

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.

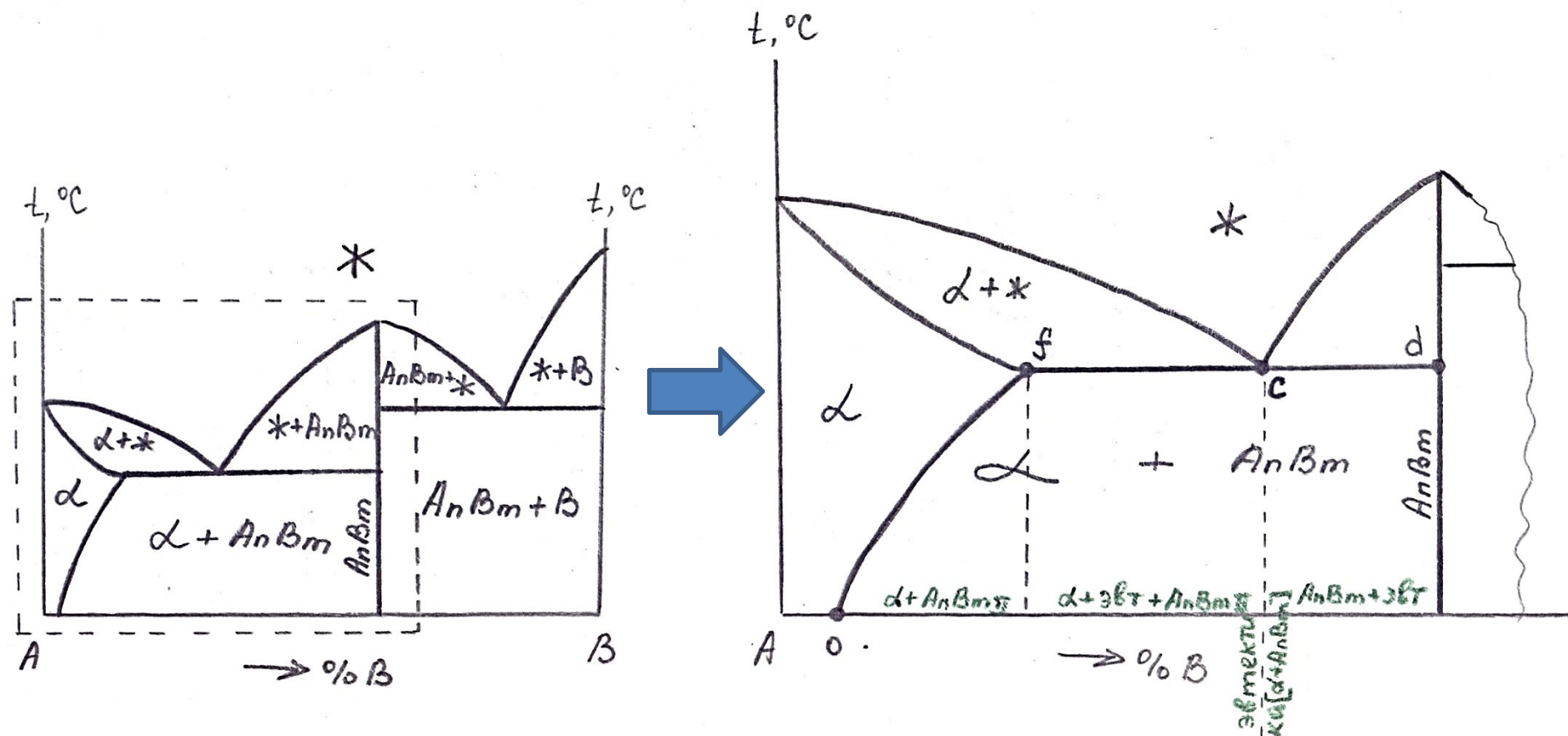
Если наклёп надо сохранить, то необходимо обязательно снять внутренние напряжения.

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

α – 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 α твёрдом растворе снижается, это приводит к выделению вторичных кристаллов промежуточной фазы $A_nB_{m_{II}}$ 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 – α и A_nB_m

