

## Б. Отжиг для снятия остаточных (внутренних) напряжений.

Проблема: в полуфабрикатах, неравномерно охлаждающихся после горячей прокатки иликовки, в холоднодеформированных полуфабрикатах, в сварных соединениях, при закалке и т.д. образуются напряжения (остаточные, тепловые, структурные), которые нежелательны (т.к. могут привести к короблению и разрушению).

Решение: необходимо повысить подвижность дефектов

Рычаг воздействия: отжиг для снятия остаточных (внутренних) напряжений

$$t_{\text{отж. для сн. ост. напр.}} \cong 1/3 * t_{\text{плавл}} \quad \tau_{\text{выд.}} - \text{разные}$$

*а какие конкретно температуры и  $\tau_{\text{выд.}}$ ? – смотря какой сплав.*

## В. Рекристаллизационный отжиг

Проблема: устранение наклёпа

Решение: необходимо обеспечить протекание рекристаллизации

Рычаг воздействия: рекристаллизационный отжиг

$$t_{\text{рекр.отж.}} > t_{\text{рекрис.}} = t_{\text{рекрис.}} + t \quad \tau_{\text{выд.}} - \text{разные}$$

*а на сколько нагреть и какие  $\tau_{\text{выд.}}$ ? – смотря какой сплав.*

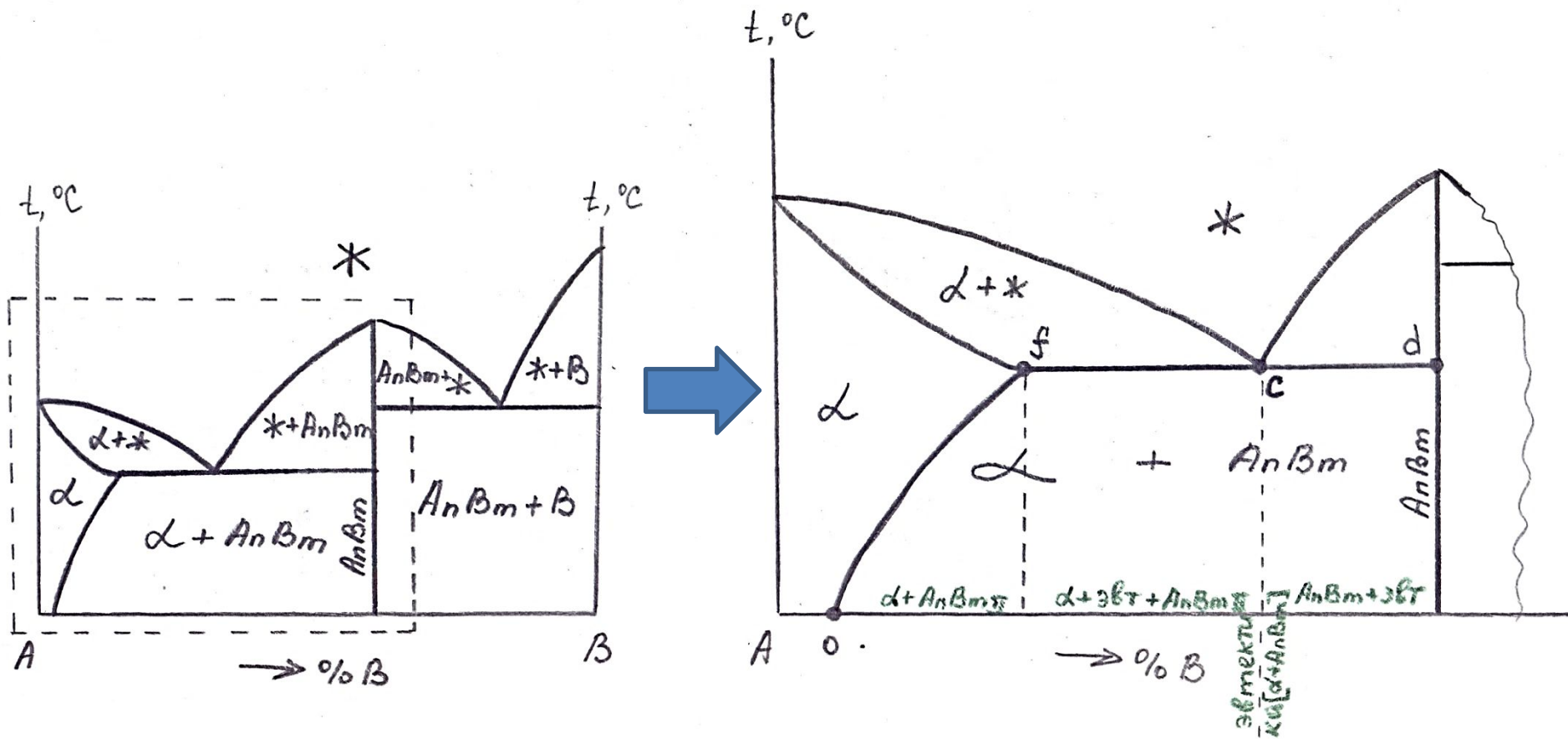
Если наклёп надо сохранить, то необходимо обязательно снять внутренние напряжения.

Рычаг воздействия: дорекристаллизационный отжиг

$$t_{\text{дорекр.отж.}} < t_{\text{рекрис.}}$$

### § 3. Т.О. сплавов, имеющих ограниченную переменную растворимость компонентов в твёрдом состоянии

Сплавы: Al-Cu, Cu-Be, Ni-Al, и др.



Компоненты: А и В

Фазы: ж – расплав

$A_nB_m$  - промежуточная фаза; кристаллы В

$\alpha$  – твёрдый раствор замещения с ограниченной растворимостью

$$\left(\frac{|R_A - R_B|}{R_A} \leq 8 \div 15 \%\right)$$

Линия of – линия переменной растворимости, которая показывает, что при понижении температуры растворимость атомов компонента В в  $\alpha$  твёрдом растворе снижается, это приводит к выделению вторичных кристаллов промежуточной фазы  $A_nB_{mII}$  в твёрдом растворе, обогащённых атомами В.

Линия fcd – линия эвтектического превращения



Т.О. сплавов, имеющих ограниченную переменную растворимость компонентов в твёрдом состоянии, основана на изменении растворимости соединений в основном твёрдом растворе.

