

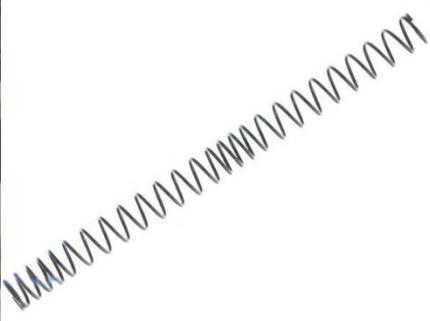
Теоретическое и прикладное материаловедение

Необходимая литература:

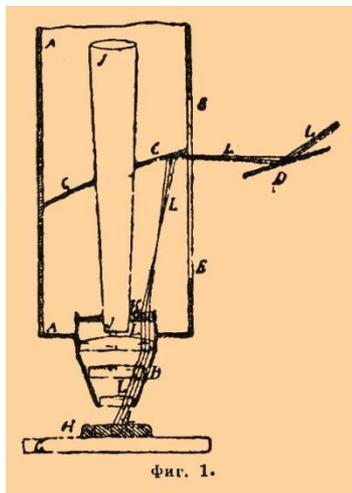
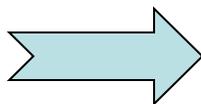
- Гуляев А.П. Металловедение. 1986г. 272 с.
- Елманов Г.Н., Калинин Б.А., Кохтев С.А. и др. Основы материаловедения. Том 2. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 604 с.
- Лившиц Б.Г. Металлография. – М.: Металлургия, 1990. – 334 с.
- Райнз Ф. Диаграммы фазового равновесия в металлургии. – М.: Металлургиздат, 1960. – 376 с.
- Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. - 480 с.

Диаграмма состояния железо-углерод

Часть 1 Стали



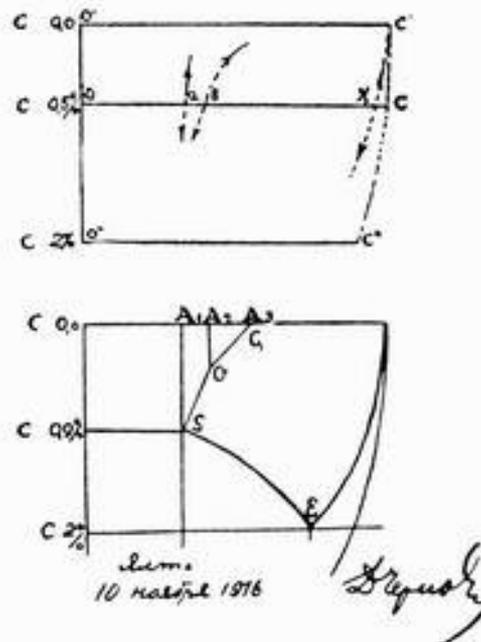
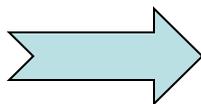
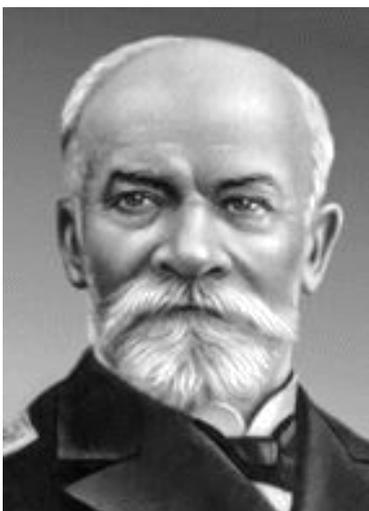
Изучение системы железо-углерод



Роберт Аустен



Павел Петрович Аносов

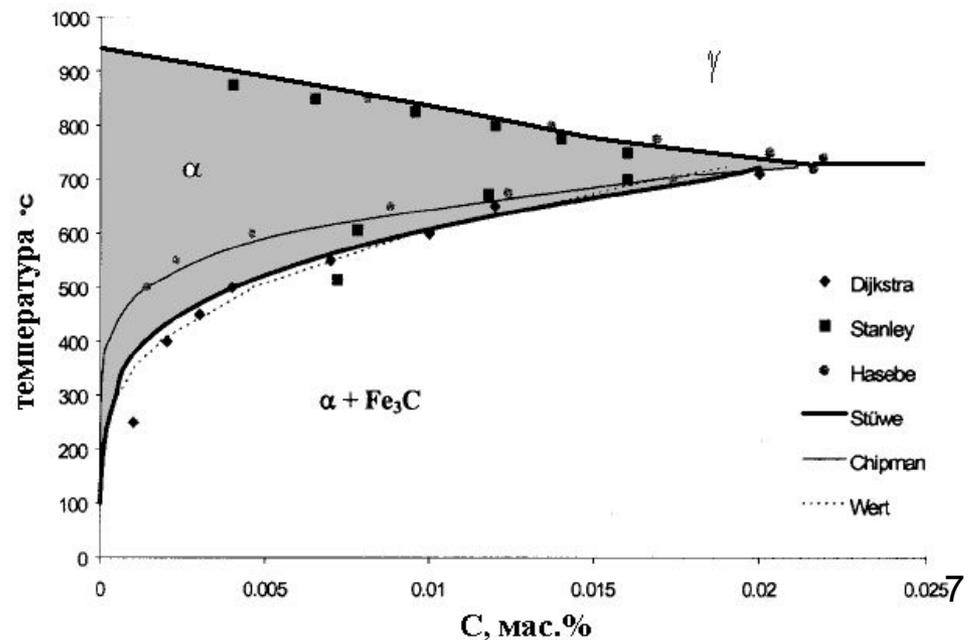
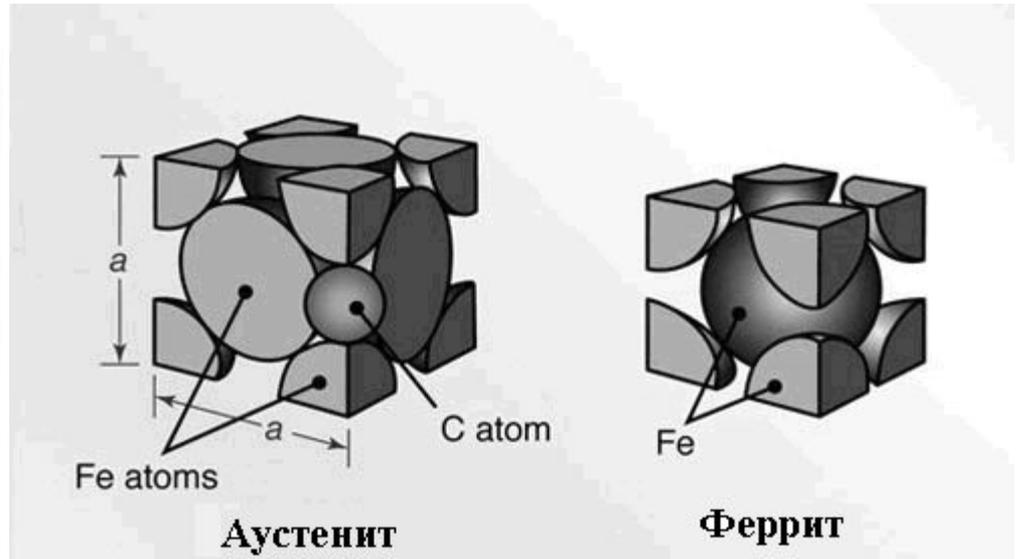
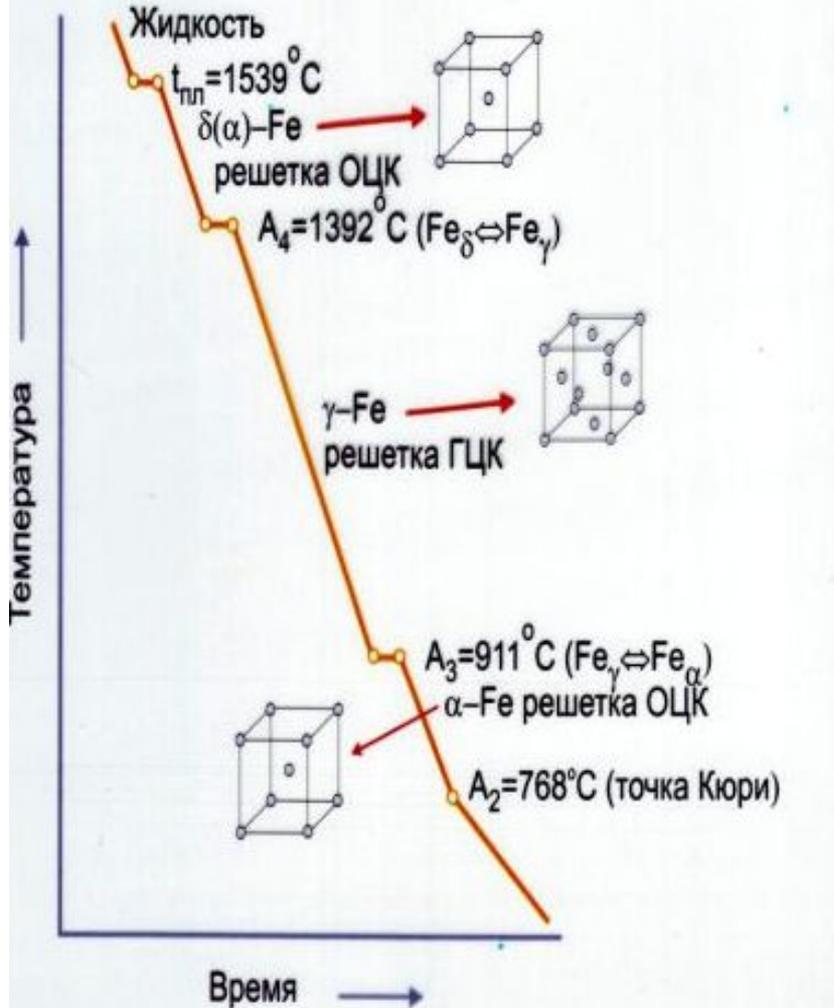


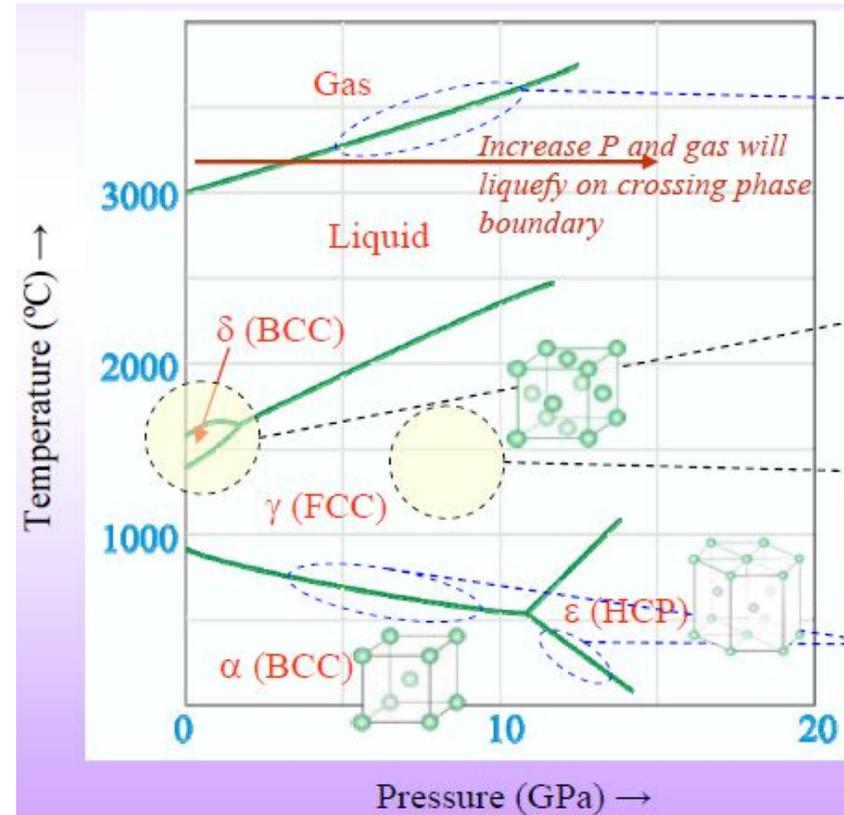
«Критический обзор статей Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные исследования Д.К. Чернова по этому же предмету», 1868 г.

Дмитрий Константинович
Чернов

Растворимость углерода в железе

Температурный полиморфизм железа





This line slopes upward as at constant T if we increase the P the gas will liquefy as liquid has lower volume (similarly the reader should draw horizontal lines to understand the effect of pressure on the stability of various phases- and rationalize the same).

Phase fields of non-close packed structures shrink under higher pressure

Phase fields of close packed structures expand under higher pressure

These lines slope downward as: Under higher pressure the phase with higher packing fraction (lower volume) is preferred