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

при t_1 фаз две – α и A_nB_m

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

при t_2 фаз две – α и A_nB_m

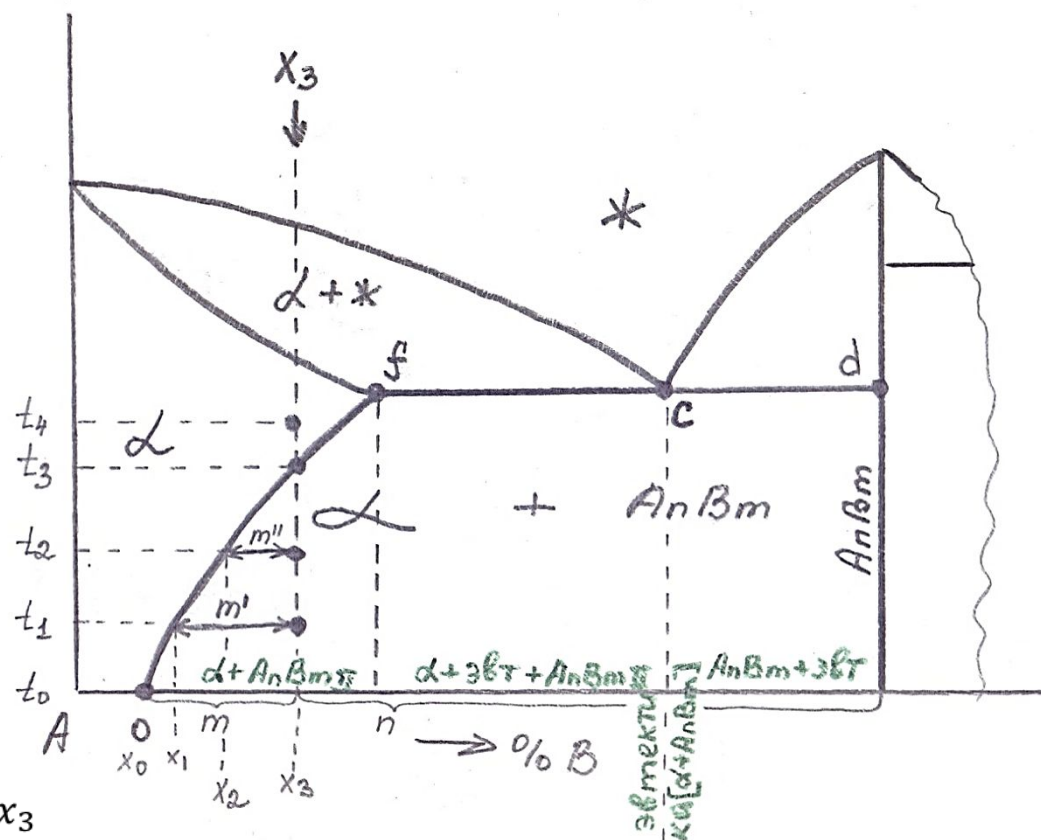
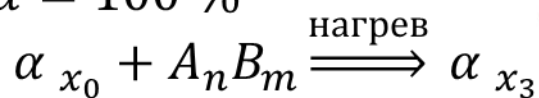
$$\frac{\alpha}{A_nB_m} = \frac{n}{m''}$$

при t_3 фаза одна – α x_3

$$\alpha = 100\%$$

при t_4 фаза одна – α x_3

$$\alpha = 100\%$$



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

при t_0 растворимость атомов В в α тв. растворе равна x_0

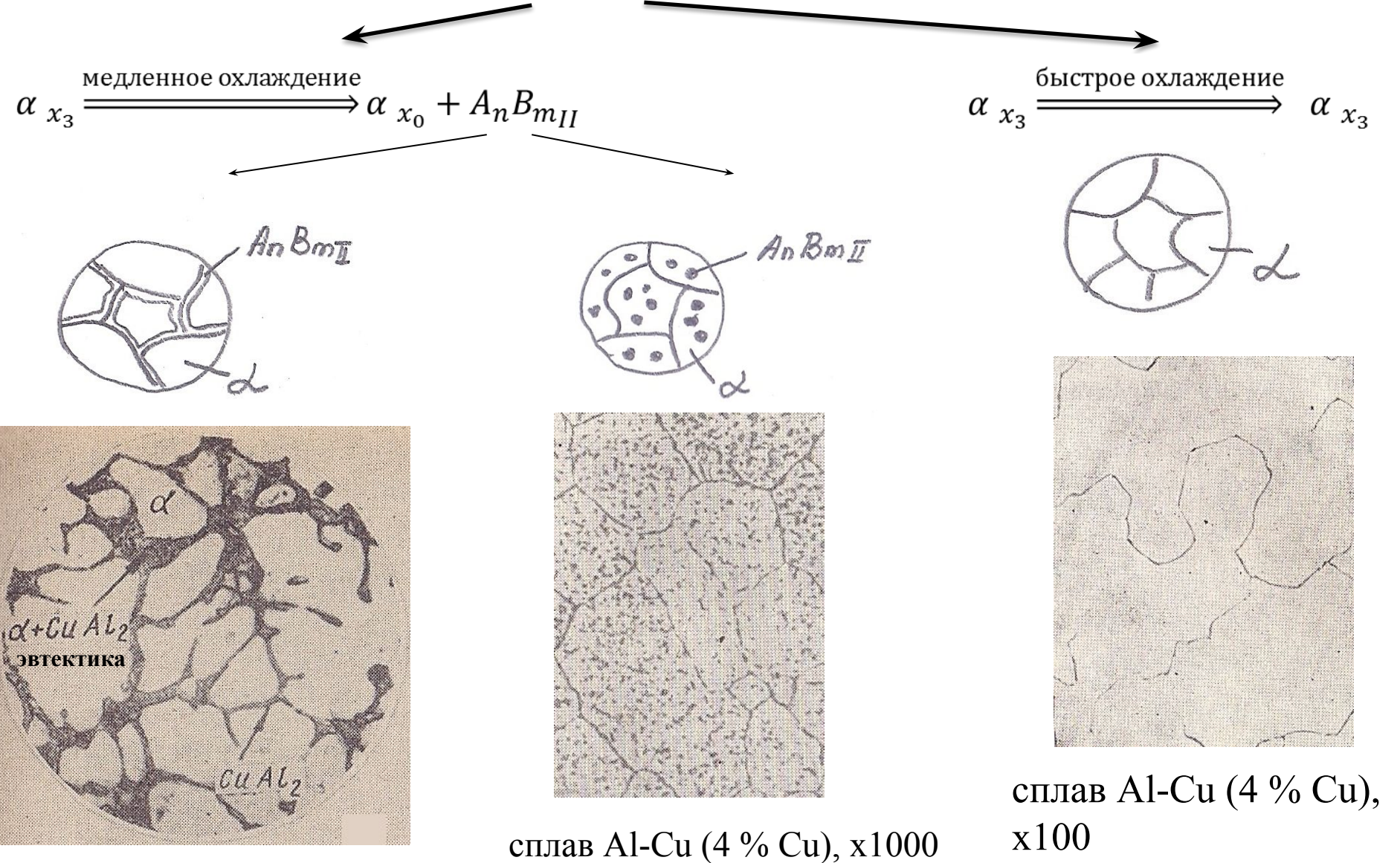
при t_4 растворимость атомов В в α тв. растворе равна x_3