### § 3.1. Превращения в сплавах при нагреве и охлаждении

Рассмотрим сплав  $x_3$  при нагреве:  $t, ^\circ\text{C}$

при  $t_0$  фаз две –  $\alpha$  и  $A_nB_m$

$$\frac{\alpha}{A_nB_m} = \frac{n}{m}$$

при  $t_1$  фаз две –  $\alpha$  и  $A_nB_m$

$$\frac{\alpha}{A_nB_m} = \frac{n}{m'}$$

при  $t_2$  фаз две –  $\alpha$  и  $A_nB_m$

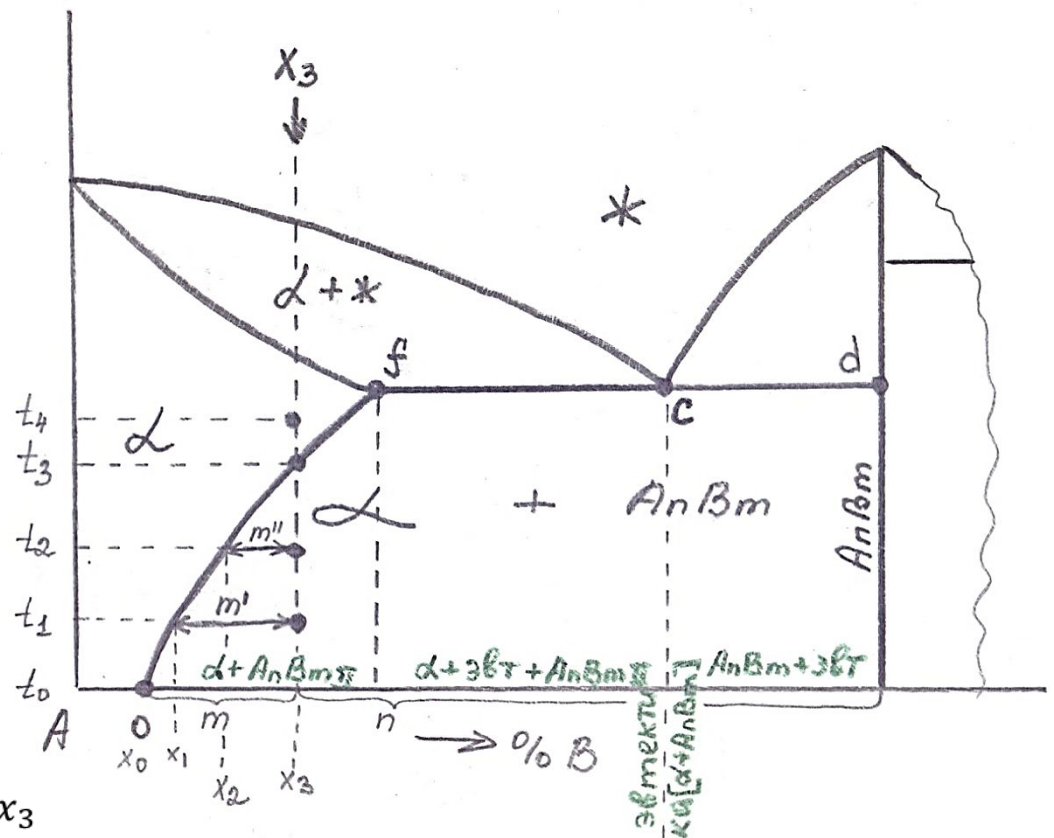
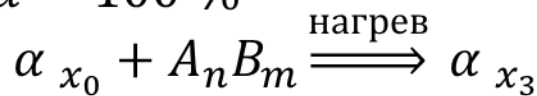
$$\frac{\alpha}{A_nB_m} = \frac{n}{m''}$$

при  $t_3$  фаза одна –  $\alpha$   $x_3$

$$\alpha = 100\%$$

при  $t_4$  фаза одна –  $\alpha$   $x_3$

$$\alpha = 100\%$$



При повышении температуры количество вторичных кристаллов  $A_nB_m$  уменьшается вплоть до их полного растворения, в результате твёрдый раствор  $\alpha$  обогащается атомами В.

при  $t_0$  растворимость атомов В в  $\alpha$  тв. растворе равна  $x_0$

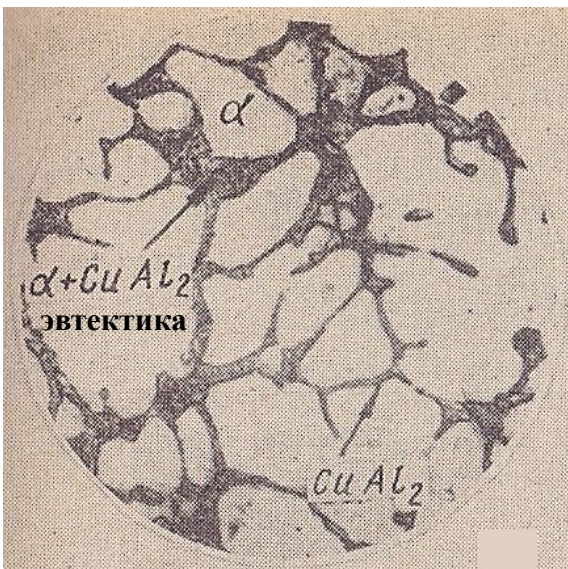
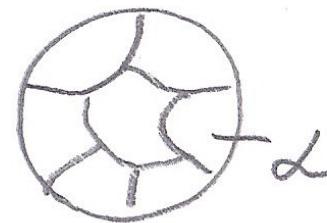
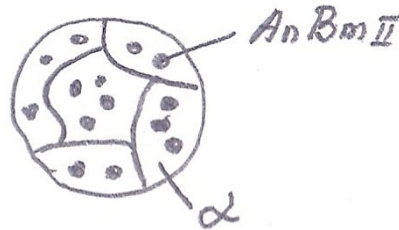
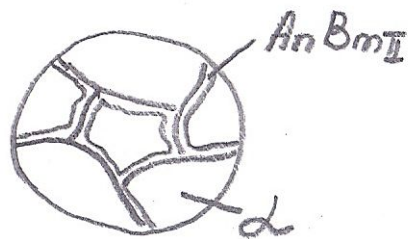
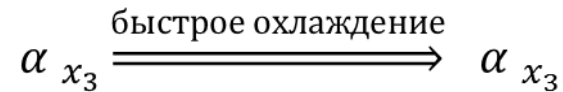
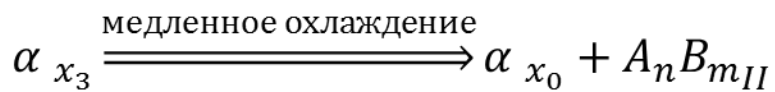
при  $t_4$  растворимость атомов В в  $\alpha$  тв. растворе равна  $x_3$

пересыщенный  
атомами В  $\alpha$  тв.

раствор замещения  
степень

пересыщения  $x_3 - x_0$

Рассмотрим сплав  $x_3$  при охлаждении:



сплав Al-Cu (4 % Cu), x1000

сплав Al-Cu (4 % Cu),  
x100

сплав Al-Cu (12 % Cu), x1000

В результате медленного охлаждения сплавы приобретают равновесную структуру (кристаллы твёрдого раствора и вторичной фазы), имеют низкую прочность и высокую пластичность.

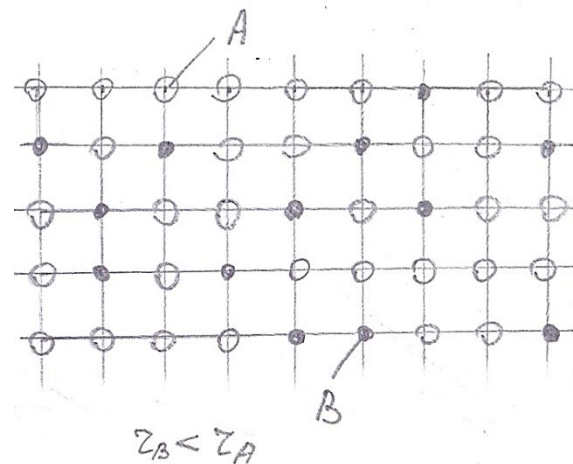
В результате быстрого охлаждения сплавы приобретают неравновесное структурное состояние (пересыщенный твёрдый раствор), имеют пониженную (min) прочность и повышенную (max) пластичность. Такое структурное состояние является стабильным до тех пор пока сплав остаётся «ХОЛОДНЫМ» (т.е. в нём не протекают процессы диффузии).

## § 3.2. Изменение структуры и свойств сплавов при распаде пересыщенного твёрдого раствора в результате его нагрева.

При нагреве сплавов со структурой пересыщенного твёрдого раствора активируются процессы диффузии и происходит распад пересыщенного твёрдого раствора. Процесс распада пересыщенного твёрдого раствора называют старением. В результате старения должна выделяться фаза  $A_nB_m$ , которая имеет свою КР и богаче по содержанию атомами В, чем  $\alpha$  тв. раствор.

