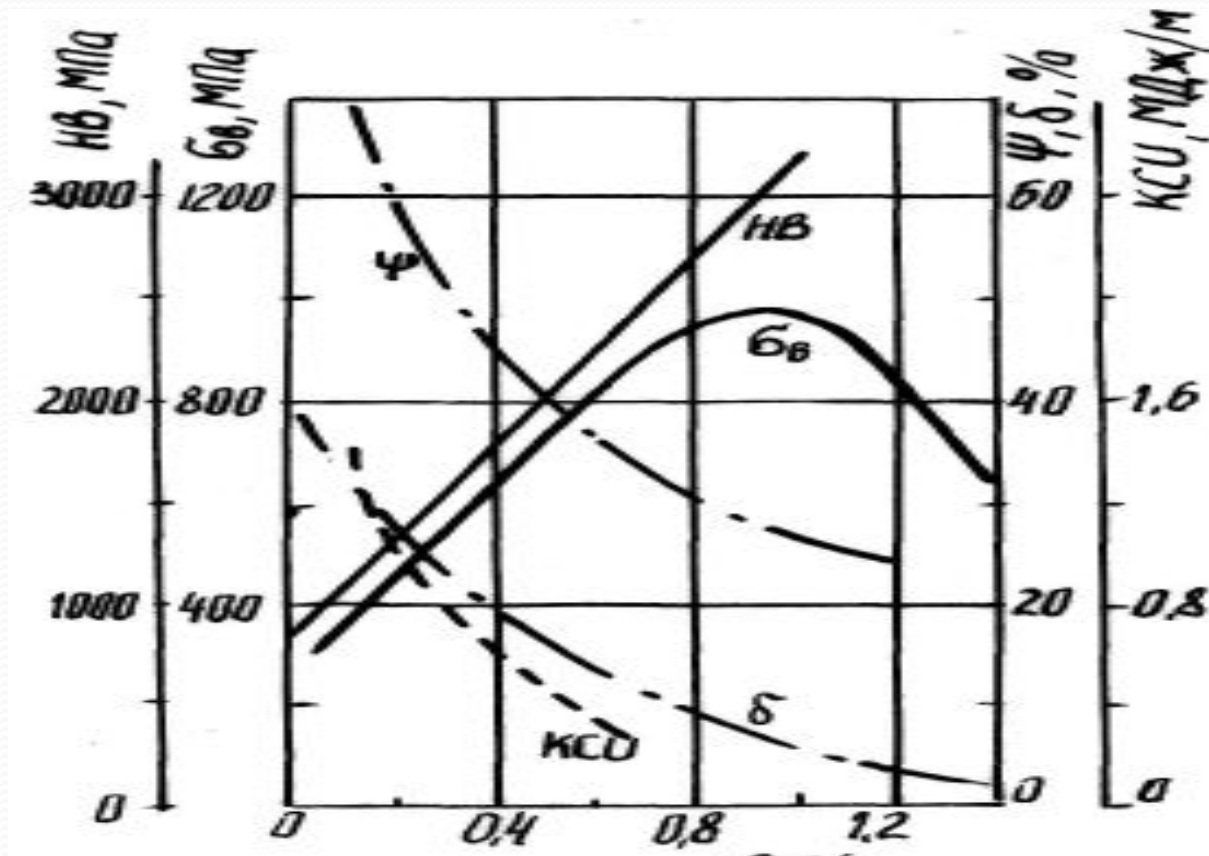


Рис. 2.1.3. Зависимость механических свойств углеродистых сталей в равновесном состоянии от содержания углерода

1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Классификация углеродистых сталей по равновесной структуре, это: доэвтектоидные стали (структура $\Phi + \Pi$), эвтектоидные (Π) и заэвтектоидные ($\Pi + \text{Ц}_{\text{III}}$).

Однако для потребителя более важной является классификация по назначению, поскольку она определяет возможность использования той или иной стали для конкретных изделий. Основой такой классификации является зависимость механических свойств сталей от содержания углерода, показанная на рис. 2.1.3.

Видно, что достоинством сталей с большим содержанием углерода ($\geq 0,7\% \text{C}$) является высокая твердость, поэтому такие стали относятся к группе инструментальных (т.к. основное требование для большинства видов инструмента – именно высокая твердость). Маркировка этих сталей $\text{У7, У8, У10, \dots, У13}$ (ГОСТ 1435–90), где цифры показывают содержание углерода в десятых долях %.