пересыщенный
атомами В α тв.

раствор замещения
степень

пересыщения $x_3 - x_0$

Рассмотрим сплав x_3 при охлаждении:



сплав Al-Cu (12 % Cu), x1000

сплав Al-Cu (4 % Cu), x1000

сплав Al-Cu (4 % Cu), x100

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

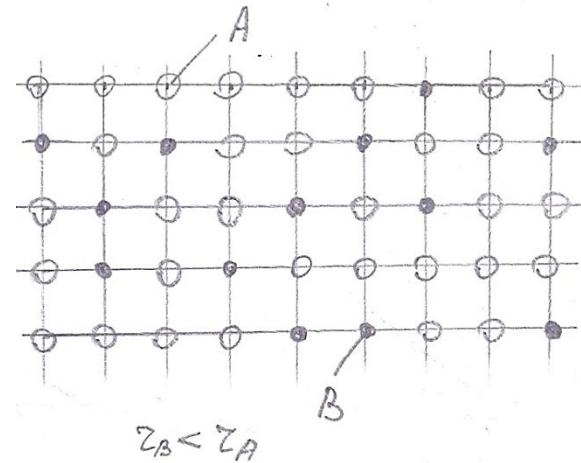
В результате быстрого охлаждения сплавы приобретают неравновесное структурное состояние (пересыщенный твёрдый раствор), имеют пониженную (min) прочность и повышенную (max) пластичность. Такое структурное состояние является стабильным до тех пор пока сплав остаётся «холодным» (т.е. в нём не протекают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

Старение протекает в несколько стадий.

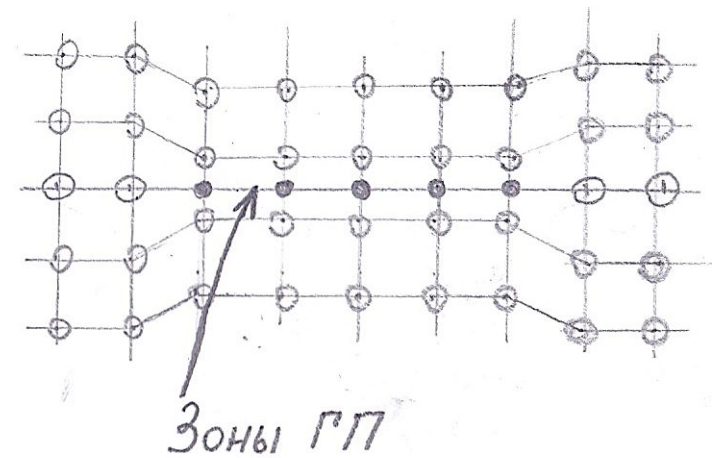
после закалки – структура пересыщенного атомами В α твёрдого раствора замещения.



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 α 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 α 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 α 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 α 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 α тв. раствора искажена, что даёт дополнительное упрочнение. Чем сильнее разница в атомных радиусах компонентов А и В и чем сильнее пересыщен α тв. раствор атомами В, тем выше упрочнение.

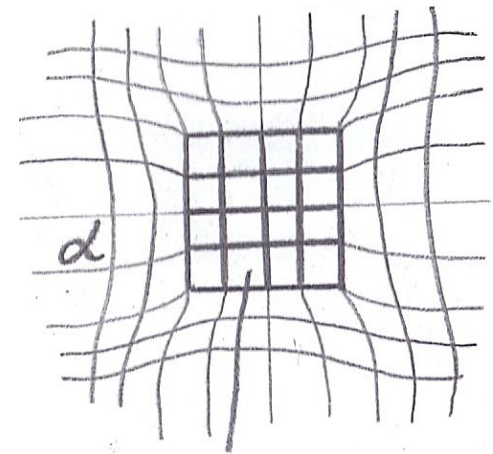
II стадия – образование метастабильной фазы A_nB_m'

Метастабильная фаза:

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

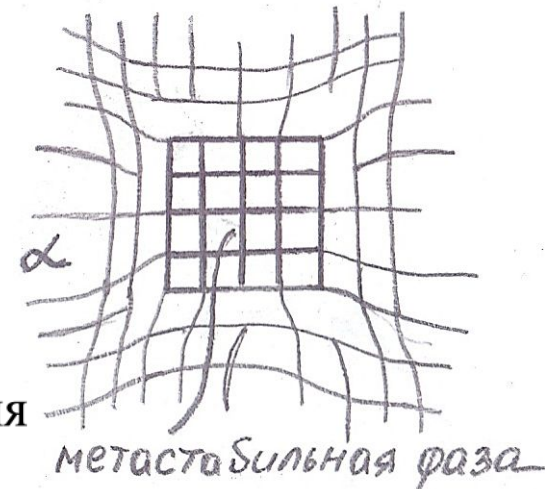
В результате когерентной связи α тв. раствора и метастабильной фазы КР α тв. раствора сильнейшим образом искажена, что создаёт сильное упрочнение.