Старение протекает в несколько стадий.

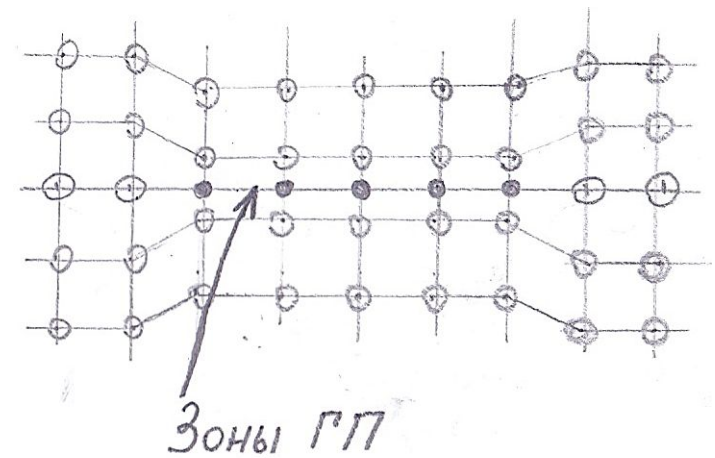
после закалки – структура пересыщенного атомами В  $\alpha$  твёрдого раствора замещения.



Тип выделения, образующегося при нагреве зависит от параметров нагрева (температура и время выдержки). Для образования определённых типов выделений требуется преодолеть определённый энергетический барьер – энергию активации. Энергия активации будет тем большей, чем большая разница в кристаллическом строении типа выделения и  $\alpha$  твёрдого раствора. При увеличении температуры повышается  $E_{\text{кин}}$  атомов и возможно преодоление большей энергии активации.

I стадия – образование зон Гинье-Престона  
(зон Г-П)

В результате перемещения атомов В внутри кристаллической решётки  $\alpha$  тв. раствора на малые расстояния образуются микрообласти (в виде дисков), обогащённые атомами В. Эти микрообласти называют зонами Гинье-Престона (зонами Г-П).



В начале I стадии образуются небольшие зоны Г-П, называемые зонами Г-П I; их размеры: толщина 5-10 Å, диаметр 30-60 Å; располагаются хаотично по всем системам плоскостей КР  $\alpha$  тв. раствора.

К концу первой стадии образуются зоны Г-П II; в этих зонах содержится больше атомов компонента В (близкое к концентрации вторичных кристаллов  $A_nB_{m_{II}}$ ); они имеют большие размеры: толщина 10-40 Å, диаметр 200-300 Å; располагаются в определённых плоскостях КР  $\alpha$  тв. раствора и на определённом расстоянии друг от друга.

Процесс образования зон Г-П I  $\rightarrow$  зон Г-П II называется зонным старением.



В результате зонного старения КР  $\alpha$  тв. раствора искажена, что даёт дополнительное упрочнение. Чем сильнее разница в атомных радиусах компонентов А и В и чем сильнее пересыщен  $\alpha$  тв. раствор атомами В, тем выше упрочнение.

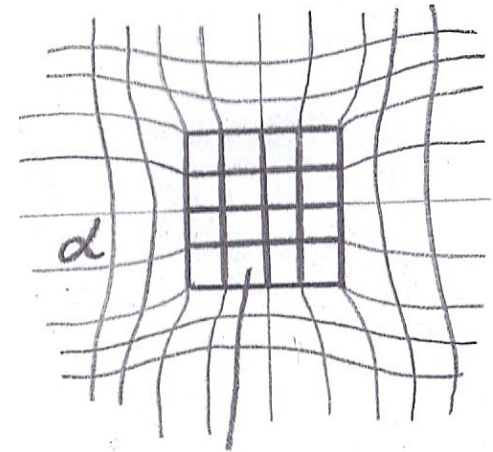
II стадия – образование метастабильной фазы  $A_nB_m'$

Метастабильная фаза:

- по химическому составу близка к  $A_nB_m$ ;
- по типу КР другая, но близка к  $\alpha$  тв. раствору по периоду КР;
- КР метастабильной фазы и  $\alpha$  тв. раствора связаны когерентно;
- размер частицы 50-150 Å.

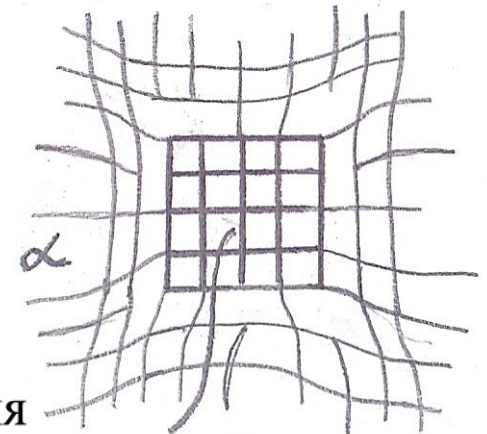
В результате когерентной связи  $\alpha$  тв. раствора и метастабильной фазы КР  $\alpha$  тв. раствора сильнейшим образом искажена, что создаёт сильное упрочнение.

При дальнейшем росте метастабильной фазы происходит частичные нарушения когерентной связи, такую связь называют полукogerентной; частично снимаются искажения и прочность начинает падать.



метастабильная фаза

когерентная связь



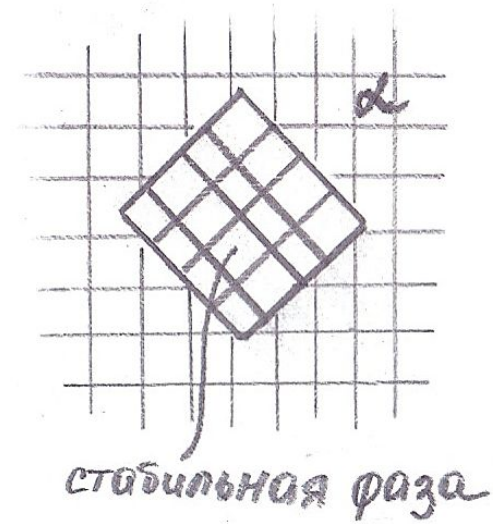
метастабильная фаза

полукogerентная связь

III стадия – образование частиц стабильной фазы  $A_nB_m$

Стабильная фаза:

- имеет химический состав  $A_nB_m$ ;
- по типу КР другая, большая разница в периоде с КР  $\alpha$  тв. раствора;
- КР стабильной фазы и  $\alpha$  тв. раствора связаны некогерентной связью;
- размер частицы 200-500 Å.



некогерентная связь

В результате полного нарушения когерентной связи снимаются искажения КР  $\alpha$  тв. раствора, что приводит к уменьшению прочности.

IV стадия (стадии нет конца) – коагуляция (укрупнение) частиц стабильной фазы  $A_nB_m$  и дальнейшее уменьшение прочности вследствие коагуляции.

Процесс образования метастабильной фазы  $A_nB_m' \rightarrow$  стабильной фазы  $A_nB_m$  называется фазовым старением. Процесс коагуляции стабильной фазы называется перестариванием.

изменения в микроструктуре

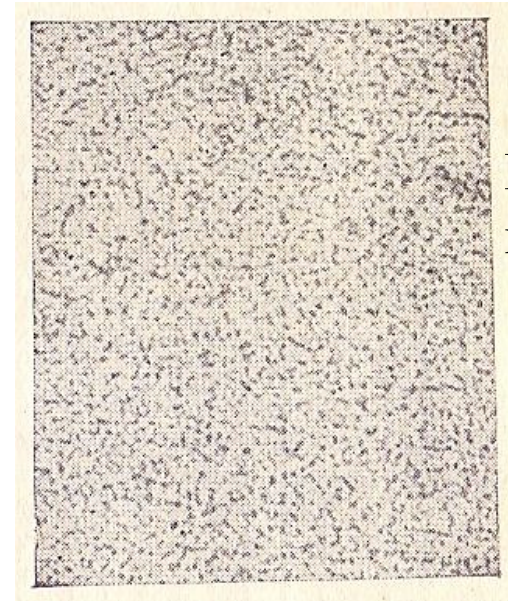
зональное старение



Не видны !  
Видны только в  
электронный  
микроскоп  
(тонкая  
структура)

сплав Al-Cu (4 % Cu), x100

фазовое старение



Видны в  
микроскоп !