Диаграмма фазового равновесия системы Fe-C

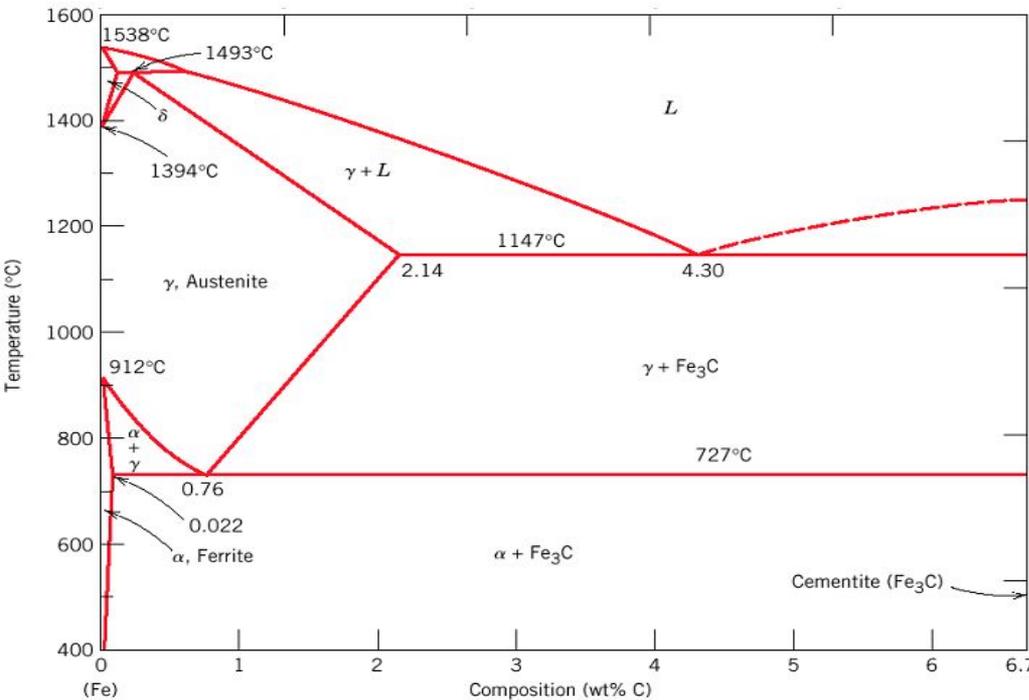
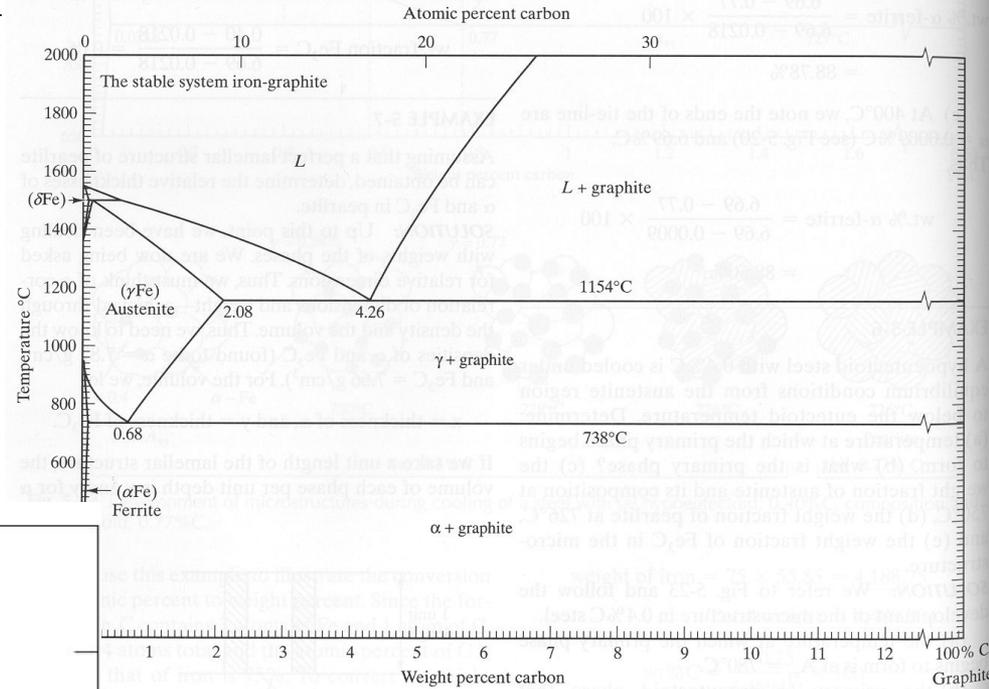
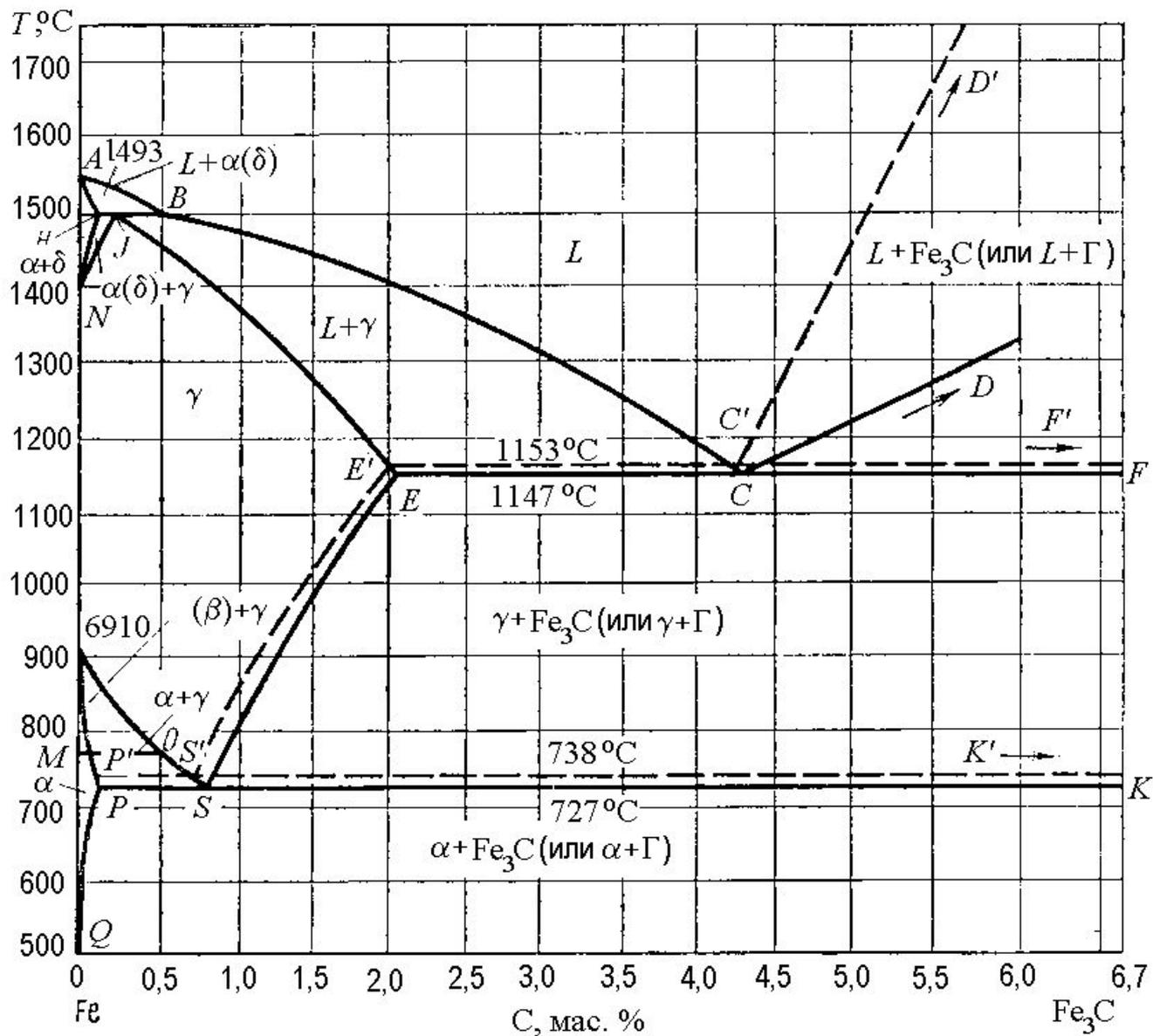


Диаграмма фазового равновесия системы Fe-Fe₃C



Основные фазы в системе Fe-Fe₃C

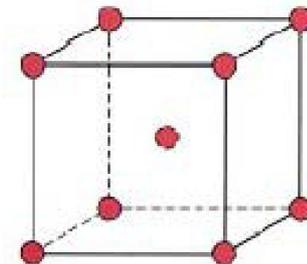
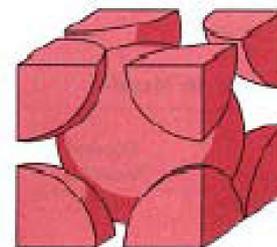
α -феррит, твердый раствор углерода в ОЦК железе.

Стабильная форма Fe при низкой температуре.

Максимальная растворимость **C** < 0,022 мас. %

При нагреве выше 911°C переходит в ГЦК **γ -Fe**

Сравнительно небольшая твердость 70-80 кН/см²



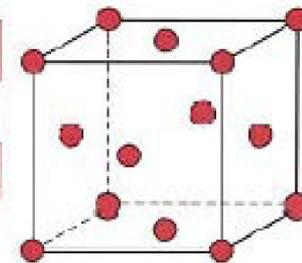
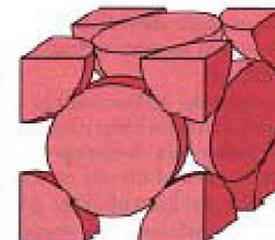
γ -железо (аустенит), твердый раствор углерода в ГЦК железе

Максимальная растворимость **C** в **γ -Fe** составляет 2,14 мас. %

При нагреве выше 1395°C переходит в ОЦК

δ -феррит

При охлаждении ниже 727°C распадается на **α -феррит** и **цементит** (перлит), может быть зафиксирован только быстрым охлаждением



δ -феррит, твердый раствор углерода в ОЦК **δ -железе**

Имеет такую же структуру, что и **α -феррит**

Существует только при высоких температурах (>1395°C)

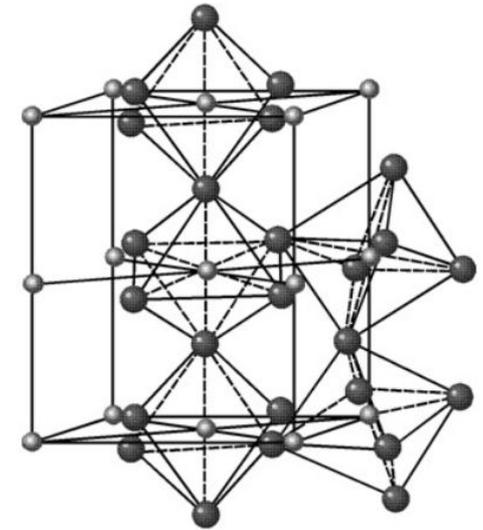
Плавится при температуре 1538°C

Основные фазы в системе Fe-Fe₃C

Цементит, карбид железа Fe₃C

Метастабильное химическое соединение, является стабильным при комнатной температуре, однако медленно (в течении нескольких лет) распадается на α -Fe и C (графит) при 650-700°C

Обладает высокой твердостью – 800 кН/см²



Ромбическая кристаллическая
решетка

Fe-C, жидкий раствор углерода в железе

Минимальная температура плавления соответствует составу железа с 4,30 мас. % C (эвтектическая точка).

!!! Железо со многими элементами образует растворы: с металлами – растворы замещения, с углеродом, азотом и водородом – растворы внедрения.

Критические точки при нагреве и охлаждении стали

Критические точки железа:

Точка A_3 – температура равновесия $Fe_\alpha \leftrightarrow Fe_\gamma$ (911°C);

Точка A_4 – температура равновесия $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\delta$ (1392°C);

Критические точки стали:

Точка A_1 (линия PSK) – температура эвтектоидного превращения: при медленном охлаждении аустенит состава S превращается в феррит состава P и цементит; при медленном нагреве реакция идет в обратном направлении.

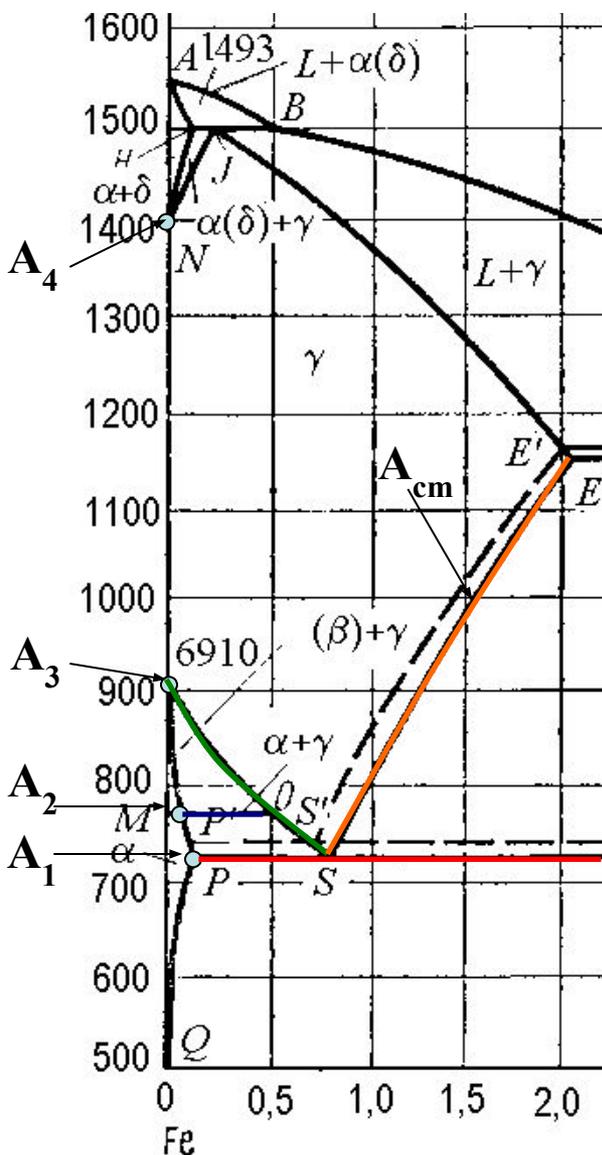
Точка A_3 (линия GS) – начало выделения феррита из аустенита при медленном охлаждении или конец превращения феррита в аустенит при медленном нагреве.

Точка A_{cm} (линия SE) – начало выделения цементита из аустенита при медленном охлаждении или окончание растворения цементита в аустените при медленном нагреве.

Точка A_2 (768°C) – температура перехода феррита из ферромагнитного в парамагнитное состояние при нагреве и в обратном направлении при охлаждении.

Критические точки цементита:

Точка A_0 – ниже температуры 210°C цементит теряет свои магнитные свойства (при низких температурах цементит слабо ферромагнитен).



Некоторые комментарии по системе Fe-Fe₃C

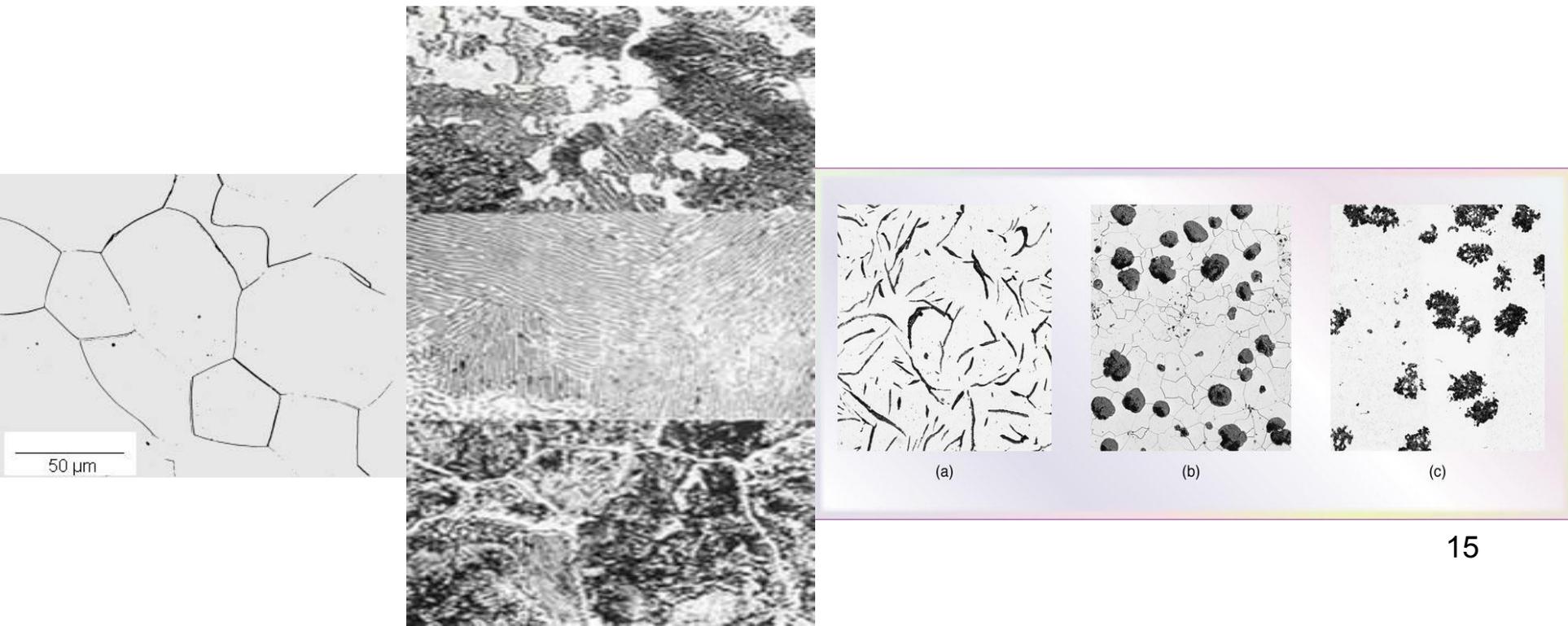
- **C** является ЛЭ в **Fe**, он образует твердые растворы внедрения со всеми модификациями железа (α , γ , δ)
- Максимальная растворимость в ОЦК **α -Fe** не велика. Она составляет 0,022 мас.% при температуре 727°C и уменьшается при охлаждении, что обусловлено малым количеством пустот в ОЦК-решетке.
- Максимальная растворимость в ГЦК **γ -Fe** составляет 2,14 мас.% при температуре 1147°C, так как ГЦК-решетка имеет больше пустот для размещения междоузельных атомов углерода.
- При температурах меньше 768°C **α – феррит** обладает ферромагнитными свойствами. Аустенит не магнитен.
- **Цементит**, как и многие интерметаллиды имеет высокую твердость и очень хрупок. Он является упрочняющим компонентом сталей.
- **Цементит** способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут замещаться атомами неметаллов: например, азотом; атомы железа – металлами: марганцем, хромом, вольфрамом и др. Такой твердый раствор на базе решетки цементита называется *легированным цементитом*.