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



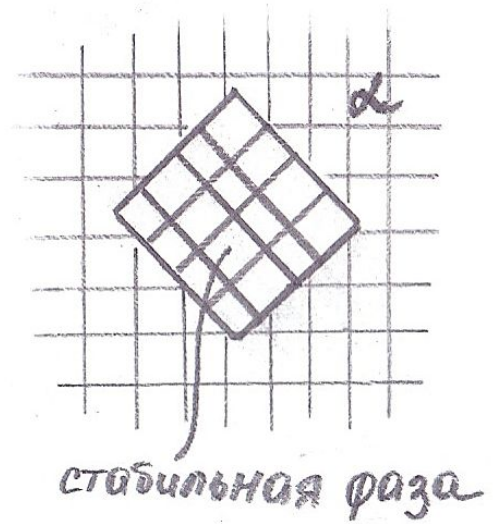
метастабильная фаза

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 α тв. раствора;
- КР стабильной фазы и α тв. раствора связаны некогерентной связью;
- размер частицы 200-500 Å.



В результате полного нарушения когерентной связи снимаются искажения КР α 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

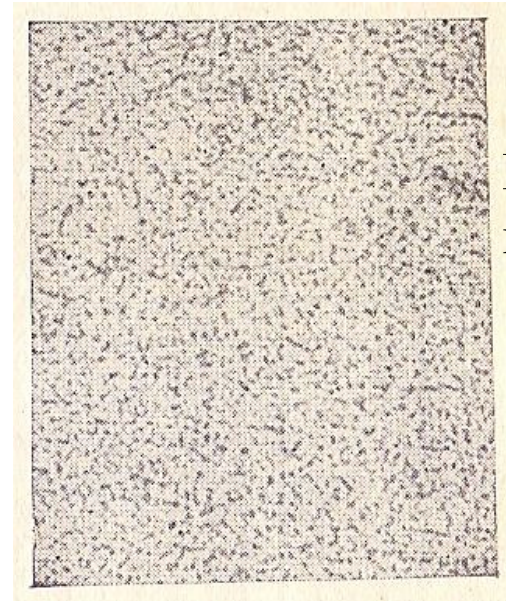
зонное старение



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

сплав Al-Cu (4 % Cu), x100

фазовое старение



Видны в
микроскоп !

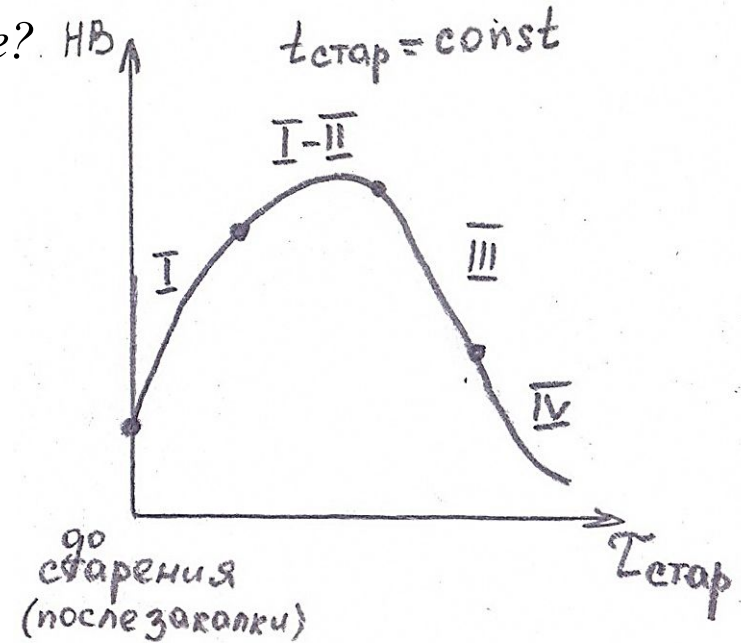
сплав Al-Cu (4 % Cu), x900

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)