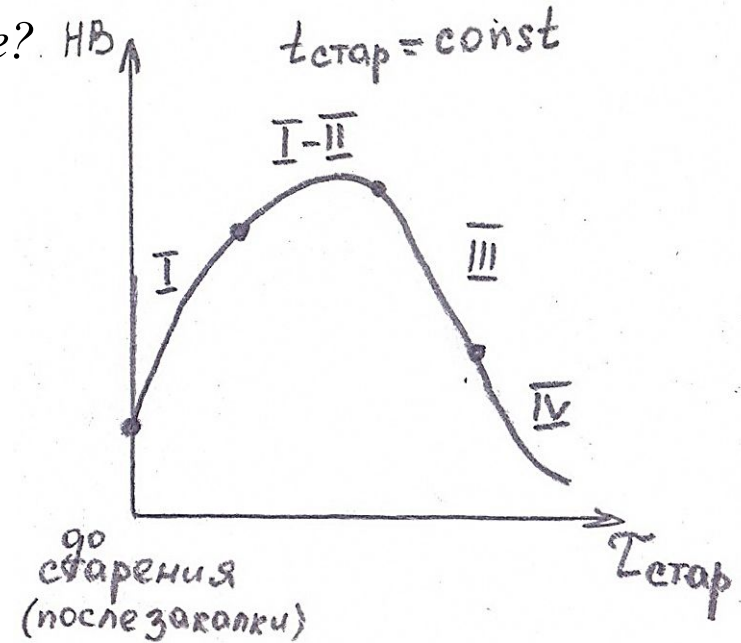
сплав Al-Cu (4 % Cu), x900

У сплавов, имеющих ограниченную переменную растворимость компонентов в твёрдом состоянии при распаде пересыщенного твёрдого раствора протекают схожие превращения, поэтому у всех у них будет схожий характер изменения свойств.

На какой стадии получают max упрочнение?  $HВ$

- Смотря какой сплав.

Чаще всего в районе I и II стадий (для Al сплавов – на I стадии, для Cu сплавов – на I-II)



## § 3.2. Упрочняющая Т.О. сплавов с переменной растворимостью.

Состоит из двух операций:

### А. Закалка сплавов

Цель: получить пересыщенный твёрдый раствор замещения

Условия проведения:

- нагрев:  $t_{\text{нагрева}} > t_{of}$  (для сплавов от т. о до т. f)



немного [рядом жидкость; чтобы зерно не росло] выше [растворить полностью  $A_nB_m$ ]

$t_{\text{нагрева}} < t_{\text{эвтектич.превращ.}}$  (для сплавов от т. f до т. d)



немного [рядом жидкость; чтобы не избавиться от эвтектики] ниже [растворить по максимуму  $A_nB_m$ ]

- выдержка: растворить всю фазу  $A_nB_m$

- охлаждение: в воде

Структура: пересыщенный твёрдый раствор замещения со степенью пересыщения  $x - x_0$

Свойства: min прочность и max пластичность → закалку выполняют в заготовках, а затем проводят их механическую обработку.

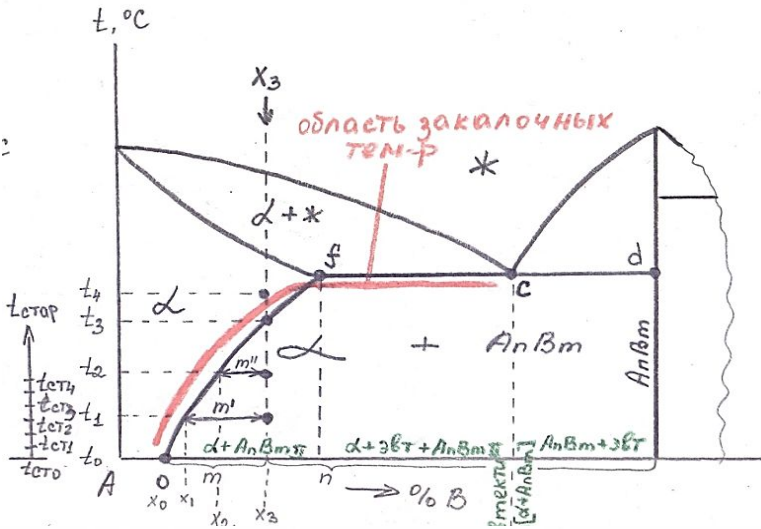


# Б. Старение

Цель: получение макс прочности; выполняется на уже готовых деталях;

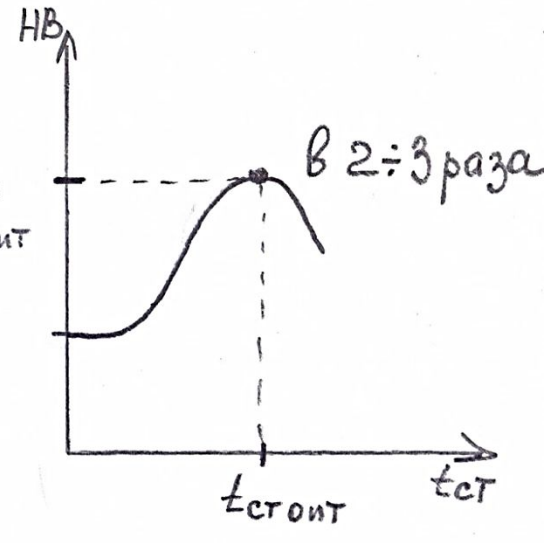
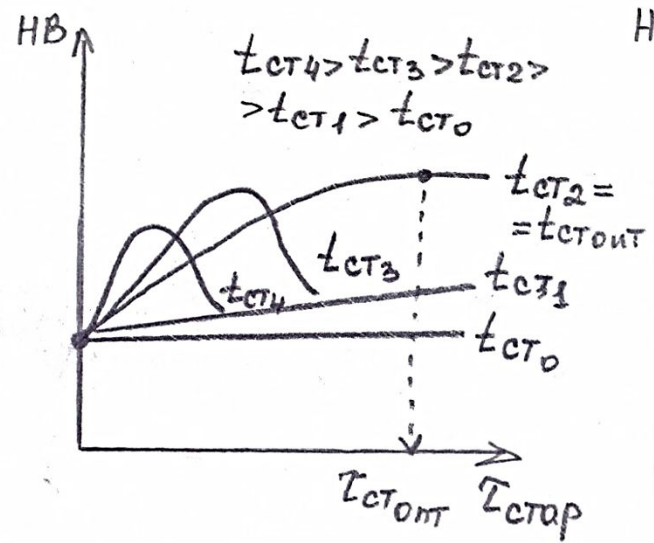
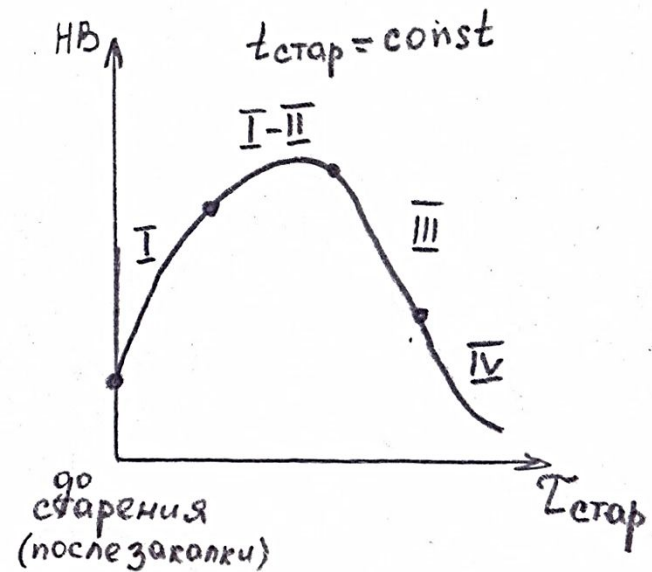
Условия проведения:

- нагрев: *А что зависит от температуры старения?* - Всё!