Классификация сплавов Fe-Fe₃C

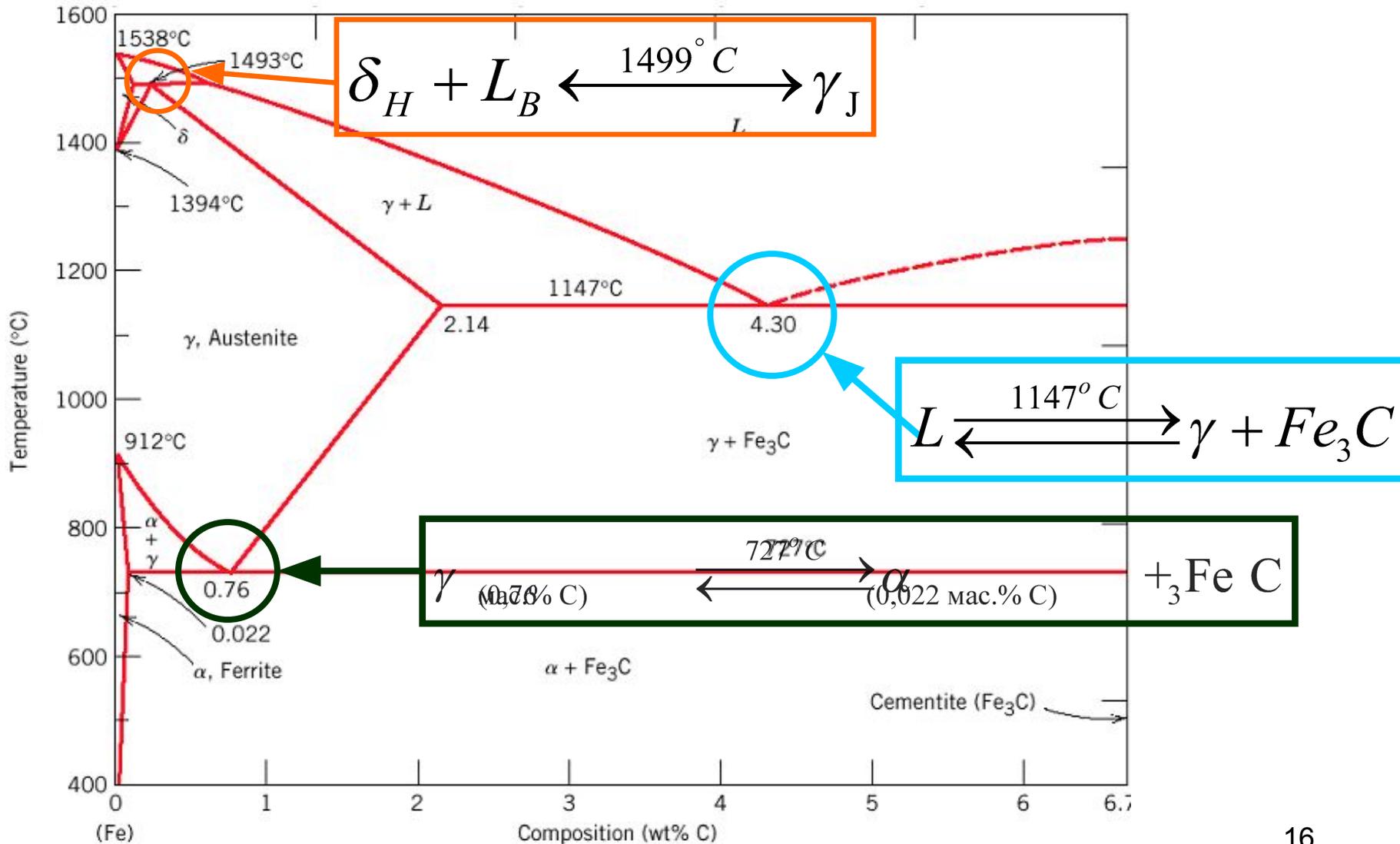
Техническое железо, <0,008 мас.% С, при комнатной температуре имеет структуру α – феррит;

Сталь, 0,008-2,14 мас.% С (обычно <1 мас.%) при комнатной температуре имеют структуру α – феррит + Fe₃C. В зависимости от содержания углерода делятся на доэвтектоидные, эвтектоидную и заэвтектоидные;

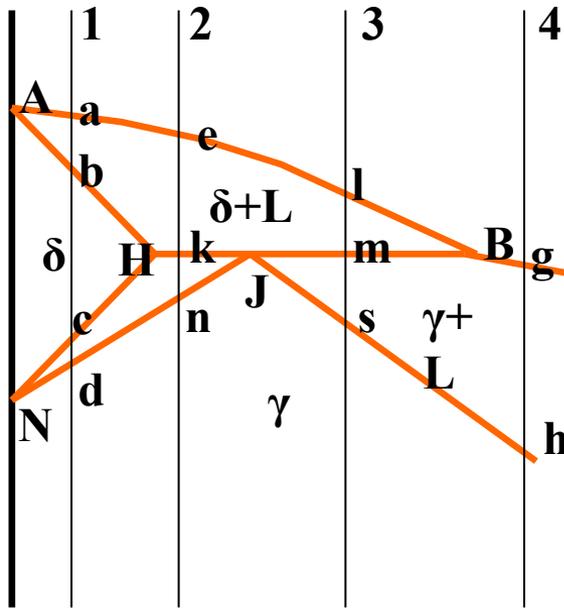
Чугун, 2,14-6,7 мас.% С (обычно <4,5 мас.%) Минимальная температура плавления соответствует составу Fe-4,30 мас.%С (эвтектическая точка).



Эвтектическая и эвтектоидная реакции в системе Fe-Fe₃C



Пример первичной кристаллизации сталей



1 (0,05 %C): а – начало кристаллизации

б – окончание кристаллизации

б-с охлаждение δ -твердого раствора

с-д аллотропическое превращение железа ($\delta \rightarrow \gamma$)

ниже точки d дальнейшее охлаждение сплава в

аустенитном состоянии

2 (0,13 %C):

е – начало кристаллизации δ -твердого раствора

к – окончание кристаллизации δ -твердого раствора

к – происходит перитектическое превращение



к-п идет перестройка решетки ($\delta \rightarrow \gamma$)

ниже точки n дальнейшее охлаждение сплава в

аустенитном состоянии

3 (0,25 %C):

l – начало кристаллизации δ -твердого раствора

m – окончание кристаллизации δ -твердого раствора

m – происходит перитектическое превращение $\delta_{\text{H}} + L_{\text{B}} \rightarrow \gamma_{\text{J}}$ (по окончании в избытке оказывается жидкая фаза)

m-s кристаллизация аустенита из жидкой фазы

ниже точки s дальнейшее охлаждение сплава в аустенитном состоянии

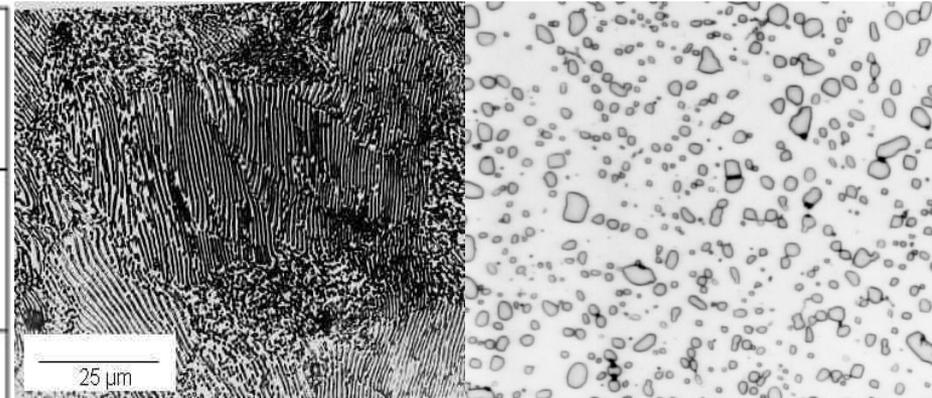
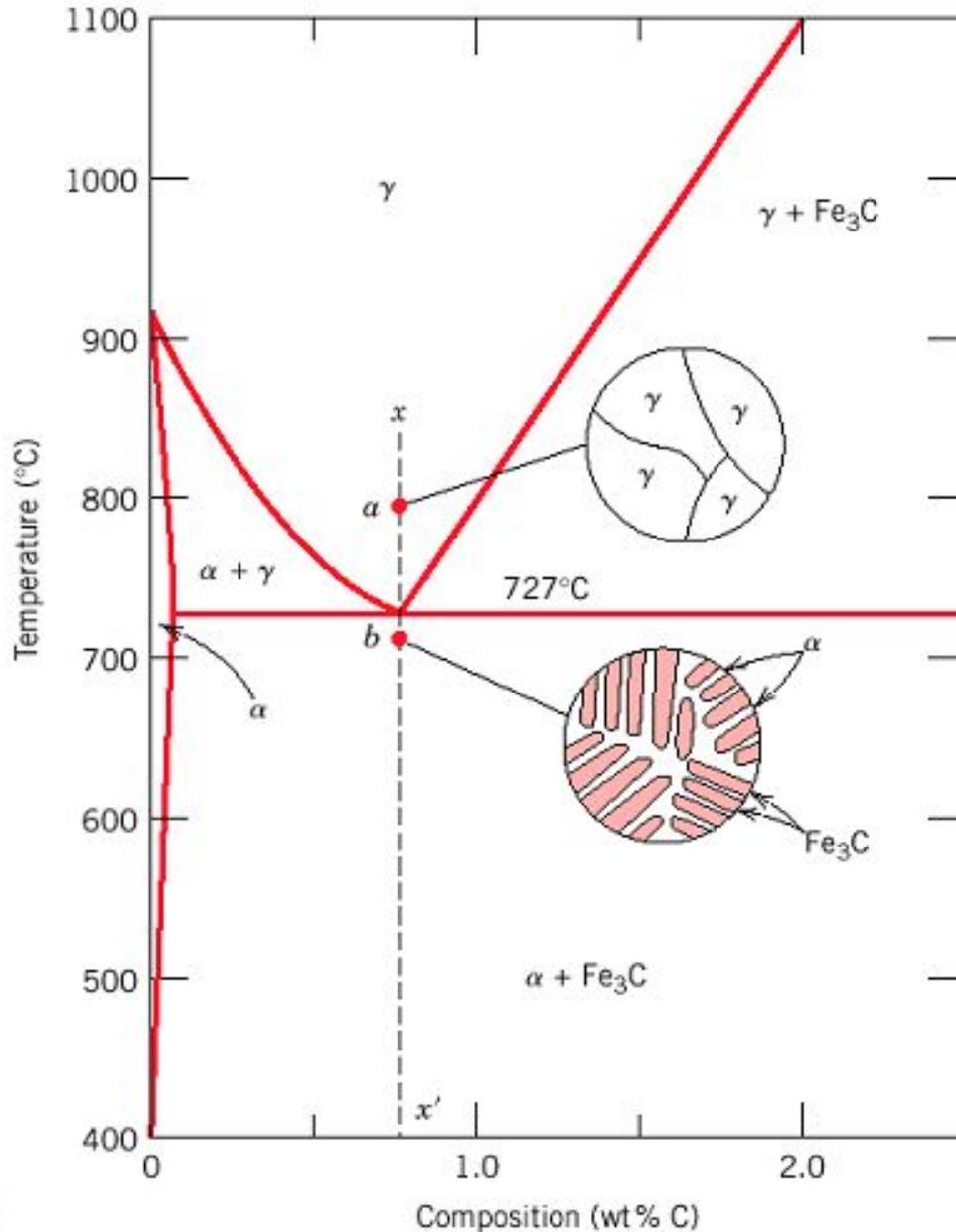
4 (0,6 %C):

g – начало кристаллизации аустенита

h – окончание кристаллизации аустенита

ниже точки h дальнейшее охлаждение сплава в аустенитном состоянии

Эвтектоидные стали



перлит

сфероидизированный перлит (сфероидит)

Эвтектоидная сталь обладает высокой твердостью при достаточной вязкости. Из этой стали изготавливаются: пилы, ножовки и т.п.

Перлит - двухфазная пластинчатая микроструктура содержащая цементит и феррит, которая образуется при охлаждении стали при нормальных условиях.

Эвтектоидное превращение

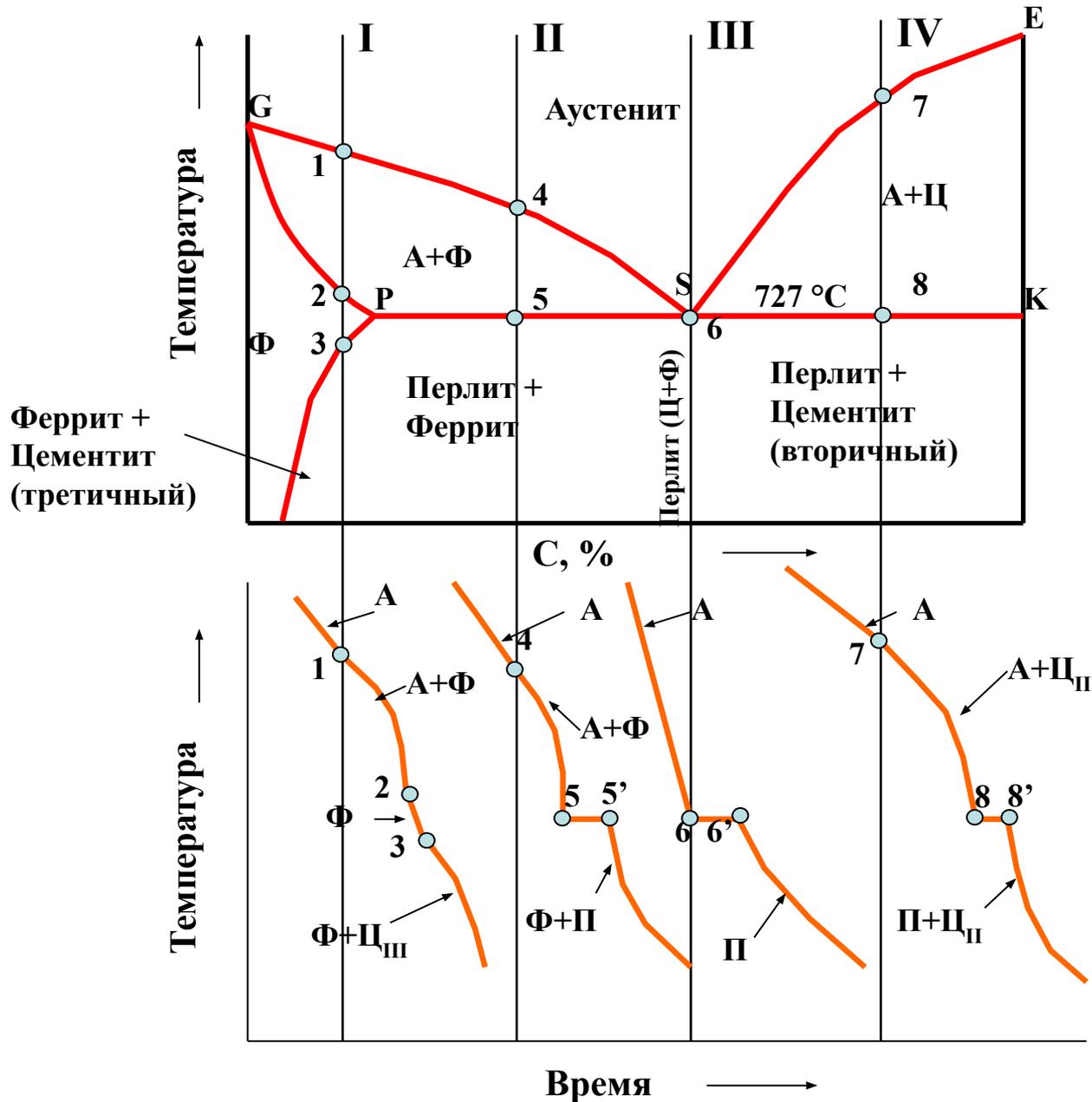
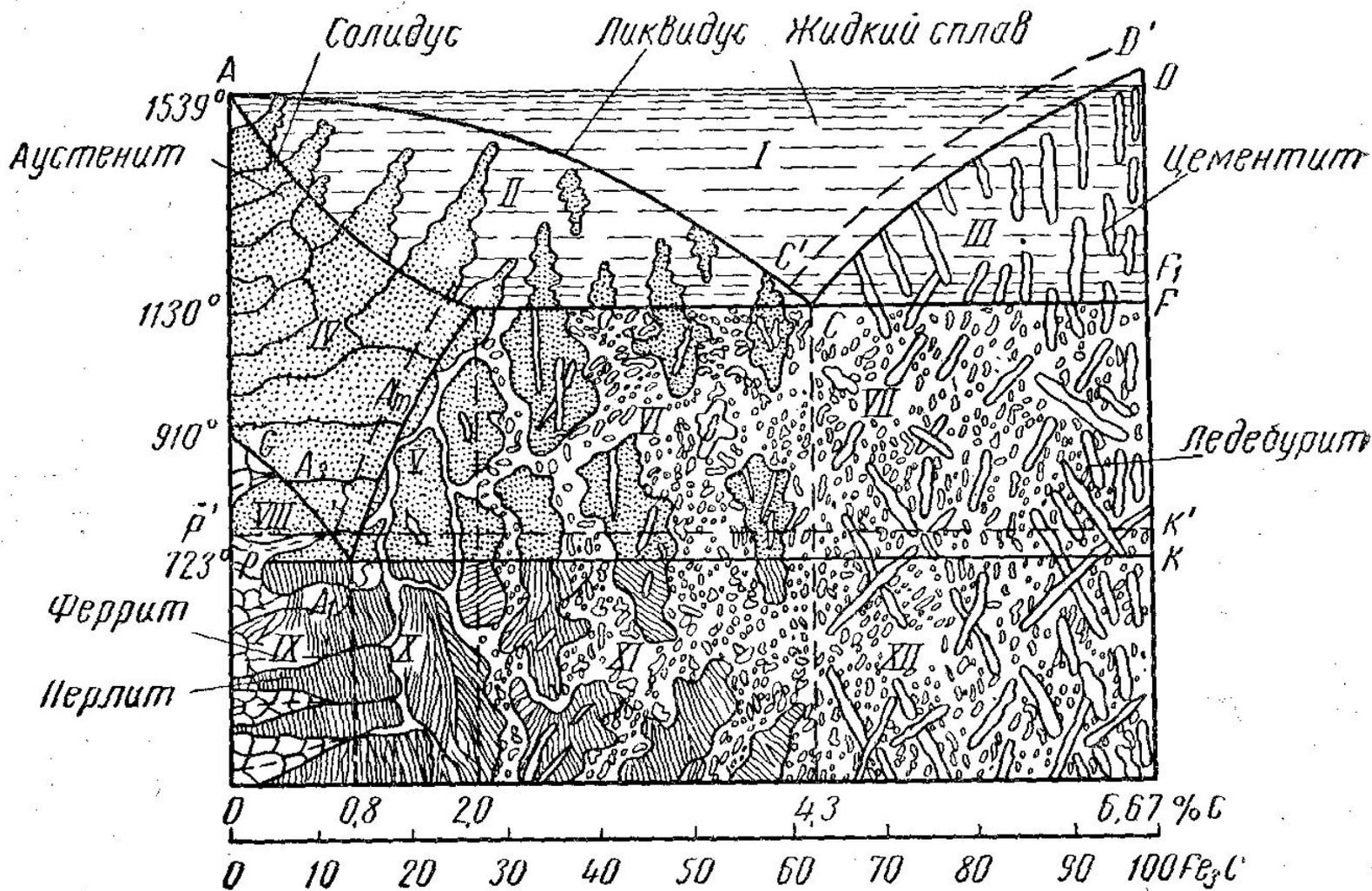
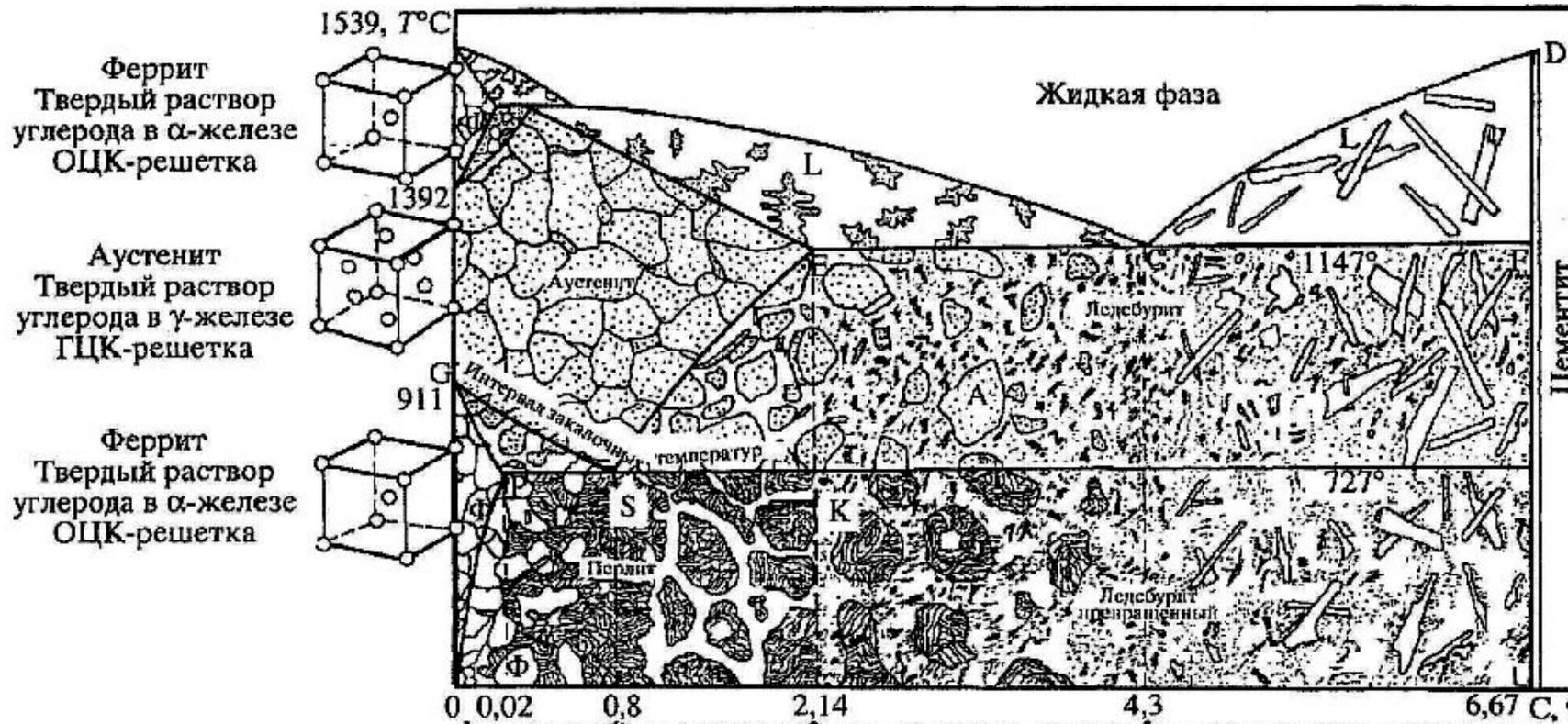