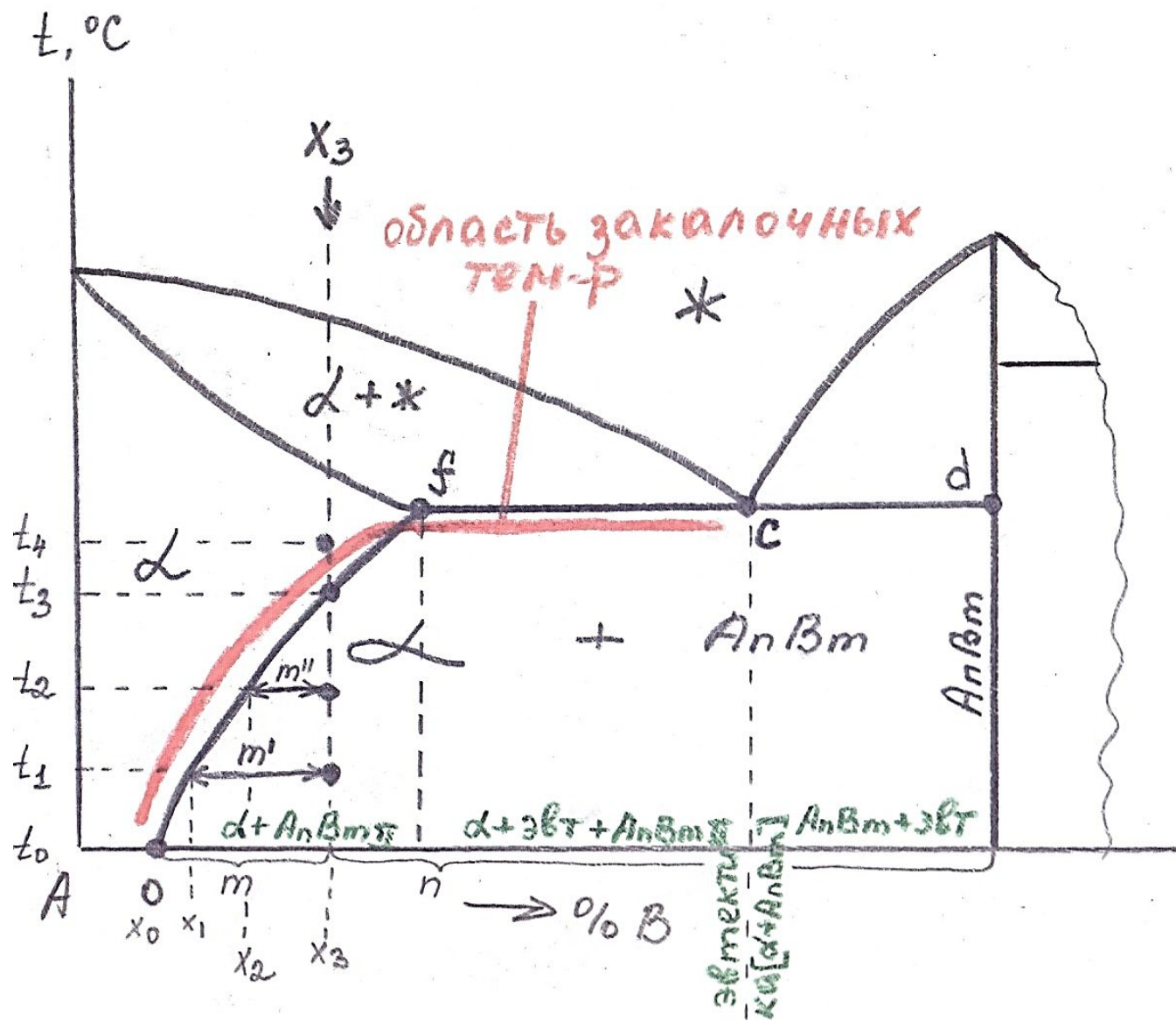
немного [рядом жидкость; чтобы не избавиться от эвтектики] ниже [растворить по максимуму A_nB_m]

- 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.