$t_{стар 2}$  - оптимальная температура старения, ей соответствует оптимальная  $\tau_{стар опт}$

- выдержка:  $\tau_{стар опт}$ ;
- охлаждение: воздух.
- свойства: макс прочность.



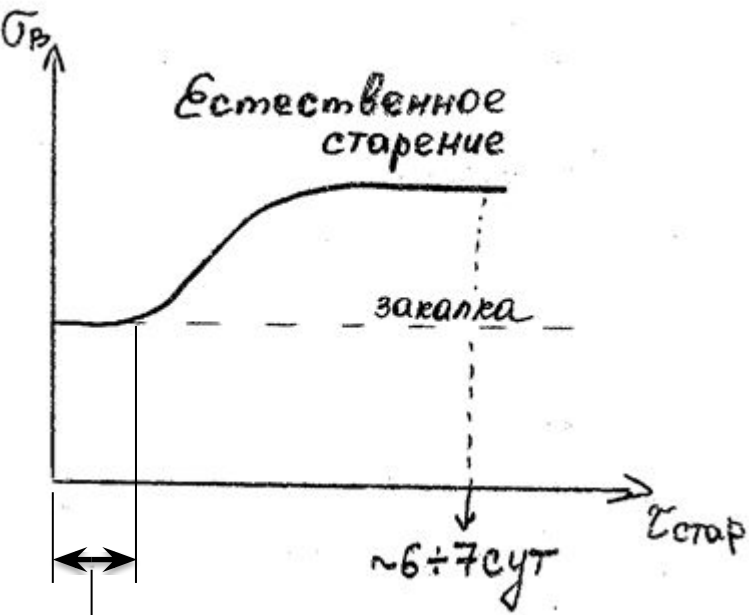
(лопатки ГТД) сплавы Ni-Al  
 (супер пружины) сплавы Cu-Be  
 дюралюмины Al-Cu

$t_{\text{стар опт}} + \tau_{\text{стар опт}}$   
 $\sim 750 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$      $\sim 10 \div 15 \text{ час}$   
 $320 \text{ }^\circ\text{C}$      $4 \div 6 \text{ час}$   
 $t_{\text{КОМН}}$  [или  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ ]     $\sim 4 \text{ сут}$  [ $4 \div 6 \text{ час}$ ]

технологическое  
 разделение процесса  
 старения

естественное старение

искусственное старение



Инкубационный период – сплав имеет max пластичность и min прочность (~ несколько час.)

В случае, если после протекания естественного старения требуется вернуться к свежезакалённому состоянию и восстановить пластичность используют обработку «на возврат»:

кратковременный (1-2 мин) нагрев до  $\sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$  и быстрое охлаждение

В результате зоны Г-П растворяются, а фазовое старение не успевает пройти за короткий промежуток времени.

Однако в тонкостенных изделиях снижается коррозионная стойкость, а в толстостенных – не успевает восстановиться пластичность по всему сечению.



Сплавы с переменной растворимостью (или стареющие сплавы, или дисперсионно-твердеющие сплавы)

Цели Т.О.

разупрочнить

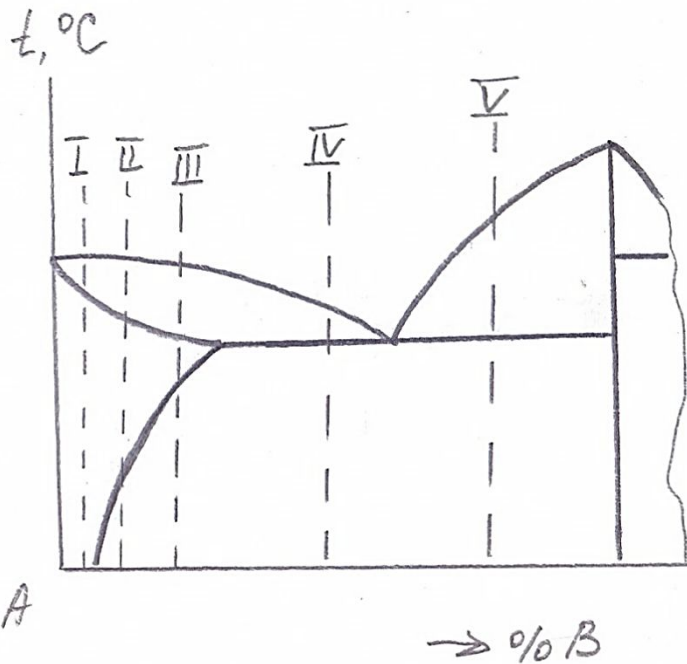
упрочнить

для механической обработки

закалка + [механическая обработка] + старение

↓  
отжиг

нерационально, как правило не делают



I, II, III, IV и V сплавы

Какие сплавы нельзя упрочнить? I

Какие сплавы можно упрочнить? II, III, IV и V

Какие сплавы можно хорошо упрочнить? II и III

Какие сплавы испытывают самое сильное упрочнение? III

## § 4. Т.О. сплавов, компоненты которых имеют полиморфное превращение

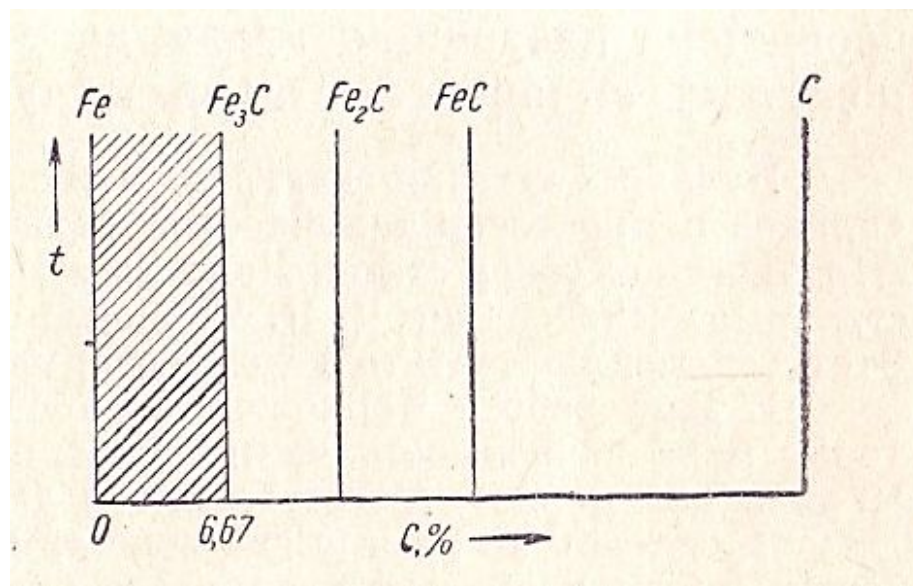
Полиморфное превращение наблюдается во многих сплавах: в сталях, чугунах, в двухфазных алюминиевых бронзах, в сплавах на основе титана и др.