Диаграмма фазового равновесия системы Fe-Fe₃C





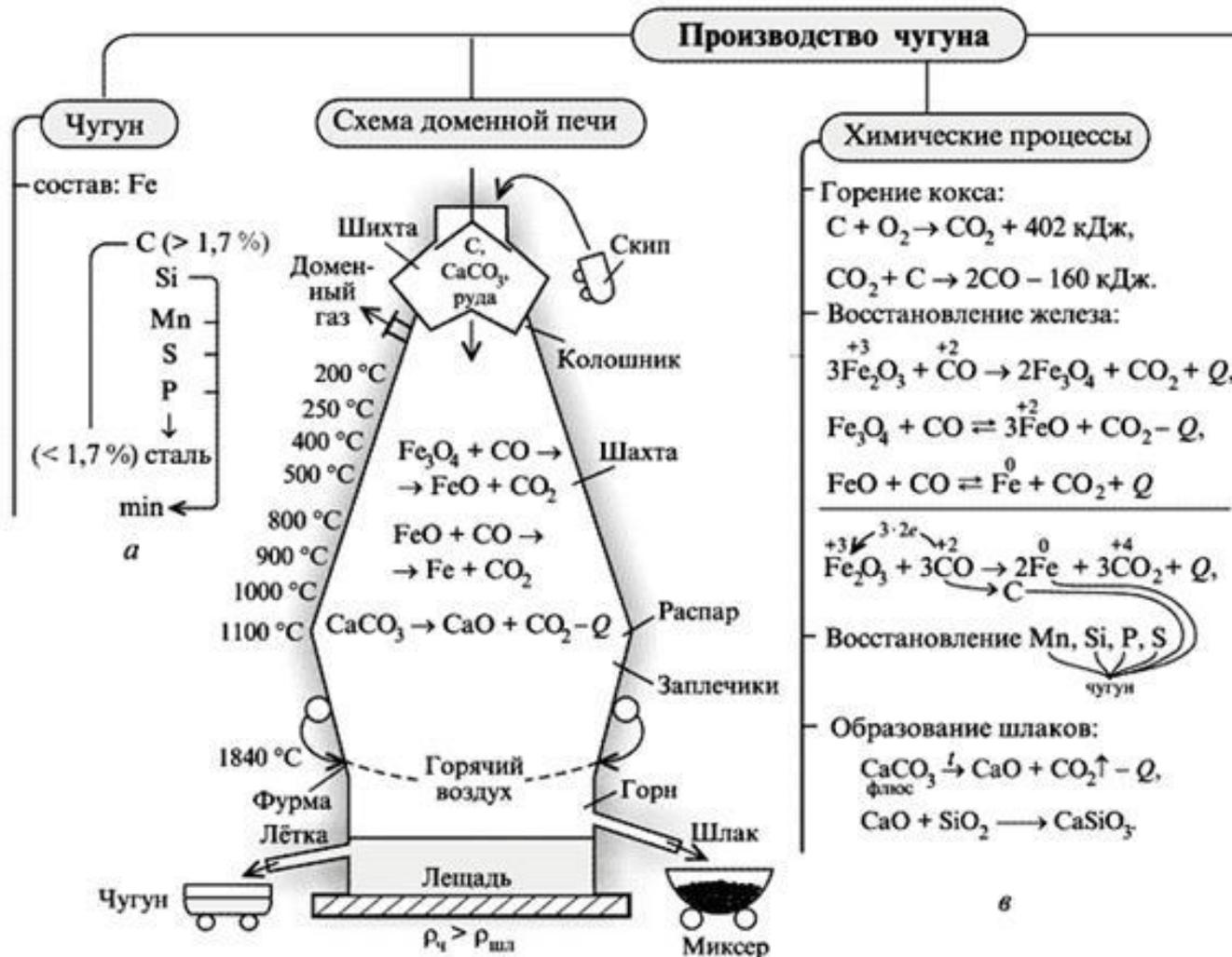
Производство чугуна

Магнетит (*магнитный железняк*) $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ — широко распространённый минерал из класса оксидов, природный оксид железа (II), (III).

Гематит — минерал железа Fe_2O_3 , *красный железняк*.

Лимонит — смесь гидратов оксида железа III. Химический состав оксид железа (III). (Fe_2O_3) 86—89 %, вода (H_2O) 10—14 %.

Сидерит («железный шпат») — минерал состава FeCO_3 , карбонат железа.



Производство стали

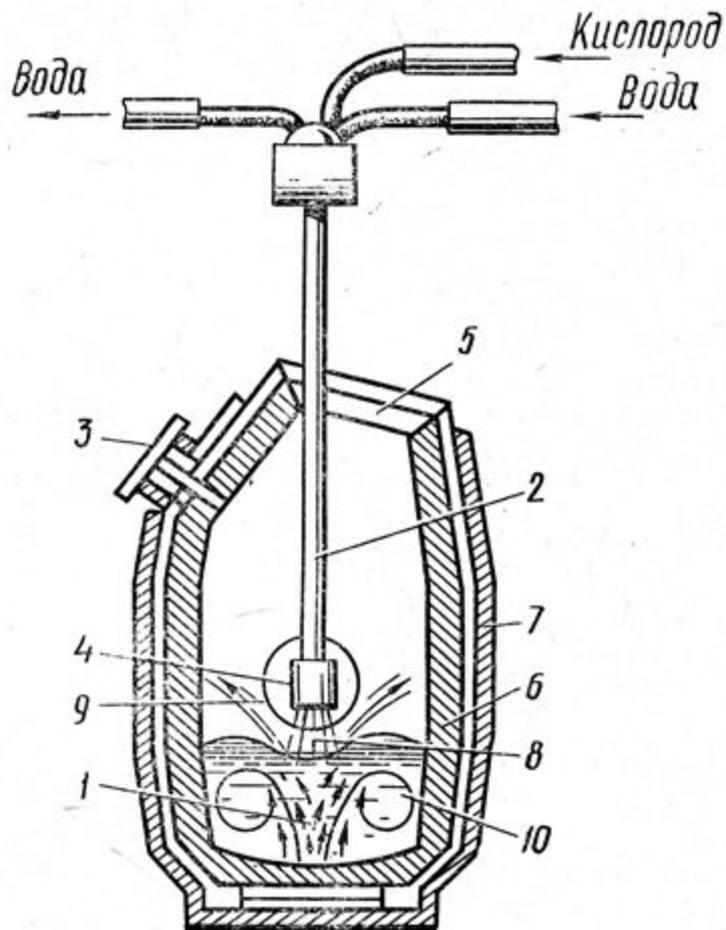
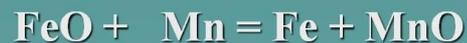
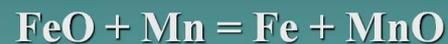
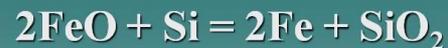
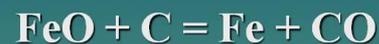


Схема кислородного конвертера:

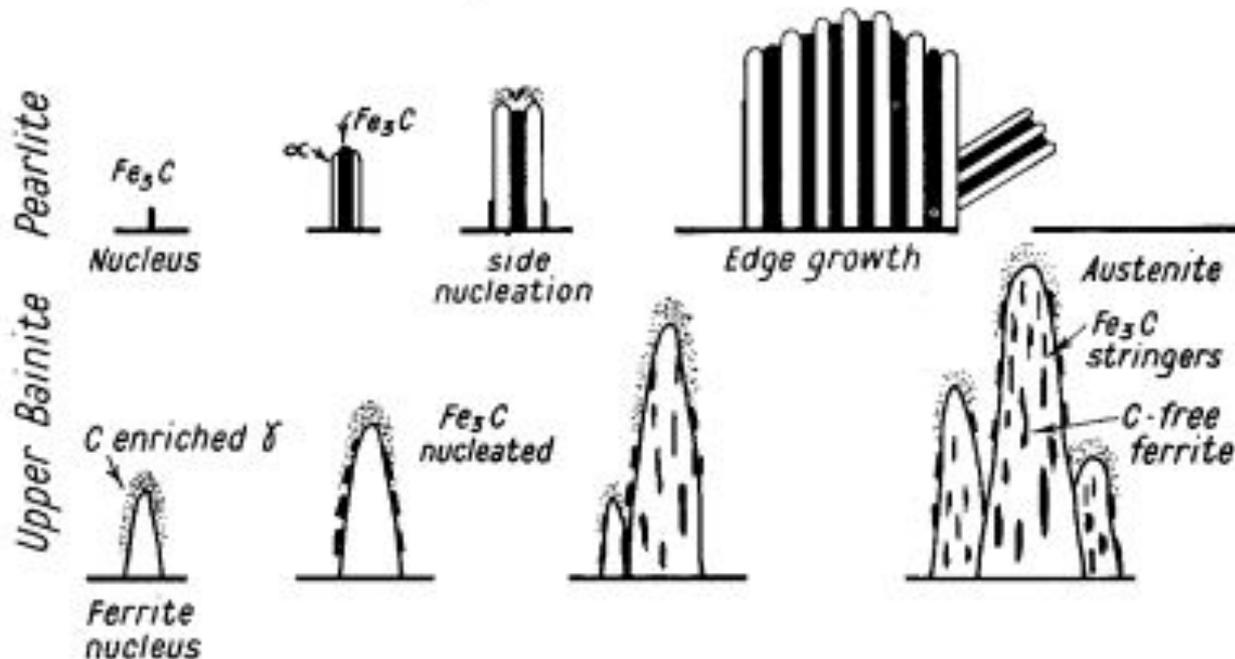
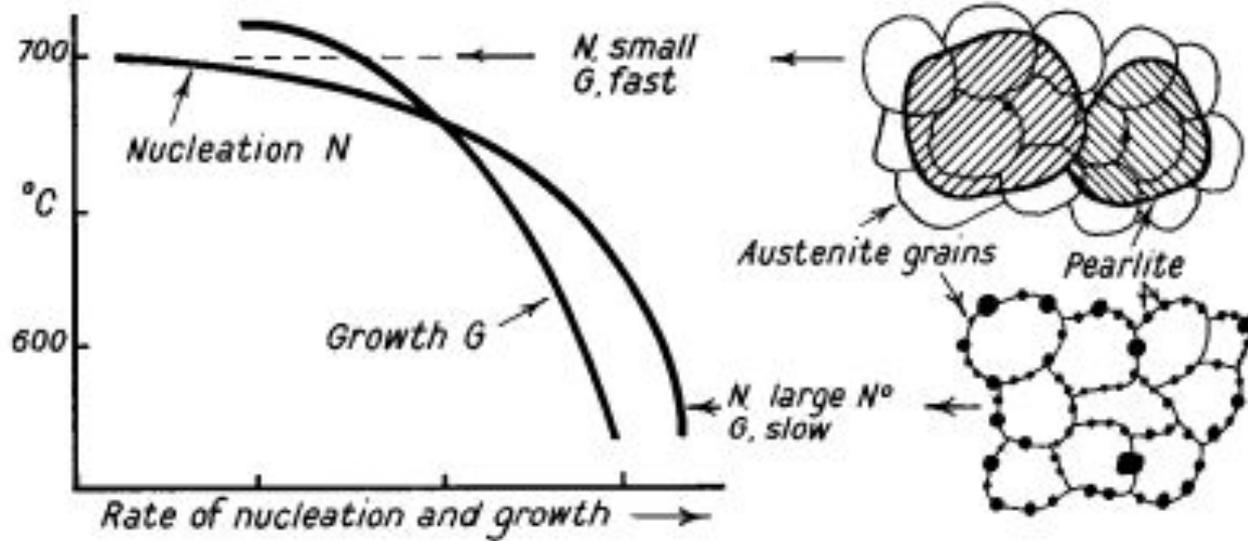
1 — жидкий чугун; 2 — кислородная фурма; 3 — летка; 4 — сопло; 5 — горловина; 6 — футеровка; 7 — стальной кожух; 8 — струя кислорода; 9 — отраженная струя; 10 — схема движения металла при продувке.