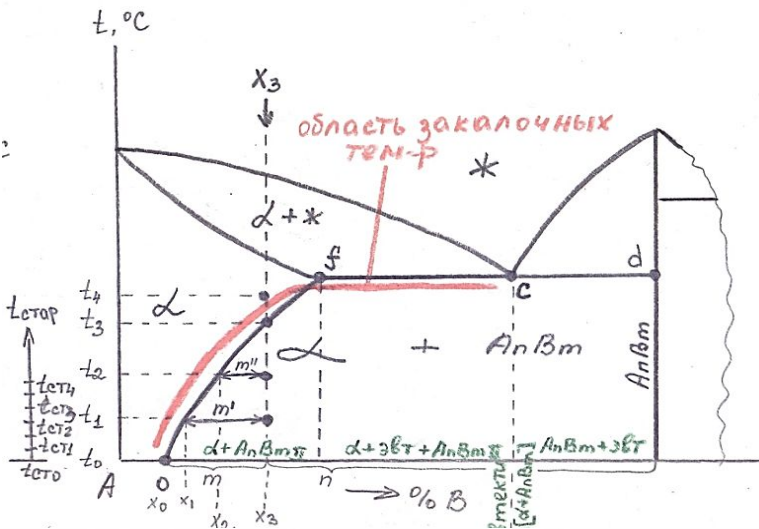


Б. Старение

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

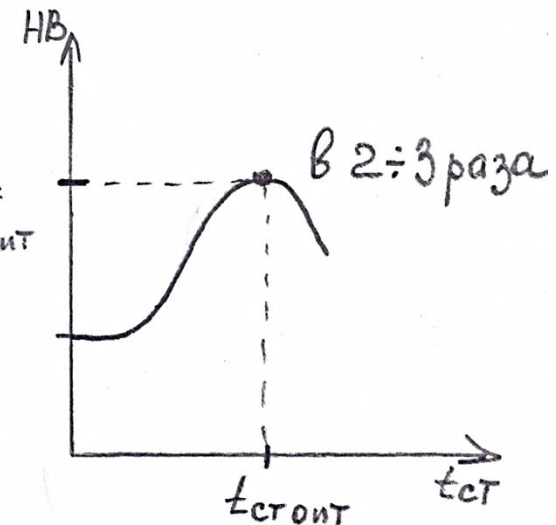
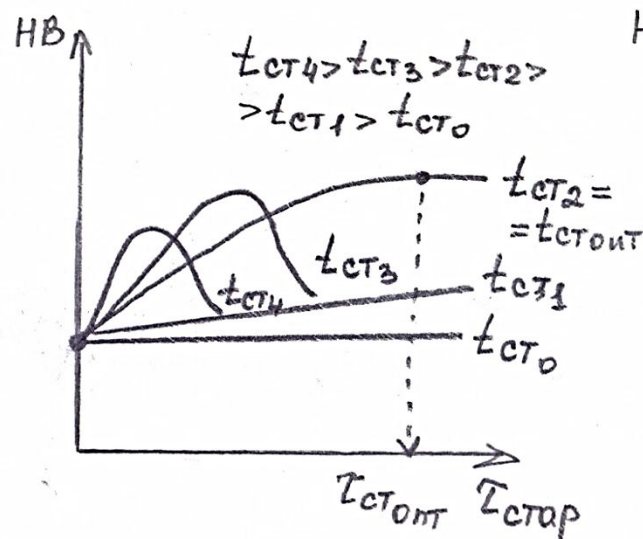
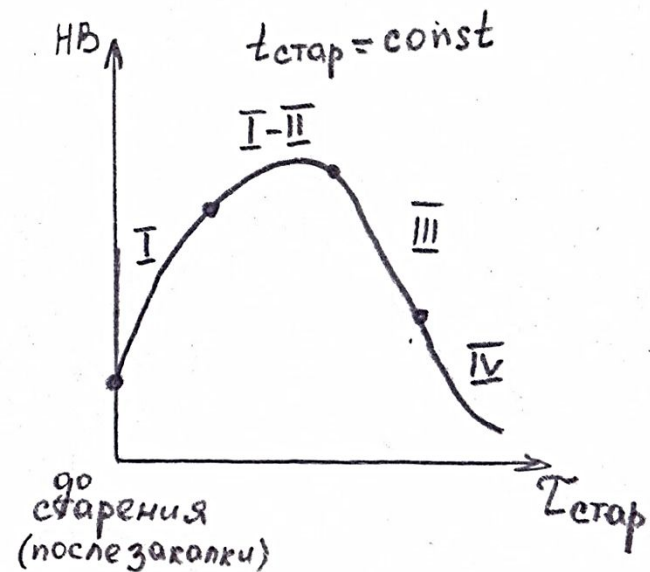
Условия проведения:

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



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

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



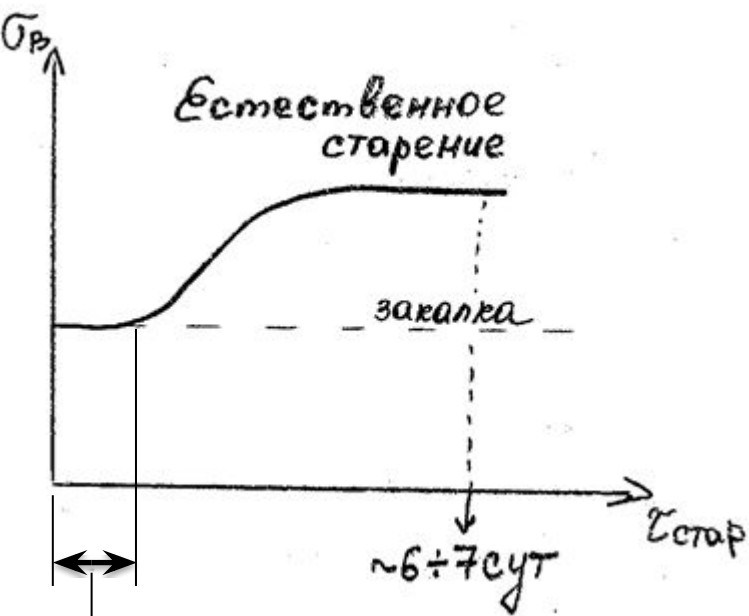
(лопатки ГТД) сплавы Ni-Al
(супер пружины) сплавы Cu-Be
дюралюмины Al-Cu