Принципы Т.О. для таких сплавов одни и те же, разница только в некоторых особенностях фазового превращения.

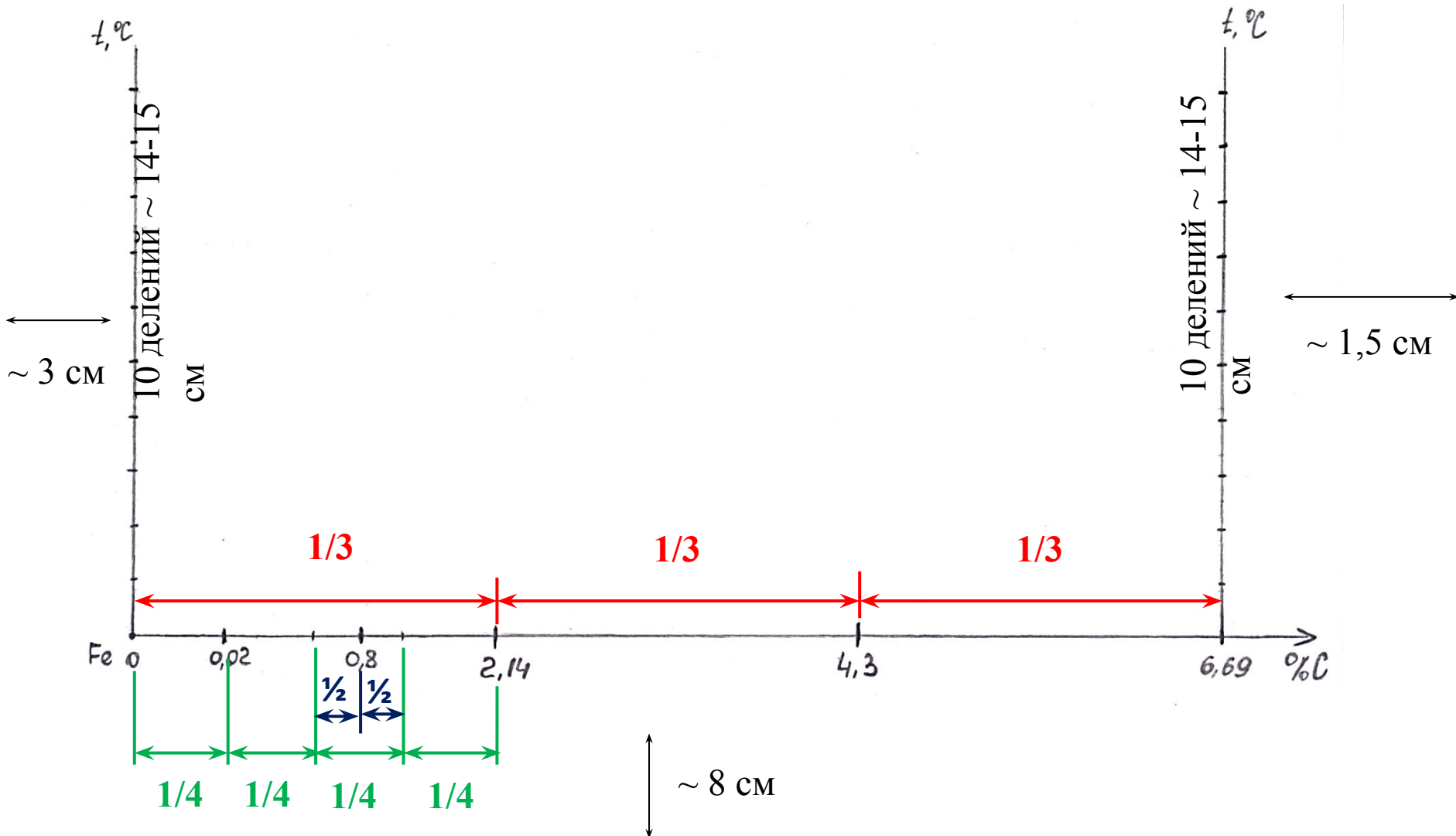
*Т.О. для таких сплавов будем изучать на примере*