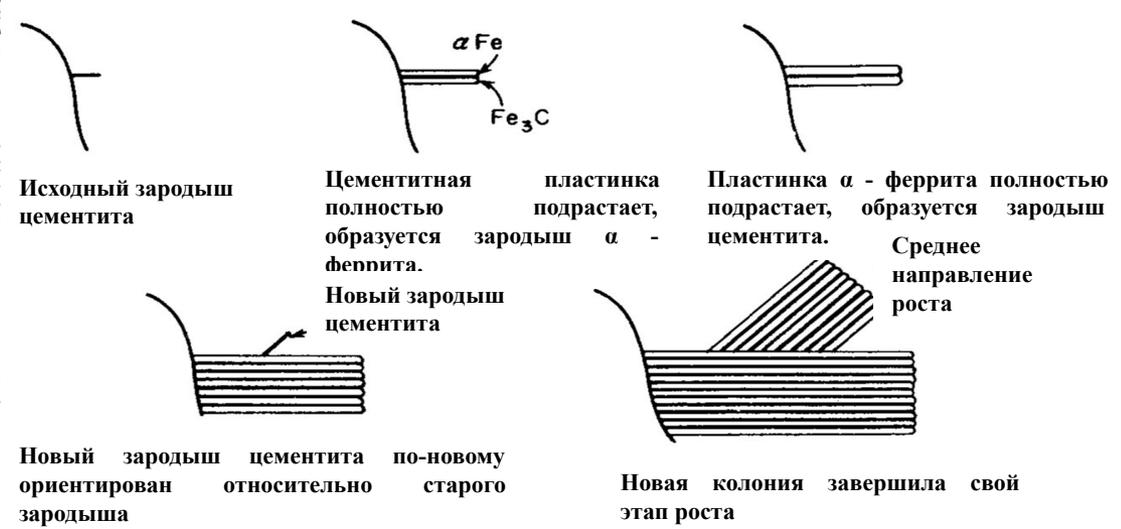
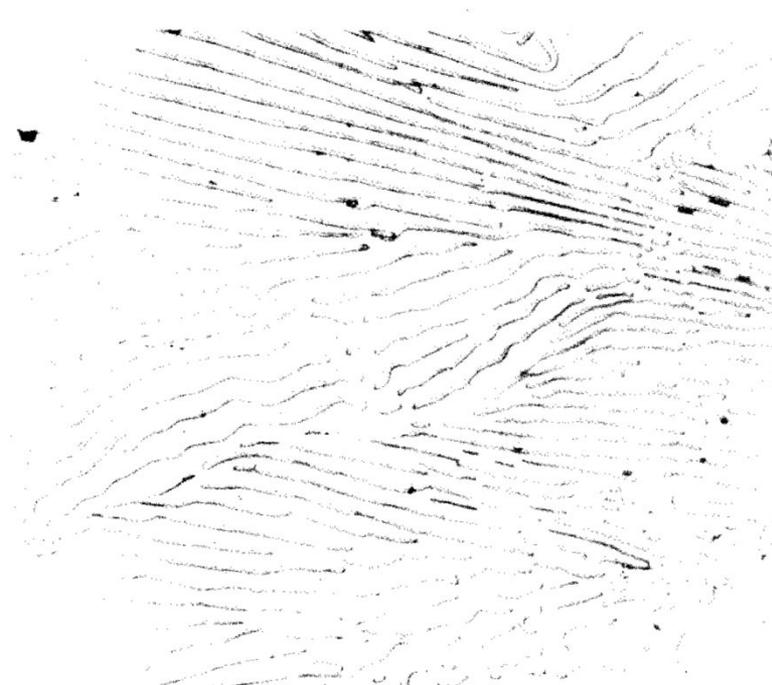


Кислородно-конвертерный метод



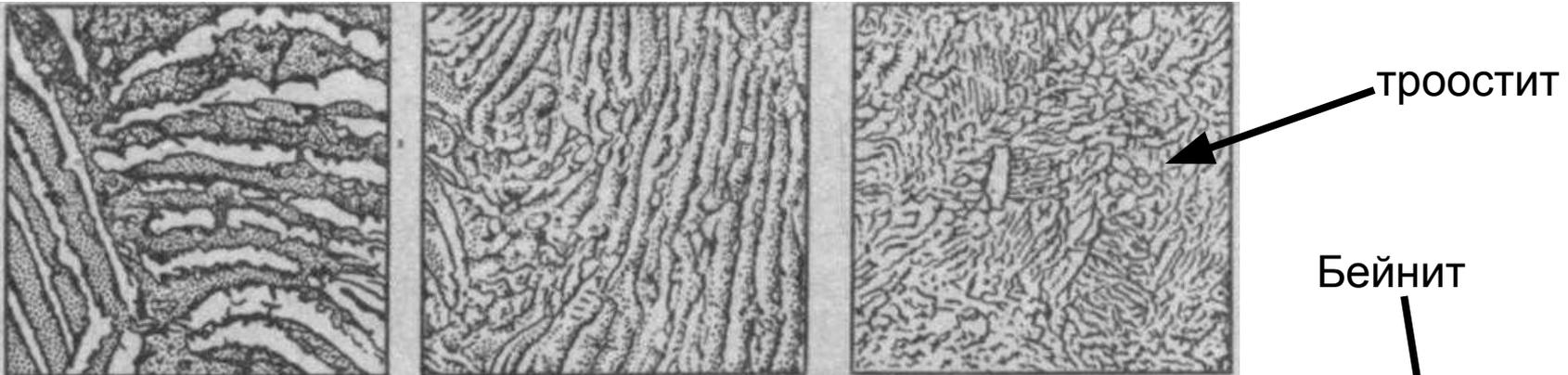
Распад аустенита при охлаждении





- Образование зародышей и их рост
- Межпластинчатое расстояние зависит от температуры превращения
- Большая степень переохлаждения → тонкая структура → выше твердость

Распад аустенита при охлаждении



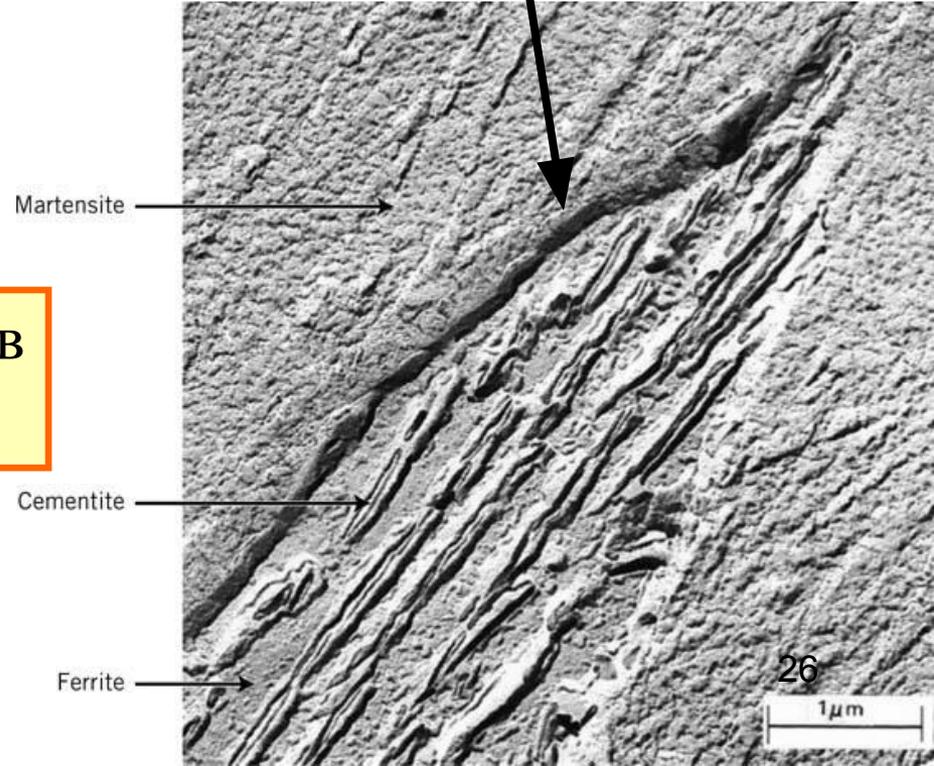
перлит

сорбит

троостит

Бейнит

Межпластинчатое расстояние в перлите составляет 7.14×10^{-5} см



Микроструктура распавшегося аустенита

Микроструктура	Фазовый состав	Микросложение	Характерные свойства
Сфероидит	$\alpha\text{-Fe}$ + Fe_3C	Относительно мелкие шарообразные частицы Fe_3C в матрице $\alpha\text{-Fe}$	Мягкий и вязкий
Перлит		Толстые чередующиеся пластины Fe_3C и $\alpha\text{-Fe}$	Тверже и прочнее сфероидита, но не такой вязкий
Сорбит		Более тонкие чередующиеся пластинки, по сравнению с перлитом	С уменьшением межпластинчатого расстояния твердость и прочность увеличивается, а вязкость снижается
Троостит			
Бейнит		Очень мелкодисперсные вытянутые частички Fe_3C в зернах феррита	Твердость на уровне троостита, но максимальная прочность. Более пластичен

Пример вторичной кристаллизации в сталях

Сплав 5 (0,3 %C):

Выше точки а сплав находится в аустенитном состоянии.

а – начало полиморфного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$

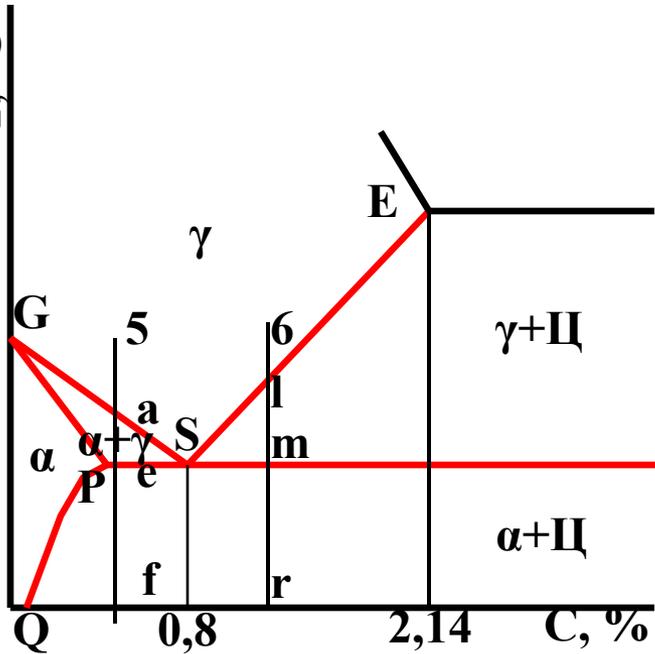
е – окончание полиморфного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$

(концентрация углерода в аустените будет изменяться по линии GS (к точке S), а концентрация углерода в феррите – по линии GP (к точке P).

В точке е выделение феррита закончится, и сплав будет состоять из двух фаз: $\alpha_p + \gamma_s$

Чуть выше линии PSK:

$$\alpha = \frac{eS}{PS} \cdot 100\%; \gamma = \frac{Pe}{PS} \cdot 100\%$$



В точке е происходит эвтектоидное превращение по реакции $\gamma_s \rightarrow \alpha_p + \text{Ц}$

Сразу после перлитного превращения система состоит из α -фазы и цементита, их относительное количество, определяется как:

$$\alpha = \frac{eK}{PK} \cdot 100\%; \text{Ц} = \frac{Pe}{PK} \cdot 100\%$$

Ниже точки е происходит дальнейшее охлаждение сплава с выделением третичного цементита.

Структурные составляющие: феррит+перлит+третичный цементит; фазы: феррит и цементит

Пример вторичной кристаллизации в сталях

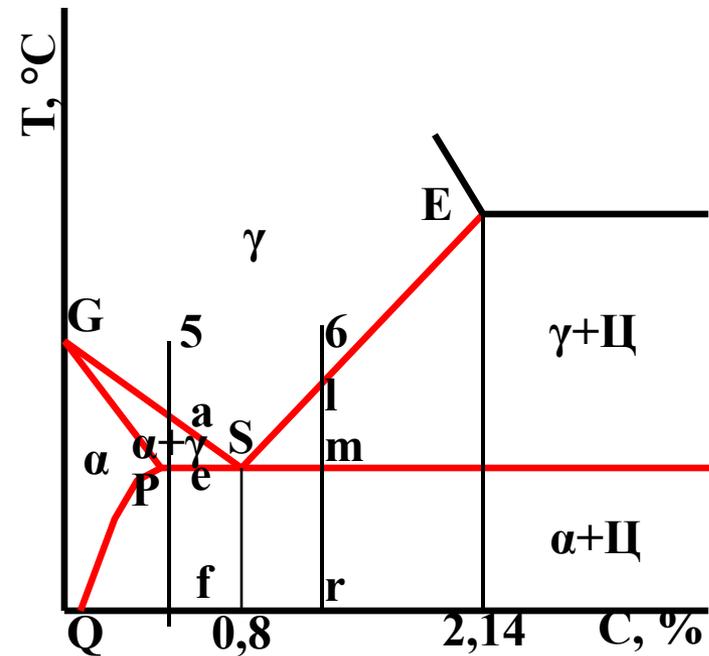
Сплав 6 (1,2 %C):

Выше точки а сплав находится в аустенитном состоянии.

l – начало выделения избытка углерода в виде вторичного цементита

m – окончание выделения избытка углерода в виде вторичного цементита

Чуть выше линии PSK сплав будет состоять из двух фаз (аустенит и вторичный цементит):



$$A = \frac{mK}{SK} \cdot 100\%; \quad Ц_{II} = \frac{Sm}{SK} \cdot 100\%$$

В точке m происходит эвтектоидное превращение по реакции $\gamma_s \rightarrow \alpha_p + Ц$

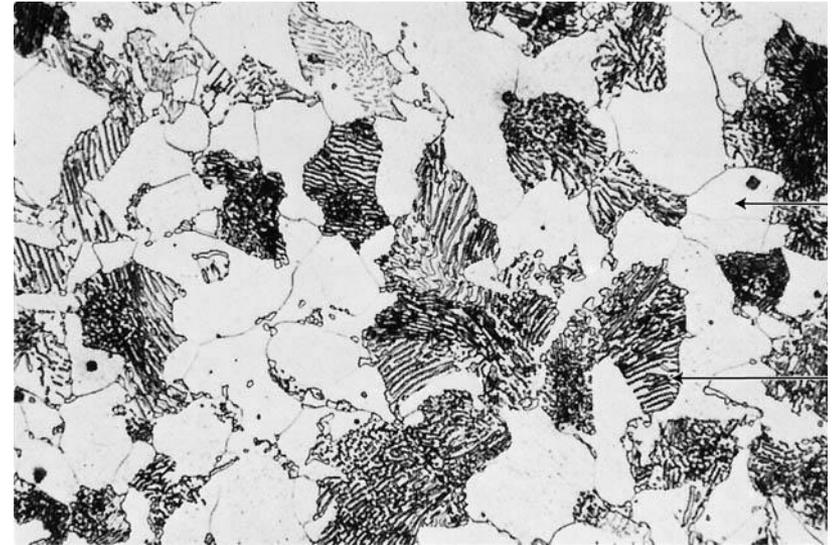
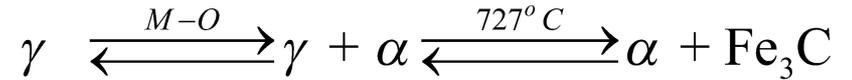
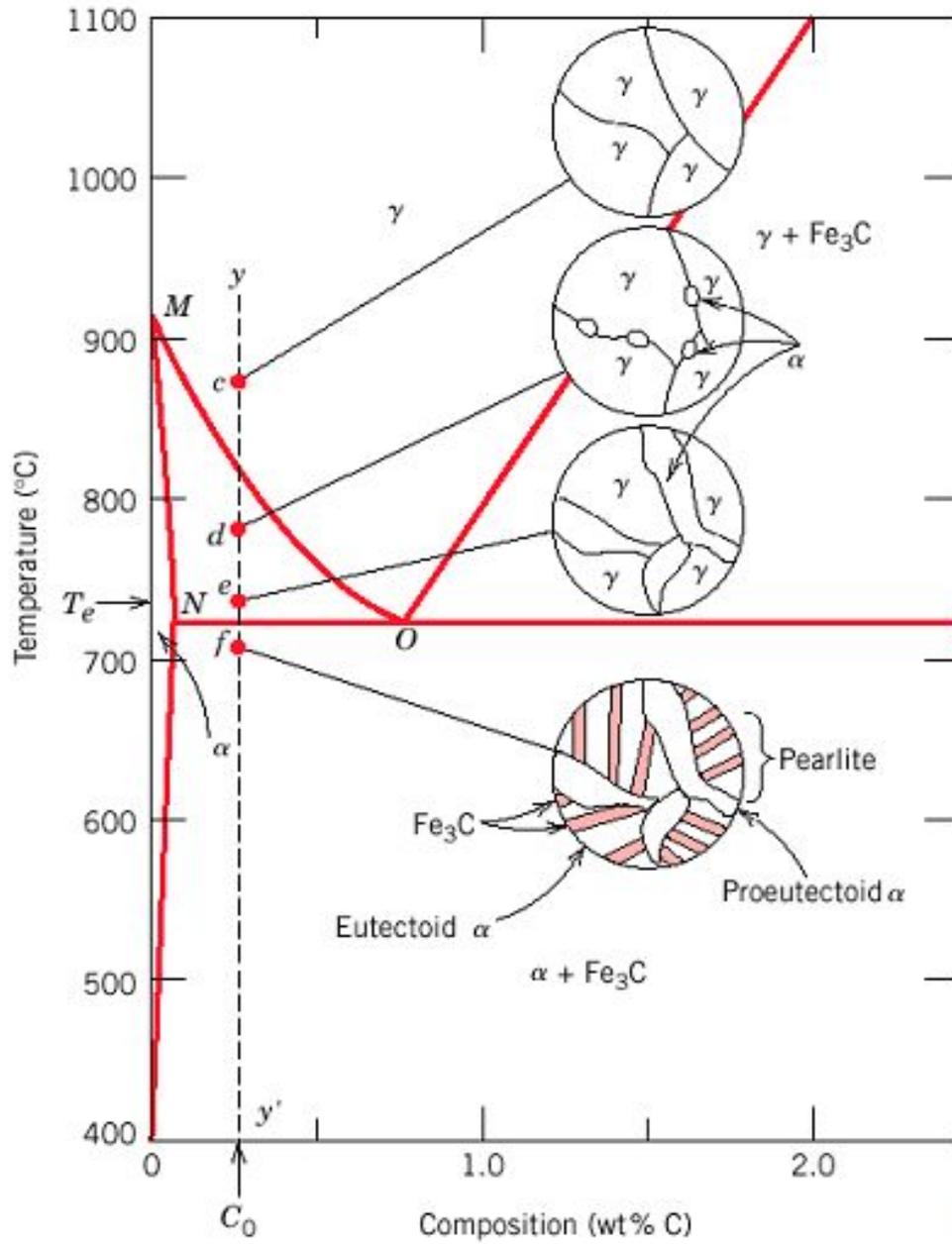
Сразу после перлитного превращения система состоит из α -фазы и цементита, их относительное количество, определяется как:

$$\alpha = \frac{mK}{PK} \cdot 100\%; \quad Ц = \frac{Pm}{PK} \cdot 100\%$$

Ниже точки e происходит дальнейшее охлаждение сплава с выделением третичного цементита.