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

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

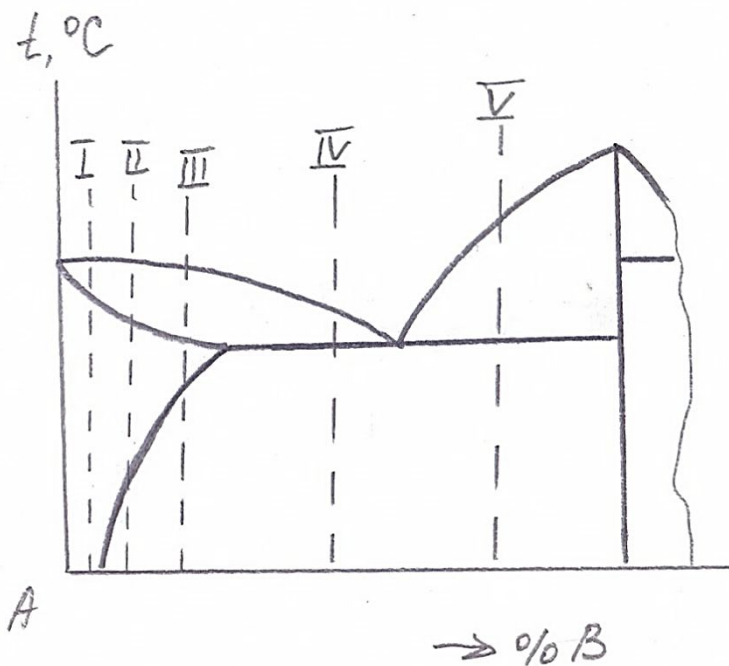
упрочнить

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

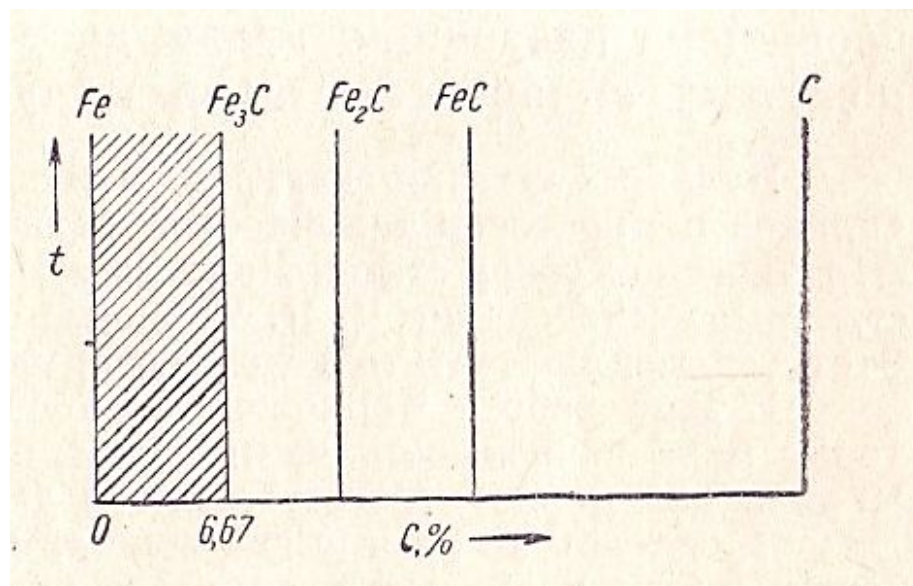
Полиморфное превращение наблюдается во многих сплавах: в сталях, чугунах, в двухфазных алюминиевых бронзах, в сплавах на основе титана и др.

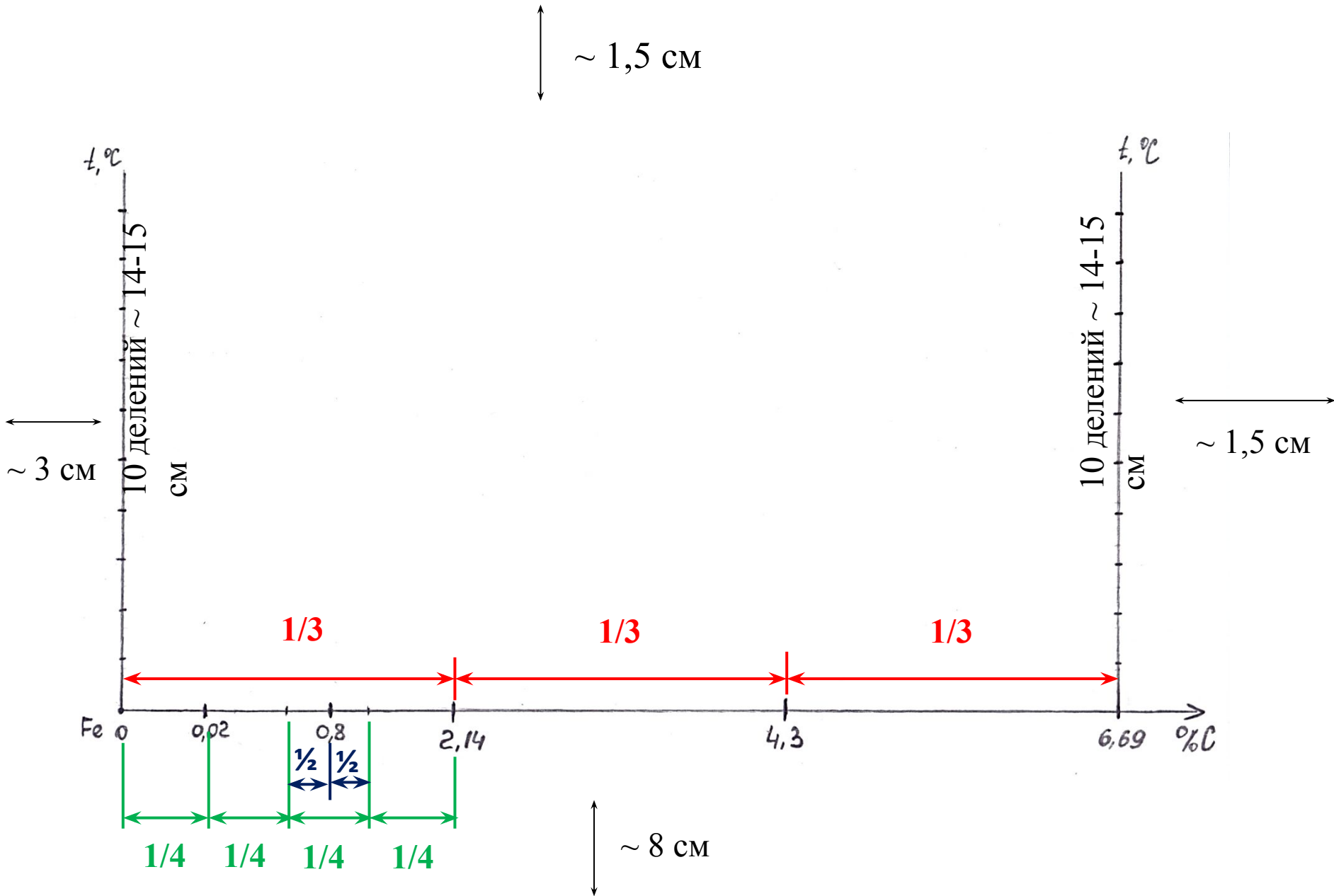
Принципы Т.О. для таких сплавов одни и те же, разница только в некоторых особенностях фазового превращения.