Продолжение 3 вопроса

Конструкционные стали используют для разнообразных по назначению изделий, работающих при сложных, в том числе, динамических нагрузках. Такие стали должны обладать оптимальным сочетанием прочности и ударной вязкости, поэтому, в основном, это мало – и среднеуглеродистые стали¹. Они подразделяются на **стали обыкновенного качества** общего назначения (марки Ст0, Ст1, Ст2, ..., Ст6 ГОСТ 380–94) и **качественные конструкционные стали** (марки 08, 10, 15, 20, 25, ..., 40, 45, ... 85 ГОСТ 1050–88).

Содержание углерода в сталях обыкновенного качества изменяется от $\approx 0,1\%$ до $0,5\%$ и в среднем возрастает с увеличением цифры в марке (соответственно изменяются свойства согласно рис. 2.1.3). Из этих сталей обычно изготавливают малонагруженные изделия, не подвергаемые упрочняющей термической обработке.

Продолжение 3 вопроса

В марках качественных конструкционных сталей цифры показывают содержание углерода в сотых долях % (например, в стали 45...0,45 %С). Эти стали применяют для ответственных изделий, которые для получения оптимальных механических свойств подвергаются упрочняющей термической обработке, состоящей из закалки и отпуска ¹

К конструкционным относят так же стали с высоким содержанием углерода (0,6...0,85 %С). Эти стали (марки 60, 65, 70, 75, 80, 85) применяют главным образом в качестве рессорно-пружинных, а также для деталей с повышенными требованиями по прочности, упругости и износостойкости (шпиндели, эксцентрики, диски сцепления, прокатные валки и др.)

1.4. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНОВ

Сплавы, содержащие $> 2,14 \%C$ (правее т. E на диаграмме «Железо-цементит»), называются чугунами.

Чугуны, кристаллизующиеся в соответствии с диаграммой Fe-Ц, называются **белыми** (из-за светлого оттенка излома, обусловленного большим количеством цементита в структуре). Из диаграммы Fe-Ц следует, что затвердевание этих сплавов происходит при $T \leq 1147 \text{ }^\circ\text{C}$ непосредственно ниже линии *солидус* ECF в результате превращения



Такое превращение (затвердевание жидкой фазы в смесь двух твердых при фиксированном составе фаз и постоянной температуре) **называется эвтектическим¹**, а **образующаяся смесь кристаллов – эвтектикой** (греч. – «легко плавящаяся» – из диаграммы Fe-Ц видно, что чугуны имеют наименьшую температуру плавления среди железоуглеродистых сплавов).

Продолжение 4 вопроса

Эвтектика в белых чугунах называется **ледебуритом** (по фамилии исследователя – Ледебура). В момент образования (см. (2.3)) она состоит из аустенита и цементита, но при $T \leq 727 \text{ }^\circ\text{C}$ аустенит превращается в перлит (напомним, что PSK – линия эвтектоидного – перлитного превращения, см. (2.1)). Поэтому *при нормальных температурах* **ледебурит** (Л) – сложная структурная составляющая; представляет собой светлую цементитную основу с темными включениями перлитных зерен. *По структуре белые чугуны делятся на доэвтектические* (2,14...4,3 %C) *со структурой* **Л+П+Ц_{III}**, *эвтектические* (4,3 %C) – **Л** *и заэвтектические* (4,3...6,67 %C) – **Л+Ц_{III}**.

Белые чугуны обладают очень высокой твердостью, но низкими значениями пластичности, ударной вязкости и прочности, что является следствием большого количества цементита в структуре (о свойствах Ц – в разделе 2.1.1). Поэтому *белые чугуны как конструкционные материалы не используются.*

Продолжение 4 вопроса

На практике в качестве дешевых литейных конструкционных материалов широко применяются **серые чугуны**.

*Принципиальное отличие структуры серых чугунов от белых в том, что углерод в них находится не в химически связанном состоянии (т.е. в виде Fe_3C – цементита), а в свободном – в виде **включений графита различной формы**.*

Уровень механических свойств серых чугунов зависит от двух основных структурных факторов:

- 1) формы (и количества) графитных включений,**
- 2) структуры металлической основы.**

Продолжение 4 вопроса

По первому признаку (**форма графита**) эти сплавы делятся:

1) на собственно **серые чугуны (СЧ)**, в которых графит имеет форму длинных заостренных пластин.

Разновидностью этих чугунов являются модифицированные СЧ, в которых пластинки графита мелкие и имеют завихренную форму;

2) **высокопрочные чугуны (ВЧ)** с шаровидным (глобулярным) графитом;





3) **ковкие чугуны (КЧ)** с хлопьевидным графитом.