Структурные составляющие: Цементит+Перлит+Третичный цементит; фазы: феррит и цементит

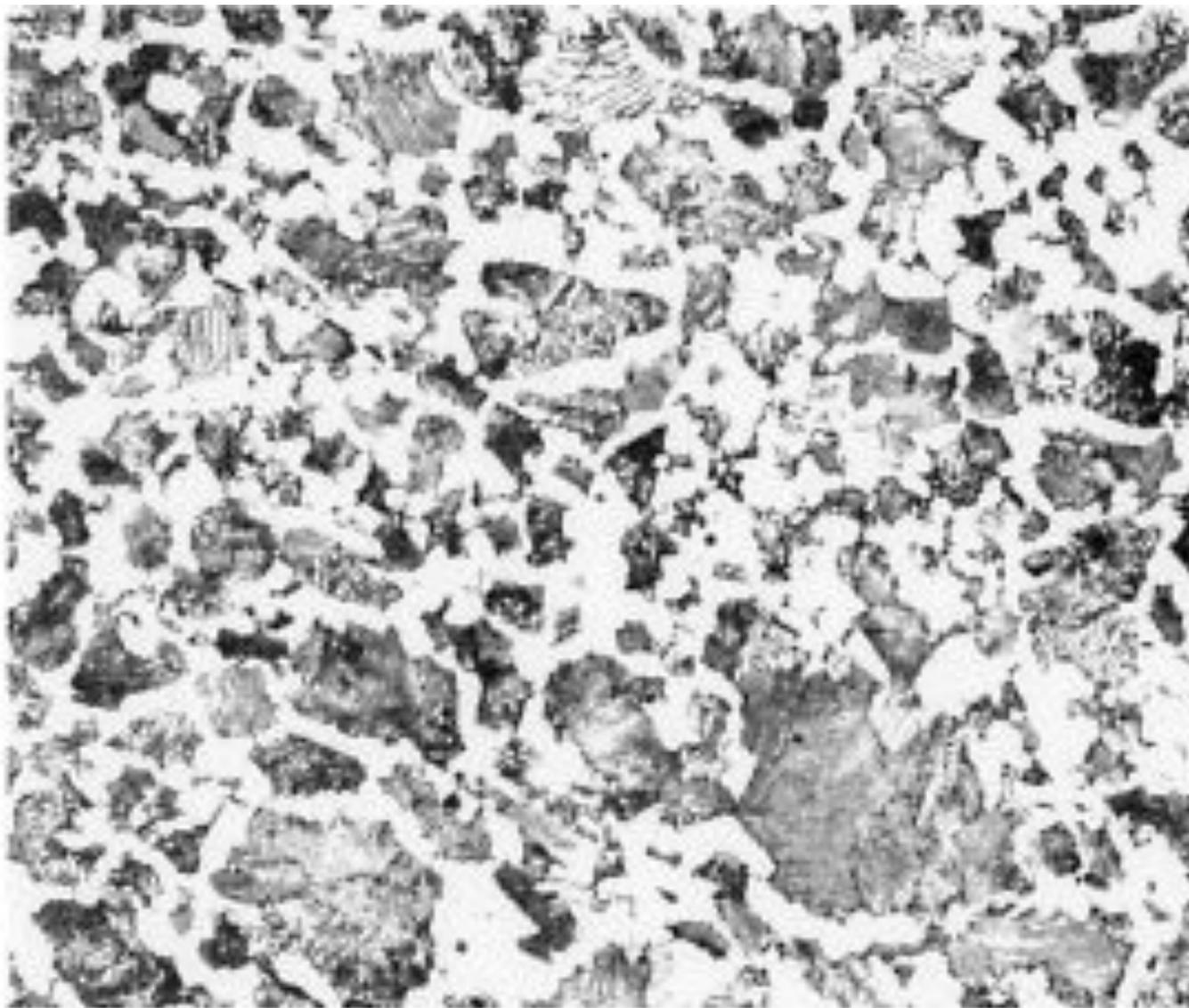
Доэвтектоидные стали



Имеют феррито-перлитную структуру.

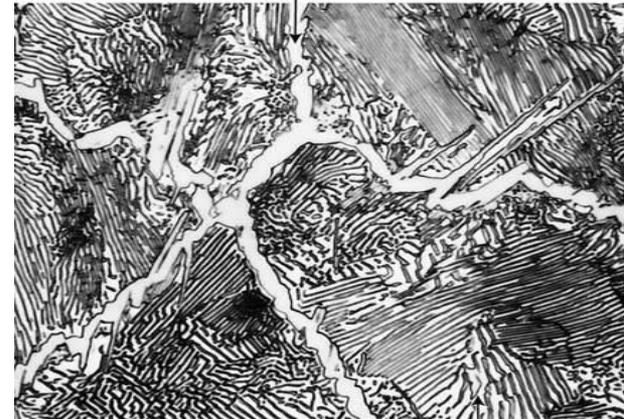
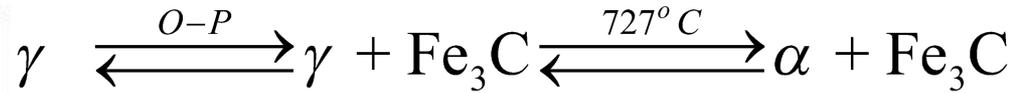
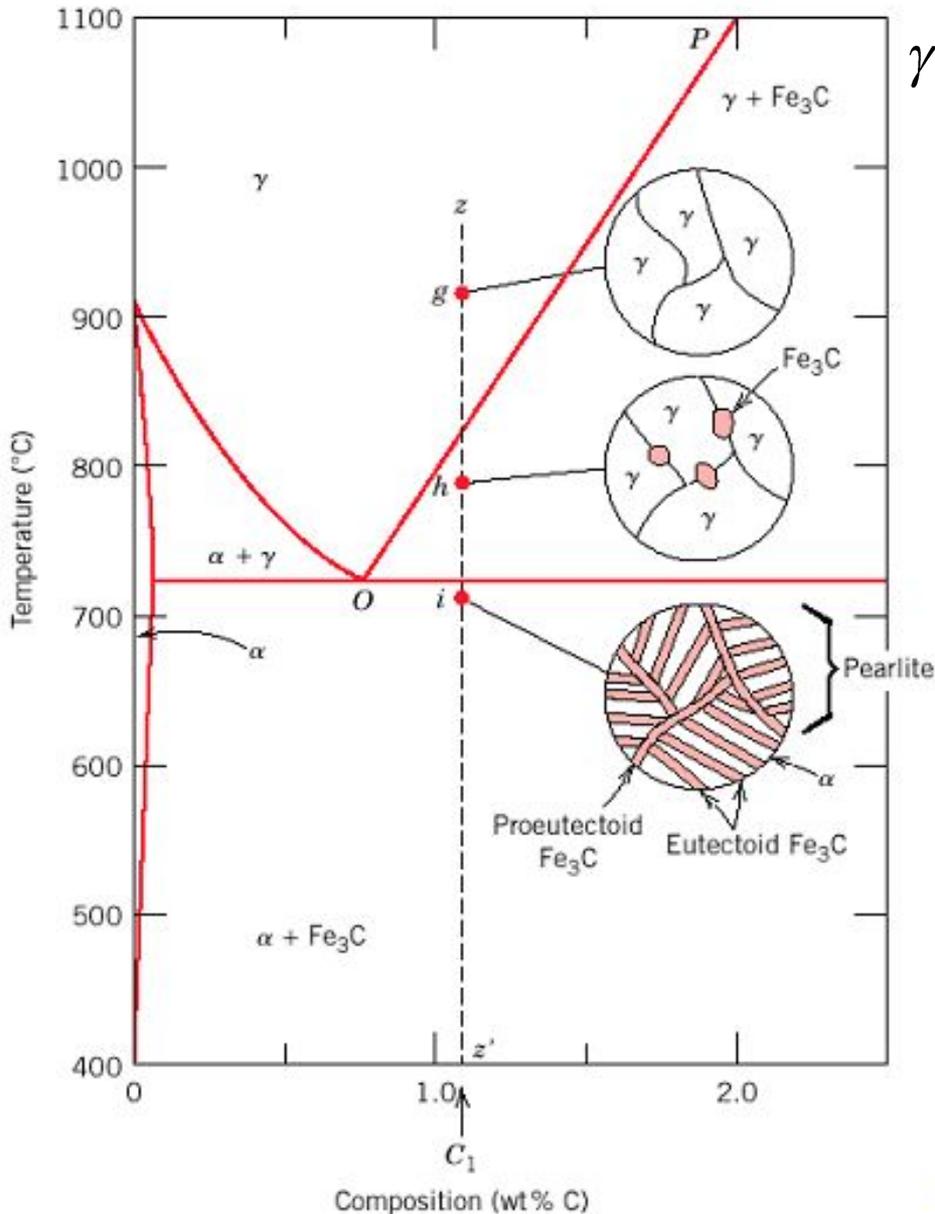
Перлит повышает прочность и снижает пластичность.

Идут на изготовление листового и профильного проката, машиностроительных деталей и, при высоком содержании углерода, изготавливают некоторый инструмент (молотки, топоры, стамески)



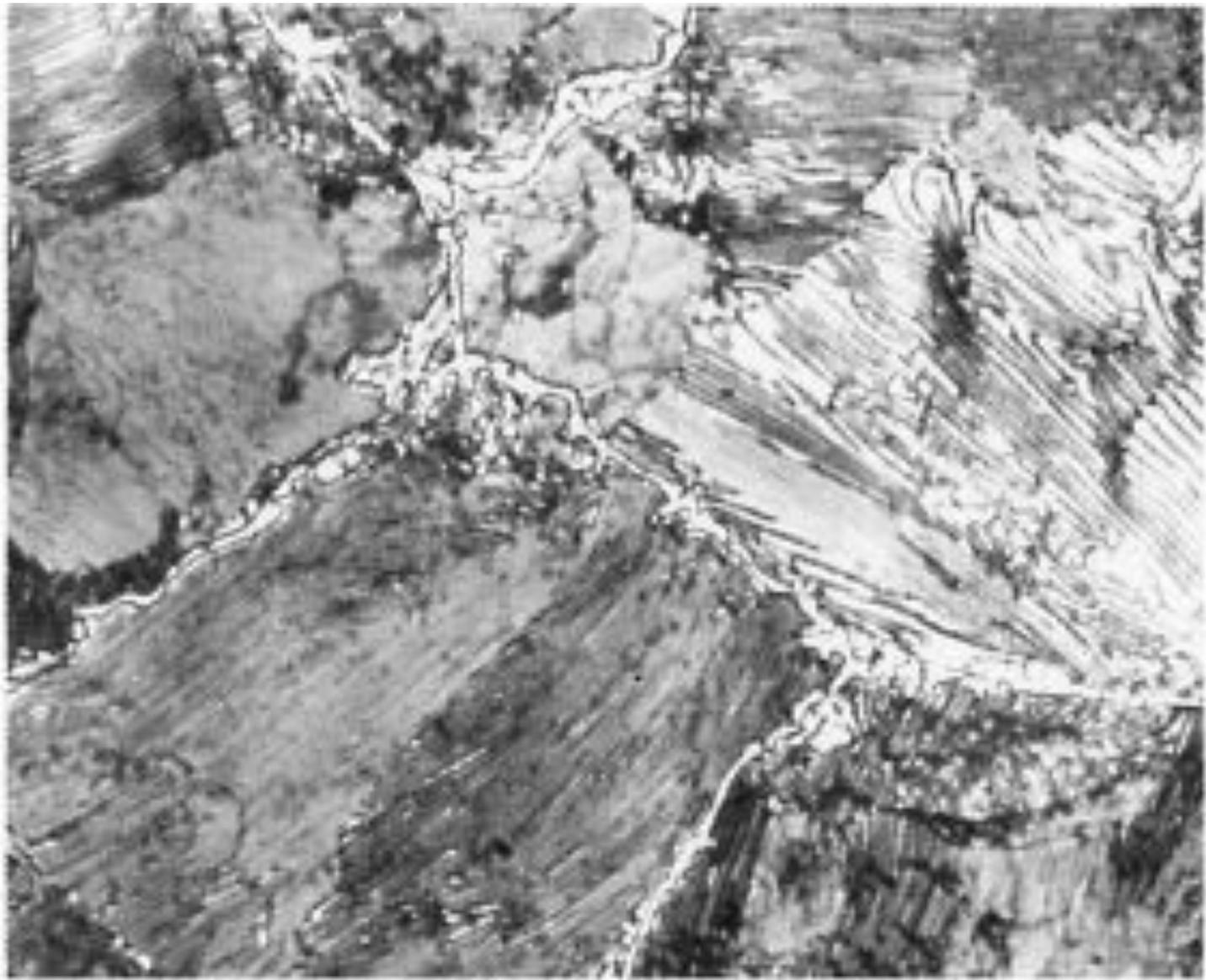
Доэвтектоидная сталь состоящая из феррита (белый)
располагающегося вокруг перлита (серый)

Заэвтектоидные стали

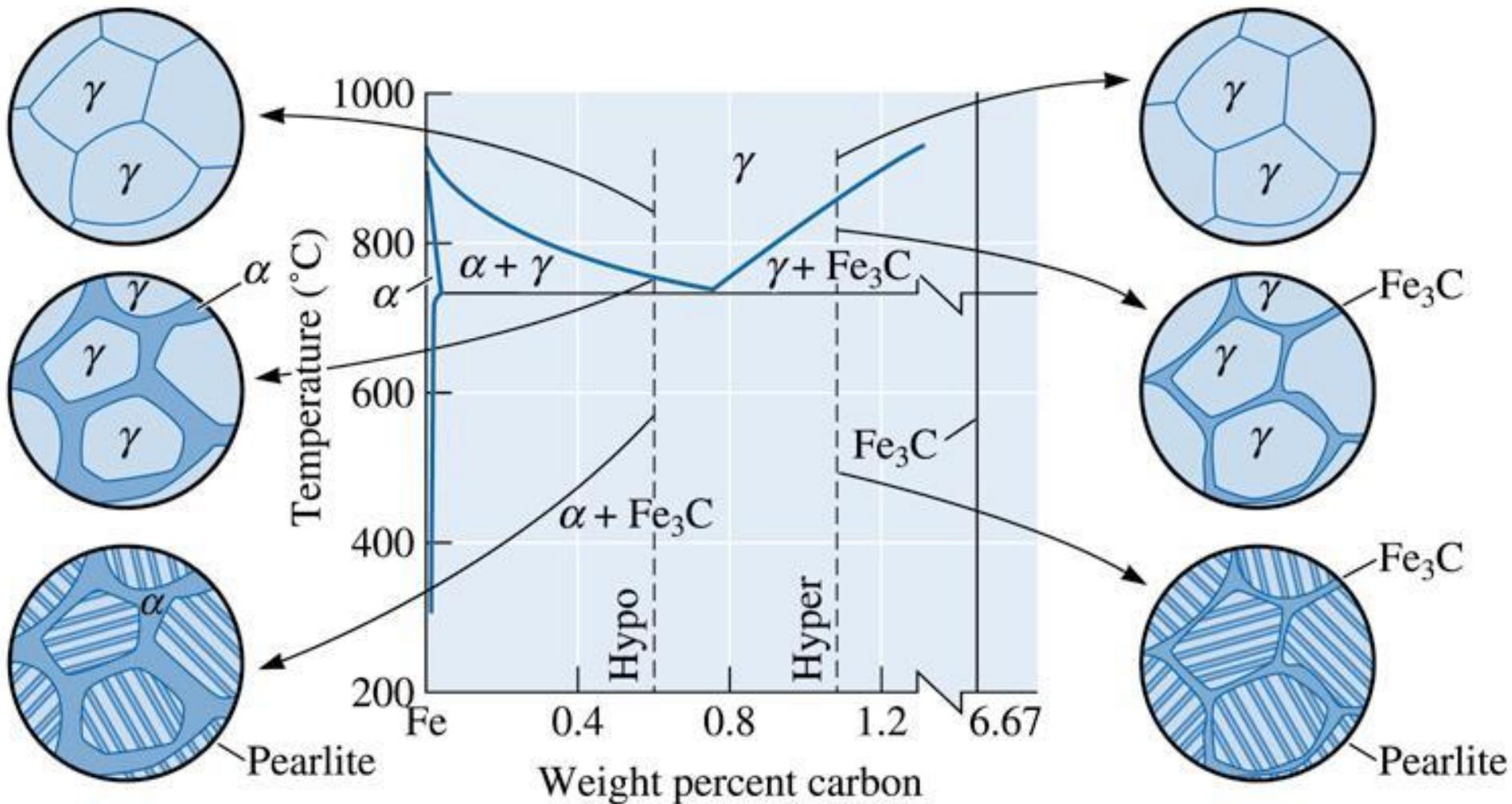


Наличие в структуре высокоуглеродистой стали цементита приводит к значительному повышению ее твердости и снижению пластичности по сравнению со среднеуглеродистой сталью.