*сплавов железо (Fe) – углерод (C)*

### § 4.1. Диаграмма состояния сплавов Fe-C (участок Fe-Fe<sub>3</sub>C)



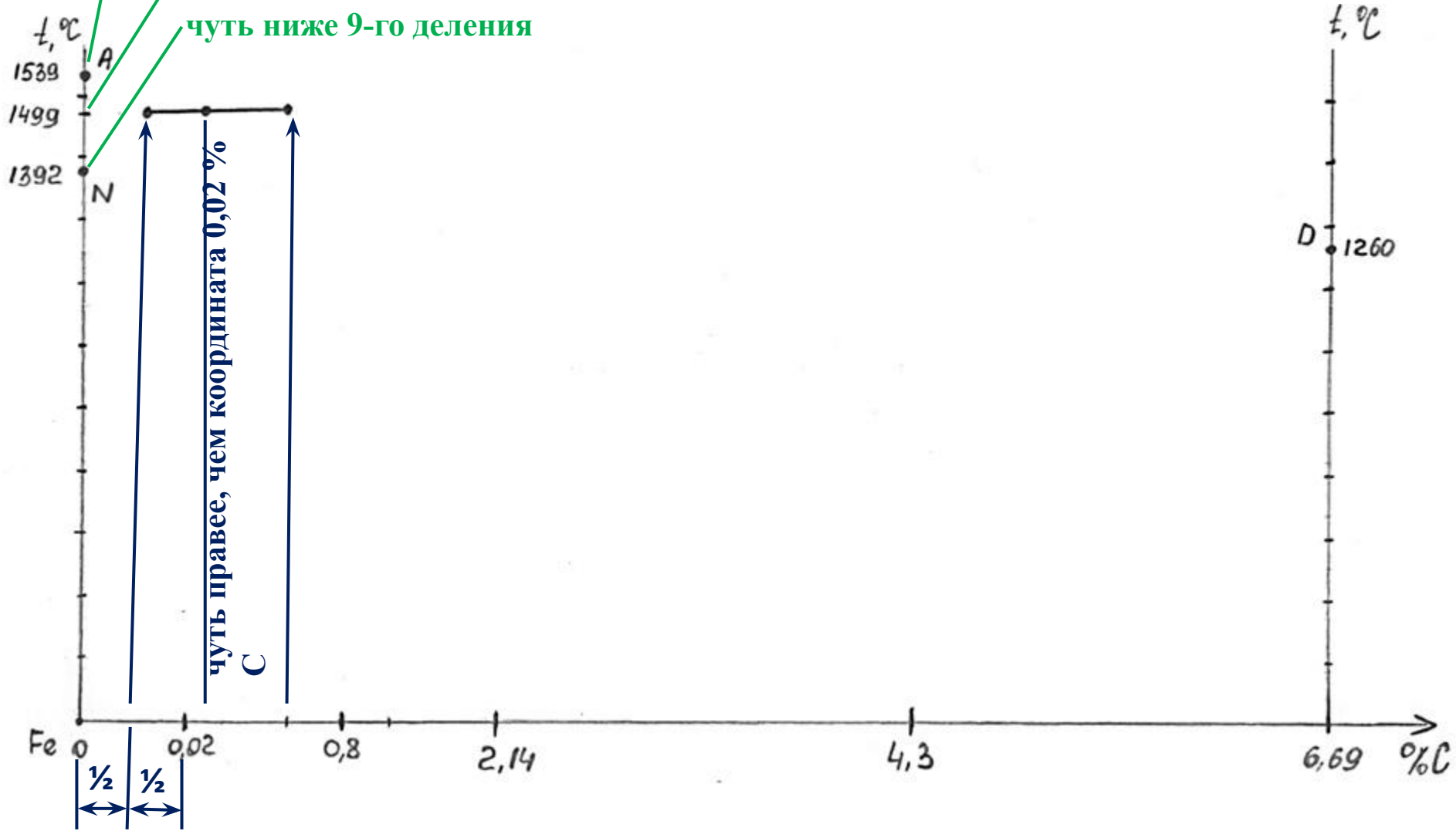
~ 1,5 см

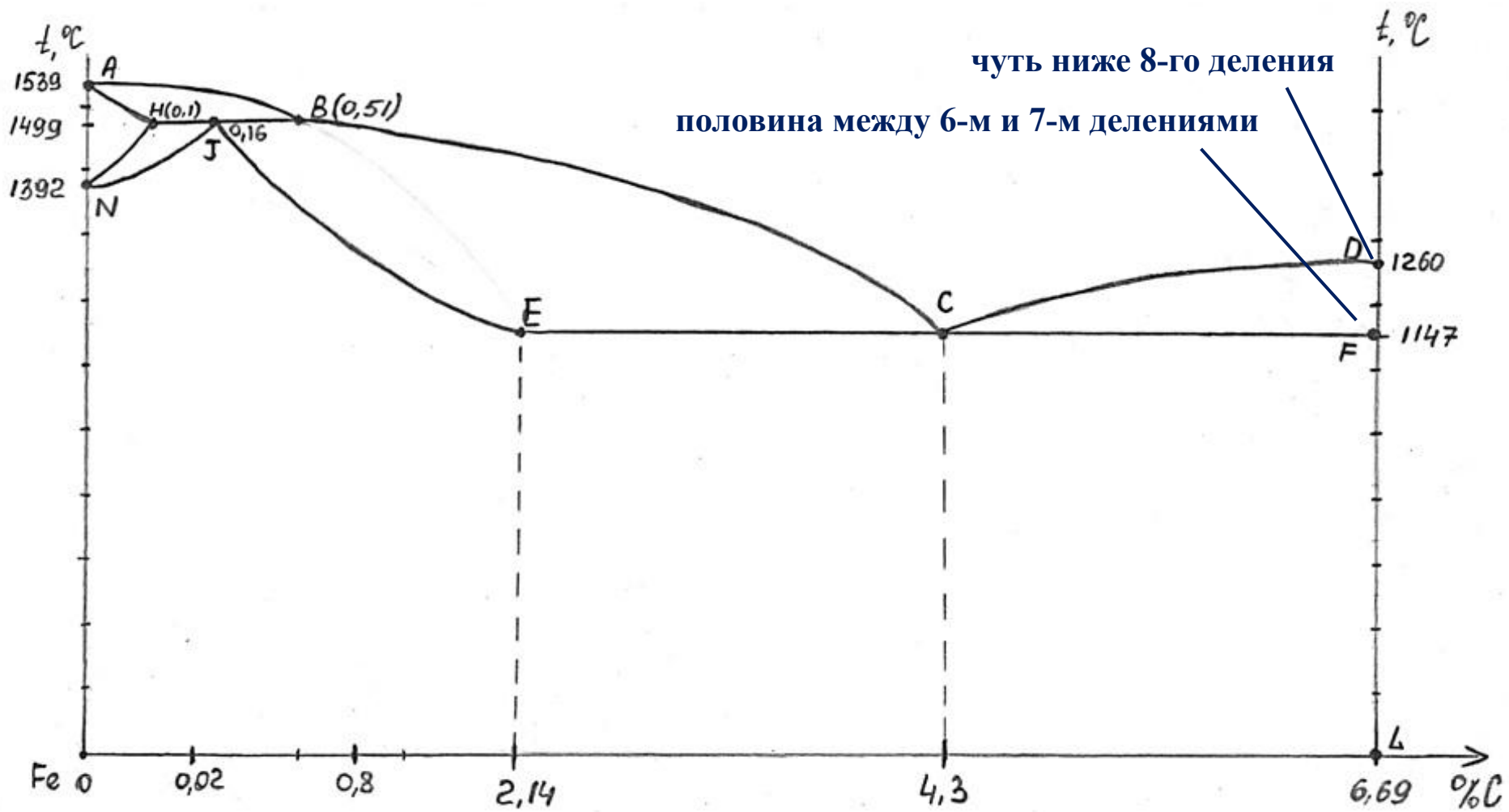


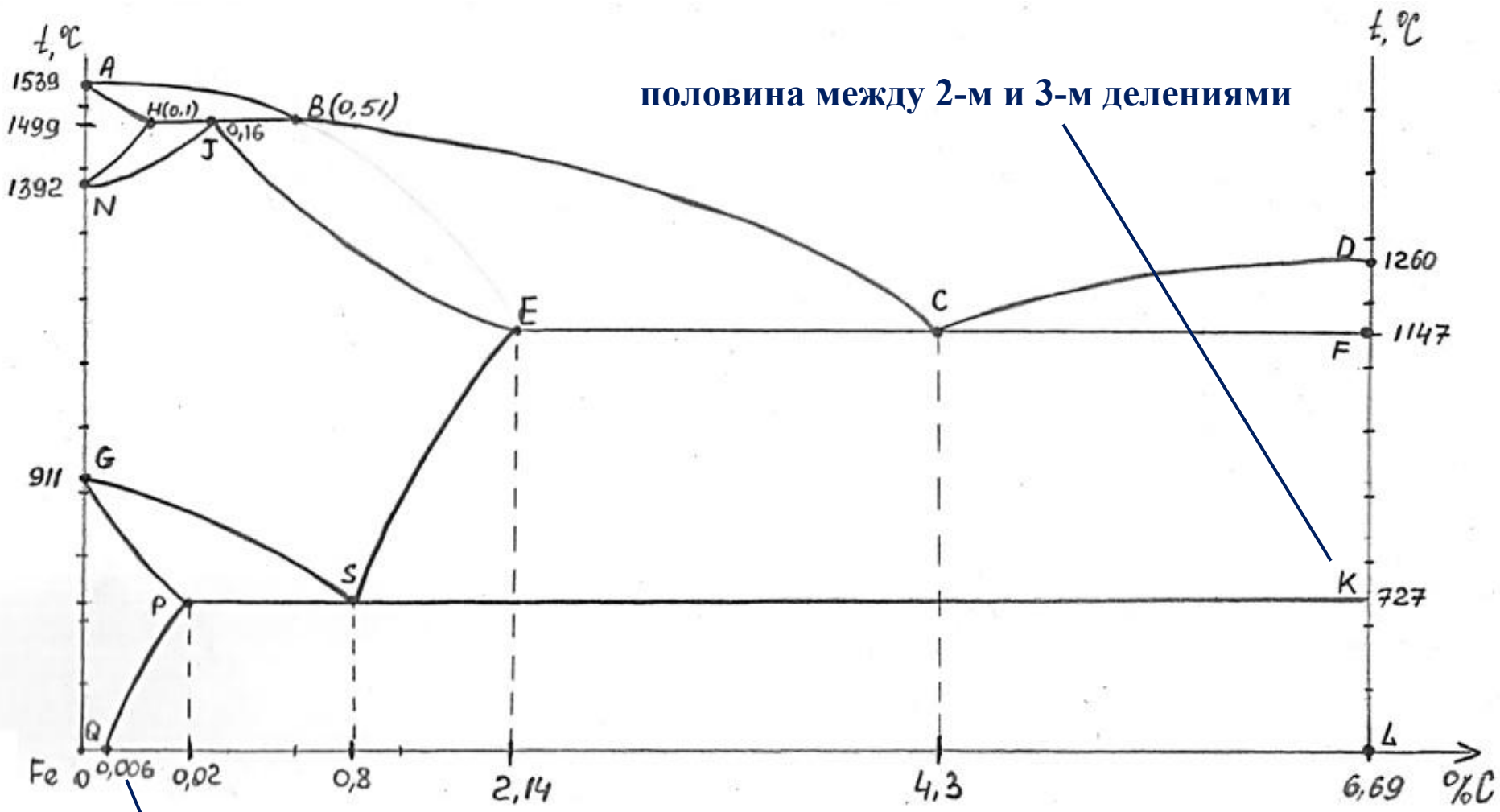
чуть выше 10-го деления

чуть ниже 10-го деления

чуть ниже 9-го деления







половина между 2-м и 3-м делениями

чуть правее, чем координата 0 % C



## Компоненты:

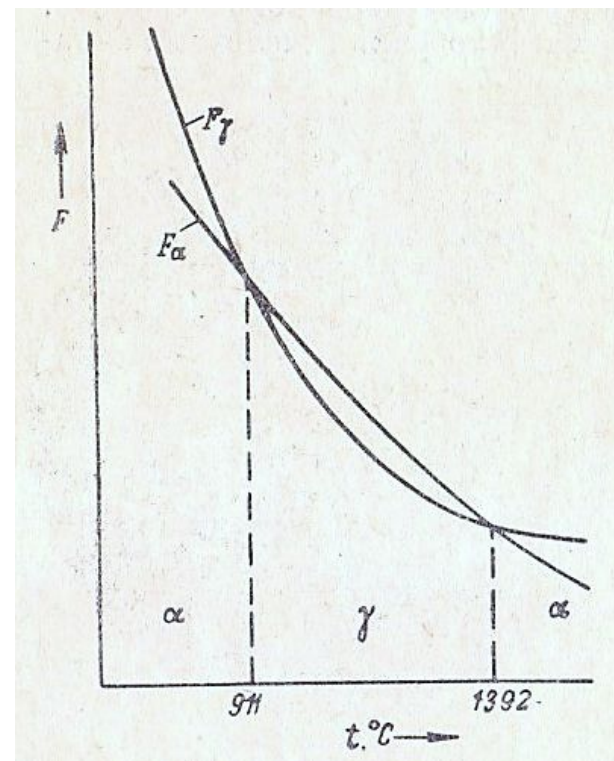
→ Железо

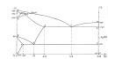
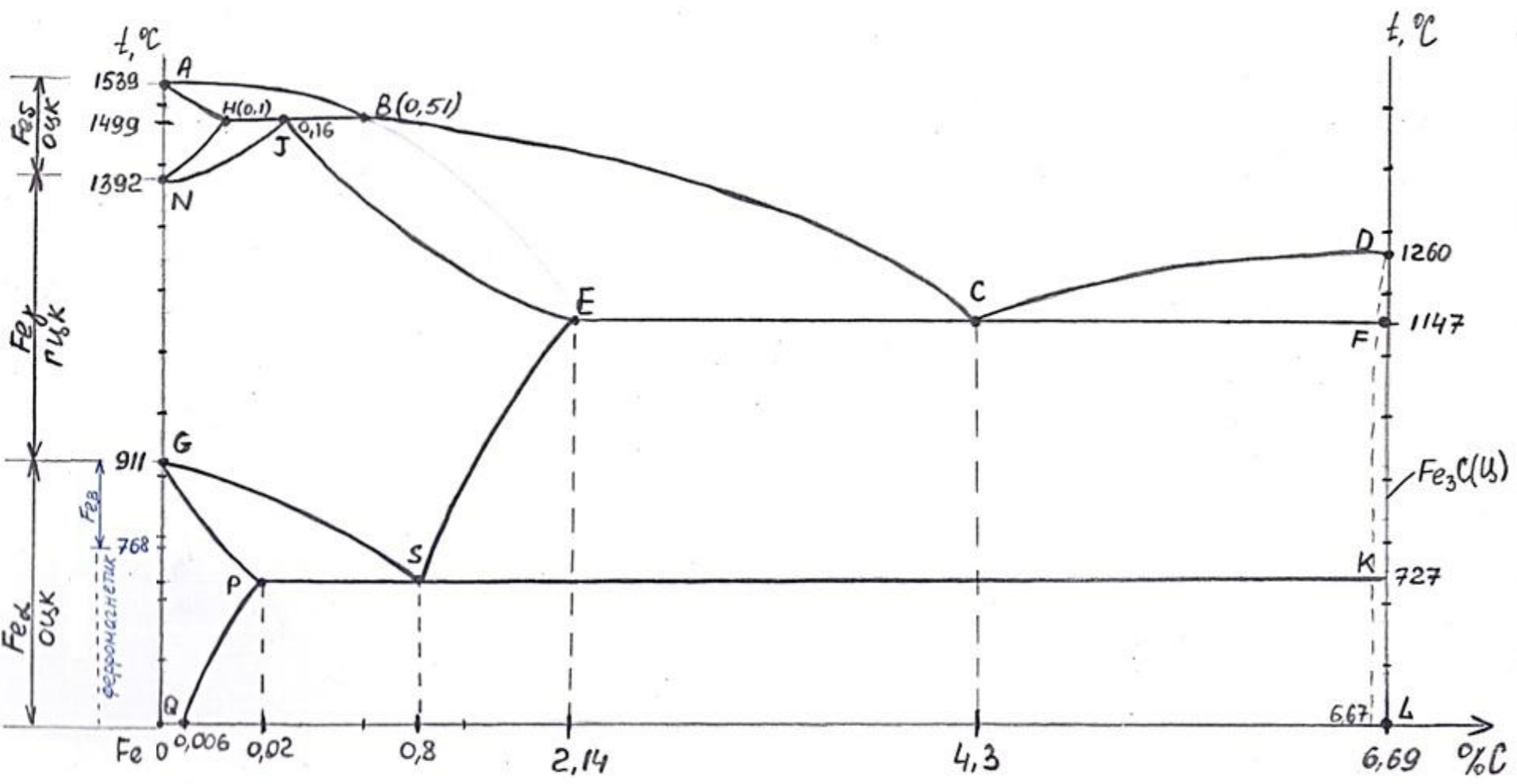
Переходный металл серого цвета; атомный номер 26;  $t_{\text{плавл}} = 1539 \text{ }^\circ\text{C}$ ; плотность  $\rho_{\text{Fe}} = 7,68 \text{ г/см}^3$ ; атомный радиус  $R_{\text{Fe}} = 1,26 \text{ \AA}$ ; предел прочности  $\sigma_{\text{В}} = 250 \text{ МПа}$ ; пластичность  $\delta = 50 \text{ \%}$ ; твёрдость  $50 \text{ НВ}$ .

В твёрдом состоянии может находиться в двух кристаллографических модификациях – с ОЦК решёткой и ГЦК решёткой.

Полиморфные превращения в железе связаны с перестройками решёток:

- при  $911 \text{ }^\circ\text{C}$   $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_\gamma$ ;
- при  $1392 \text{ }^\circ\text{C}$   $\text{Fe}_\gamma \leftrightarrow \text{Fe}_\delta$







## → Углерод

Неметаллический элемент; атомный номер 6; плотность  $\rho_C = 2,5 \text{ г/см}^3$ ; атомный радиус  $R_C \cong 0,77 \text{ \AA}$ .

Углерод может находиться в нескольких аллотропических модификациях (алмаз, графит, лонсдейлит, карбин, фуллерены, углеродные нанотрубки, аморфный углерод).