Структура металлической основы любого из этих чугунов может быть одного из трех видов: феррит (Ф), феррит+перлит (Ф+П) и перлит (П).

Отсюда их название – более темный по сравнению с белыми чугунами оттенок излома.

Продолжение 4 вопроса

Классификация, маркировка и механические свойства различных видов серых чугунов

Марка чугуна		$\sigma_{в'}$ МПа (кгс/мм ²)	δ , %	Структура металличес- кой основы	Форма графитных включений
С е р ы е ч у г у н ы (ГОСТ 1412-85)					
СЧ 10		100(10)	≈0	Ф	
СЧ 18		180(18)	≈0	Ф+П	
СЧ 30	модифициро- ванный	300(30)	≈0	П	
СЧ 45		450(45)	≈0	П	
В ы с о к о п р о ч н ы е ч у г у н ы (ГОСТ 7293-85)					
ВЧ 38		380(38)	17	Ф	
ВЧ 45		450(45)	5	Ф+П	
ВЧ 120		1200(120)	2	П	
К о в к и е ч у г у н ы (ГОСТ 1215-79)					
КЧ 30-6		300(30)	6	Ф	
КЧ 45-6		450(45)	6	Ф+П	
КЧ 80-1,5		800(80)	1,5	П	

Промежуточные тесты к теме

- I. Каково максимальное (теоретически) содержание углерода в сталях (в %)?
 - 1. 6,67.
 - 2. 0,8.
 - 3. 2,14.
 - 4. 1,2.
 - 5. 4,3.
- II. Укажите **все** кристаллические **фазы**, присутствующие в железоуглеродистых сплавах:
 - 1) перлит;
 - 2) феррит;
 - 3) цементит;
 - 4) ледебурит;
 - 5) аустенит.
- III. Укажите номера всех типовых структур металлической основы различных видов серых чугунов:
 - 1) феррит;
 - 2) ледебурит;
 - 3) феррит + перлит;
 - 4) ледебурит + цементит первичный;
 - 5) перлит.

Промежуточные тесты к теме

- IV. Наличием какой фазы в структуре серые чугуны отличаются от белых?
- 1. Аустенит.
- 2. Графит.
- 3. Цементит.
- 4. Перлит.
- 5. Феррит.
- V. Какой химический элемент преобладает в сталях?
- 1. Углерод.
- 2. Хром.
- 3. Железо.
- 4. Никель.
- 5. Кислород.
- VI. С какой из перечисленных структур чугунов должен обладать наибольшей прочностью?
- 1. Шаровидный графит (Г) + феррит (Ф).
- 2. Шаровидный Г + перлит (П).
- 3. Пластинчатый Г + П.
- 4. Хлопьевидный Г + Ф + П.
- 5. Хлопьевидный Г + Ф.

Промежуточные тесты к теме

- VII. Из каких **фаз** формируется равновесная структура углеродистых сталей и белых чугунов при нормальных температурах?
 - 1. Аустенит.
 - 2. Феррит.
 - 3. Цементит.
 - 4. Ледебурит.
 - 5. Перлит.
- VIII. Как изменяются твердость и пластичность углеродистых сталей с увеличением содержания в них углерода?
 - 1. Твердость и пластичность растут.
 - 2. Твердость и пластичность падают.
 - 3. Твердость растет, пластичность падает.
 - 4. Твердость падает, пластичность, пластичность растет.
 - 5. Твердость растет, пластичность не изменяется.
- IX. Какова основная **структурная составляющая** углеродистых сталей в равновесном состоянии при комнатной температуре?
 - 1. Феррит.
 - 2. Цементит вторичный.
 - 3. Перлит.
 - 4. Аустенит.
 - 5. Ледебурит.

Промежуточные тесты к теме

- X. По каким из перечисленных характеристик серые чугуны выгодно отличаются от углеродистых сталей?
 - 1. Антифрикционные свойства.
 - 2. Стоимость.
 - 3. Литейные свойства.
 - 4. Прочность.
 - 5. Пластичность.
- XI. Какой из перечисленных материалов обладает наибольшей пластичностью?
 - 1. Эвтектоидная сталь.
 - 2. Доэвтектоидная сталь.
 - 3. Ковкий чугун на ферритной основе.
 - 4. Доэвтектический белый чугун.
 - 5. Техническое железо.



Конец лекции!