Из высокоуглеродистой заэвтектоидной стали изготавливают, в основном, **режущий инструмент: метчики, фрезы, сверла, напильники, а также гравировальный и хирургический инструмент.**



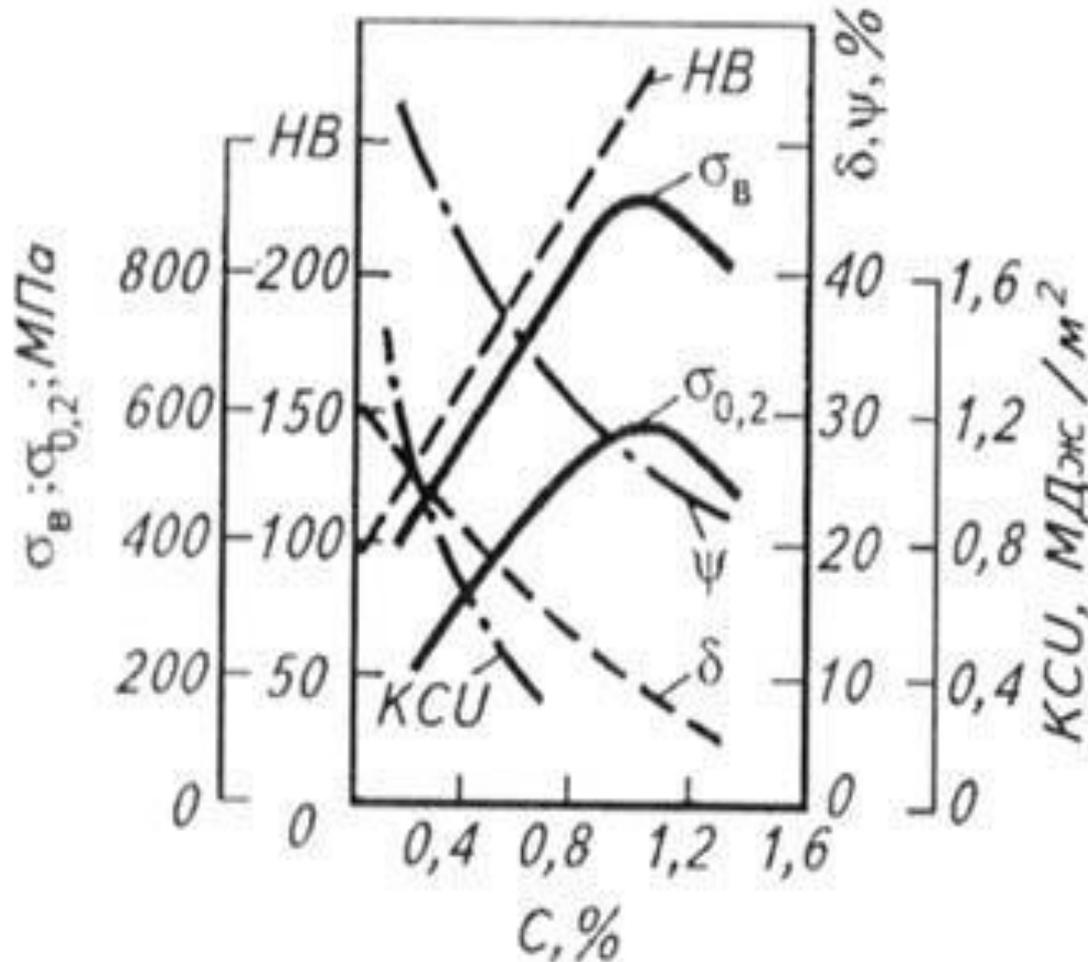
Заэвтектоидная сталь состоящая из цементита (белый) располагающегося вокруг перлита (серый)³³



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning_™ is a trademark used herein under license.

Изменение микроструктуры доэвтектоидной и заэвтектоидной стали в процессе охлаждения

Механические и физические свойства сталей



Термообработка и свойства сталей

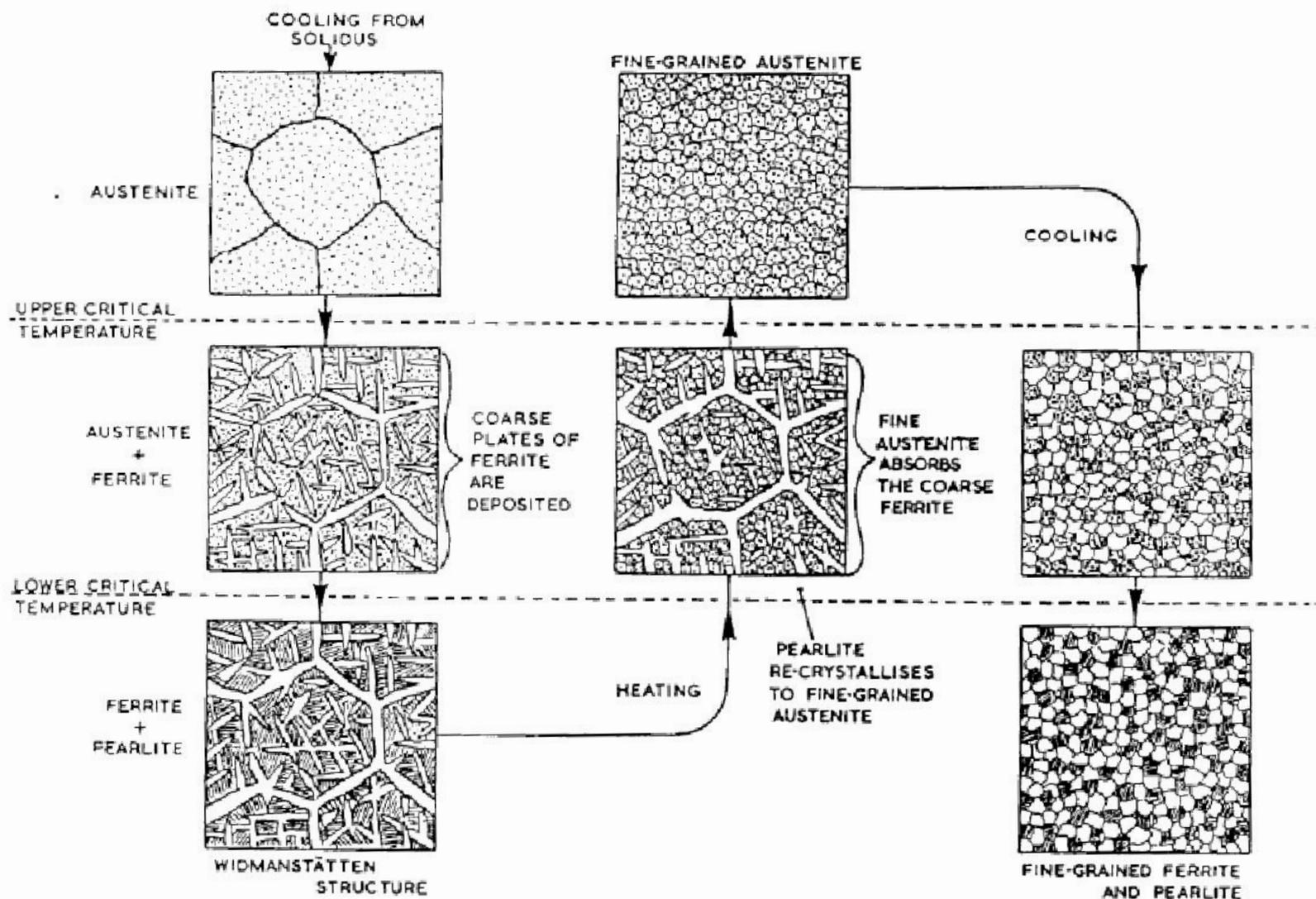


FIG. 11.9.—The Structural Effects of Heating a Steel Casting (Containing Approximately 0.35% Carbon) to a Temperature Just Above its Upper Critical, Followed by Cooling to Room Temperature.

Основная классификация сталей

- **По химическому составу:** углеродистые и легированные
 - Углеродистые:
 - низкоуглеродистые – до 0,35 % C
 - среднеуглеродистые – 0,35-0,70% C
 - высокоуглеродистые – 0,70-2,14% C
- Легированные:
 - низколегированные – до 1% легирующих элементов
 - среднелегированные – до 12% легирующих элементов
 - высоколегированные – до 40% легирующих элементов
- **- По назначению:**
 - конструкционные (для деталей машин, приборы);
 - инструментальные (для режущего инструмента, жаростойкие, жаропрочные)
- **- По степени раскисления:**
 - спокойные СП – раскисленные Mn. Si. Al;
 - полуспокойные ПС – промежуточные между СП и КП;
 - кипящие КП – раскисленные Mn.
- **- По качеству:**
 - обыкновенного качества $S < 0,05$; $P < 0,06$;
 - качественные $S < 0,04$; $P < 0,035$;
 - высококачественные $S, P < 0,025$;
 - особовысококачественные.



Виды стали

- **Сталь** представляет собой **сплав железа с углеродом**, в которой неизбежно будут находиться и другие примеси в виде различных элементов и их соединений.
- **Углеродистая сталь**, из которой изготавливают основную массу проволоки, не содержит специальных добавок, но всегда имеет небольшое количество неизбежных примесей. Кроме того, она может содержать небольшое количество никеля, хрома, меди и других элементов. Примеси попадают в сталь из руды, лома, топлива и раскислителей, применяемых при выплавке стали.
- **Конструкционная углеродистая сталь** содержит от **0,05 до 0,75 % С**. В зависимости от содержания углерода стали присваивают определенную марку.
- **Инструментальная углеродистая сталь** содержит от **0,60 до 1,25 % С**. Марки инструментальной углеродистой стали: **У7, У8, У9, У10 и У12**. Их обозначение также определяется содержанием углерода. Кроме того, широко используются высококачественные инструментальные углеродистые стали с пониженным содержанием серы и фосфора (вредных примесей). В конце обозначения таких сталей имеется еще буква А, обозначающая высокое качество (например, У8А, У10А и др.).
- **Автоматная сталь** с содержанием углерода от **0,08 до 0,45 %** отличается повышенным содержанием серы (0,08-0,3%) и фосфора (0,08-0,15%), что позволяет легче вести обработку резанием. Эта сталь используется для производства калиброванного металла.
- **Легированная сталь** содержит один или несколько легирующих элементов (хром, никель, марганец, вольфрам, молибден, ванадий, кобальт и др.), которые вводят с целью получения заданных свойств. Для удобства основные элементы, вводимые в легированную сталь, обозначают условно русскими буквами, а их количества - числами. Приняты следующие обозначения: Х, Н, Т, Г, П, М, Д, С, Ф, Ю, В, К.

Марки сталей:

Строительные: Ст3, 09Г2С, 10ХСНД

Арматурные: 25Г2С, 45С

Цементуемые: 10, 20, 15Х, 20ХН, 18ХГТ

Улучшаемые: 40, 45, 40ХН, 40ХГР, 30ХГТ

Рессоро-пружинные: 60, 65Г, 60С2, 50ХФА

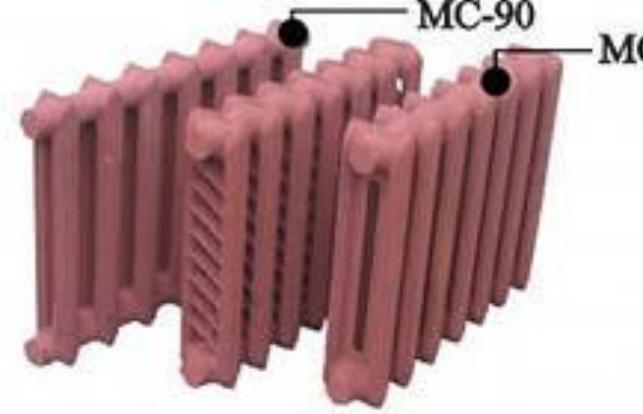
Высокопрочные: 03Н18К9М5Т, 03Н12К15М10

Подшипниковые: ШХ6, ШХ15, ШХ20СГ

Автоматные: А20, АС40, АС35Г2



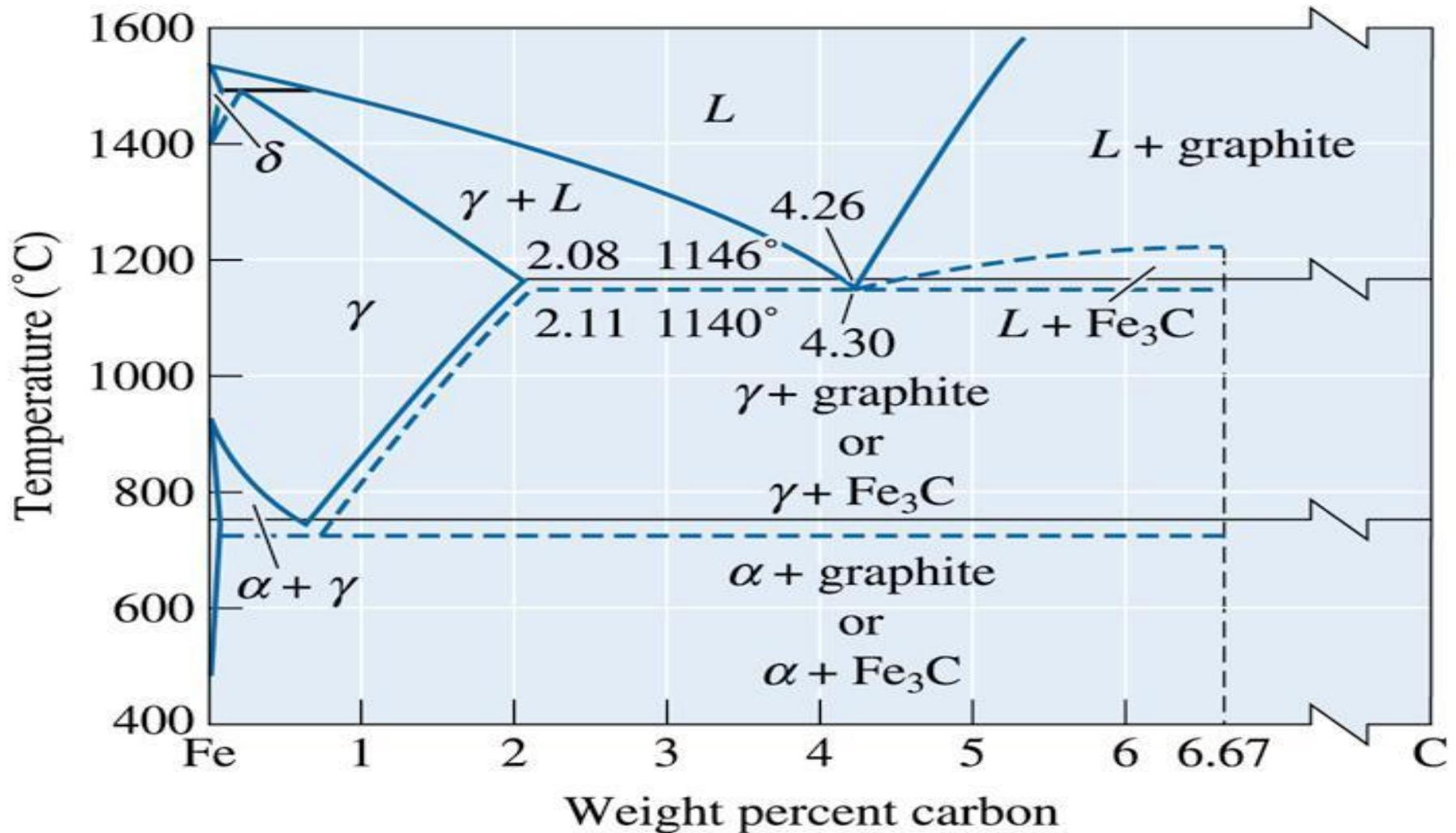
Часть 2
Чугуны



Чугуны

- Чугуны используются во многих отраслях народного хозяйства, они обладают лучшими, по сравнению со сталями, литейными свойствами, но плохо поддаются пластической деформации.
- Обладают достаточно высокой твердостью и стойкостью к истиранию, а так же относительно прочны.
- Производятся напрямую в доменных печах, поэтому содержат много углерода и кремния (1,5-3 мас.%). Гораздо *дешевле сталей*.
- Основные параметры, определяющие структуру:
 - Скорость охлаждения;
 - Состав.
- Равновесной является не диаграмма Fe-Fe₃C, а Fe-C (графит):
 - При медленном охлаждении достигается равновесие Fe-C
 - Быстрое охлаждение благоприятствует смещению равновесия к Fe-Fe₃C

Чугуны



Сравнение диаграммы равновесия системы железо-графит (сплошные линии) и метастабильной системы железо-цементит (пунктирные линии). Смещение

эвтектоидного состава и температур эвтектической и эвтектоидной реакции

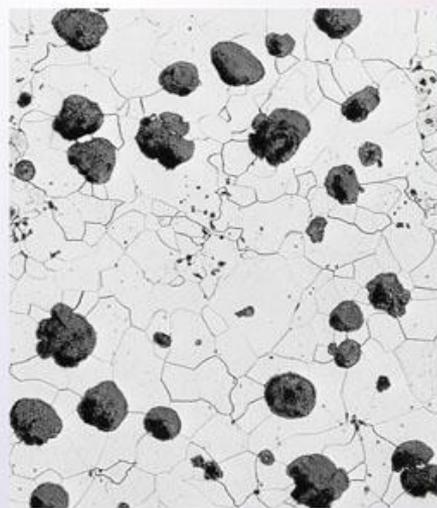
Виды чугунов

Чугун отличается от стали наличием включений графита. Между собой различаются по типу этих включений:

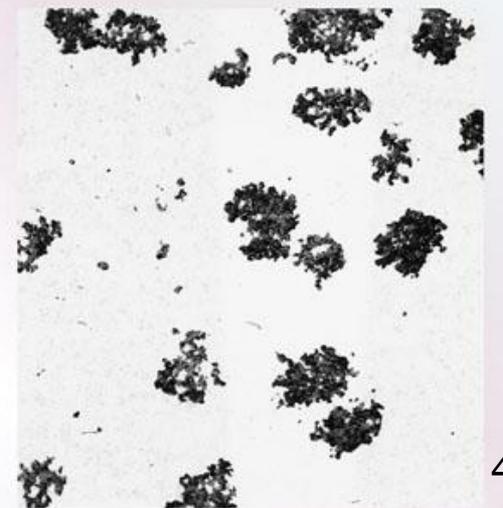
- Белый чугун – весь углерод связан в форме карбида.
- Серый чугун (а) – углерод в значительной степени или полностью содержится в свободном состоянии в виде *графита* (хлопьевидных, пластинчатых или волокнистых включений).
- Высокопрочный чугун (б) – углерод в значительной степени или полностью содержится в свободном состоянии в виде *шаровидного графита*.
- Ковкий чугун (с) – углерод в значительной степени или полностью содержится в свободном состоянии в виде *хлопьевидного графита*. Получается путем *графитизирующего отжига* белого чугуна.



(a)

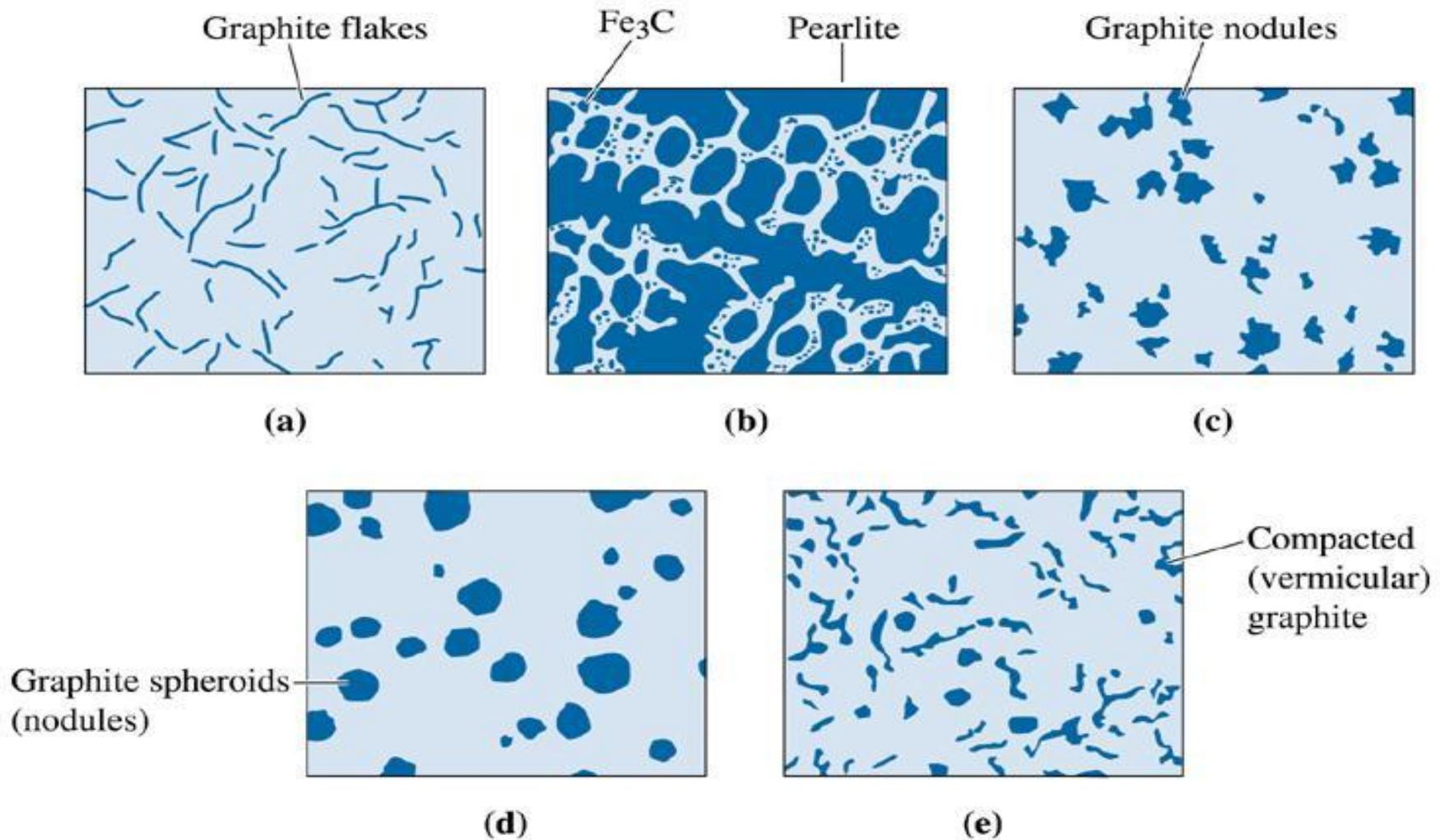


(b)



(c)

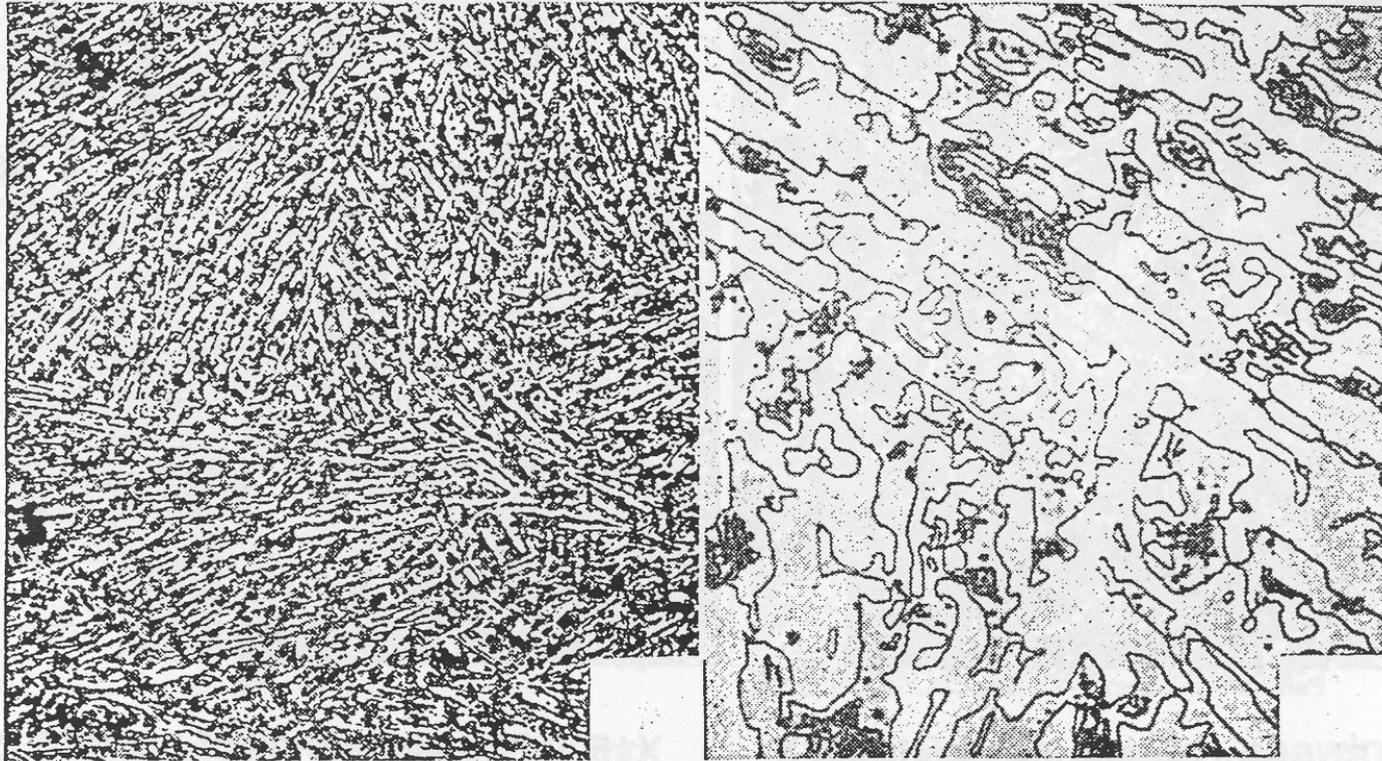
Формы выделения графита в чугунах



Схематическое изображение микроструктур чугунов: (a) серый чугун, (b) белый чугун, (c) ковкий чугун, (d) прочный чугун

Процесс графитизации

При медленном охлаждении в интервале температур от эвтектической до эвтектоидной реакций аустенит выделяет избыточный графит



X50 Completely eutectiferous

X150 Showing detail of eutectic

Micrograph of 4.30 % C White Cast Iron

Эвтектоидное превращение в белом чугуне

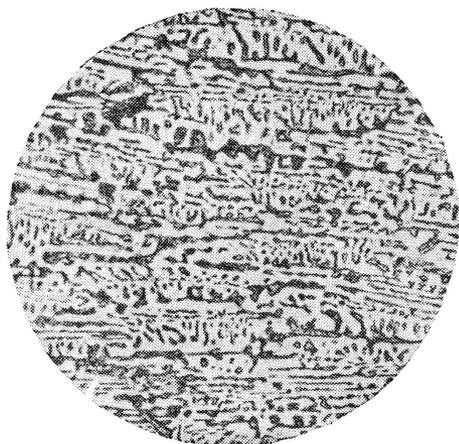
При охлаждении ниже эвтектоидной температуры аустенит превращается:

аустенит \square феррит+графит

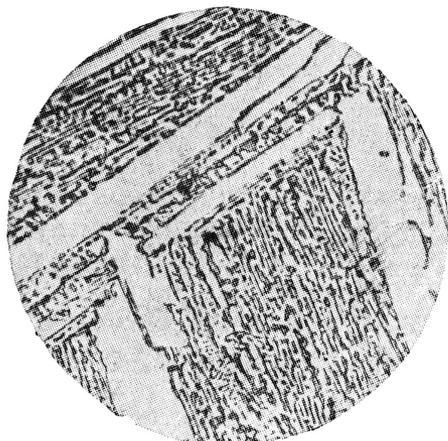
или

аустенит \square феррит+цементит (перлит)

В доэвтектическом белом чугуне – обычно происходит перлитное превращение. Эвтектический аустенит при охлаждении будет выделять избыточный углерод в форме цементита.



а



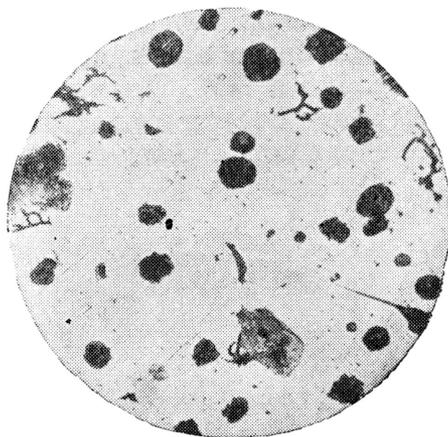
б



в



г



д

Микроструктуры чугуна:

а – ледебурит (эвтектический чугун); *б* – заэвтектический чугун,

в – доэвтектический чугун; *г* – половинчатый чугун;

д – шаровидный графит в чугуне

Серый чугун получают при медленном охлаждении металла при литье изделий, а также при повышенном содержании кремния, углерода. Применяется серый чугун для изготовления слабонагруженных деталей, работающих в легких условиях. *Например, корпуса редукторов, насосов, электродвигателей, различные крышки, отопительные батареи и т.п.*

Ковкий чугун получают из белого чугуна путем специального отжига. Это длительная термическая обработка, при которой белый чугун медленно нагревается до температур 950-1000 °С и после определенной выдержки медленно охлаждается. При таком отжиге происходит графитизация цементита белого чугуна с образованием хлопьевидных включений графита. Ковкий чугун применяется для изготовления деталей, работающих в более тяжелых условиях - при повышенных нагрузках, при знакопеременных и небольших ударных нагрузках. *Например, картеры редукторов, коробок передач автомобилей, кронштейны рессор, различные крюки, фланцы и т.п.*

Высокопрочный чугун получают путем модифицирования его при выплавке магнием или церием в количестве 0,05 %. Модификаторы способствуют формированию шаровидных включений графита. Применяется высокопрочный чугун для изготовления ответственных деталей, работающих в довольно сложных условиях при повышенном нагружении.

Например, коленчатые и распределительные валы легковых автомобилей, прокатные валки, корпуса турбин, детали кузнечно-прессового оборудования и др.

Для работы в специфических условиях (агрессивные среды, высокие температуры) используют чугуны специального назначения - **легированные чугуны**. Они дешевле легированных сталей и вследствие лучших литейных свойств оказываются предпочтительнее для получения отливок.

Маркировка чугунов с графитными включениями

Обозначаются чугуны первыми буквами слов их названия, после которых следуют цифры, показывающие предел прочности при растяжении σ_B в кг/мм² (0,1МПа). Для ковких чугунов вторая цифра показывает относительное удлинение δ в %.

Например

Серый чугун – **СЧ 12** ($\sigma_B = 12$ кг/мм²).

Высокопрочный чугун – **ВЧ 40** ($\sigma_B = 40$ кг/мм²).

Ковкий чугун – **КЧ 30-6** ($\sigma_B = 30$ кг/мм², $\delta = 6$ %).

Спасибо за внимание, вопросы?