Т.О. для таких сплавов будем изучать на примере

сплавов железо (Fe) – углерод (C)

§ 4.1. Диаграмма состояния сплавов Fe-C (участок Fe-Fe₃C)

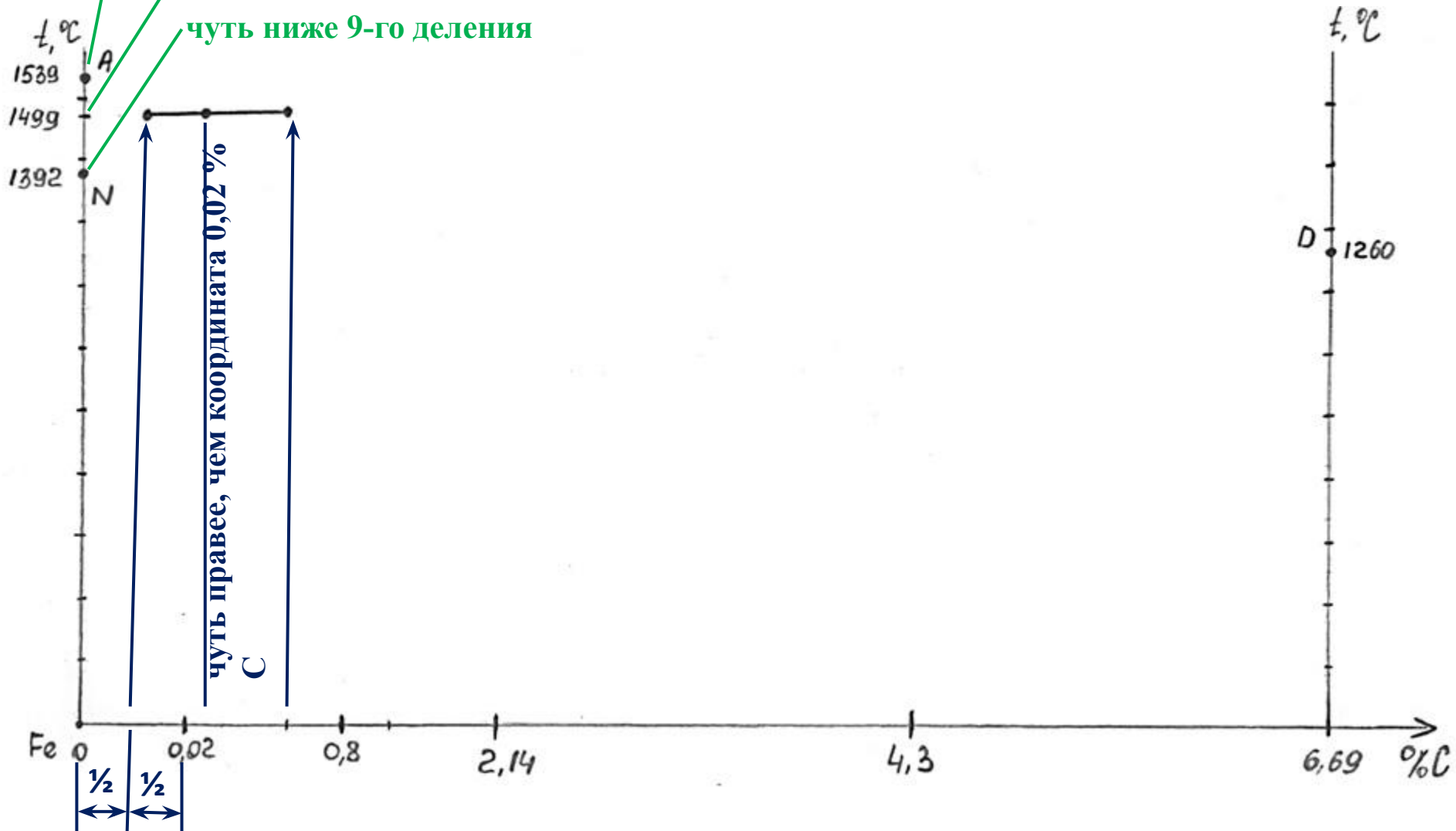


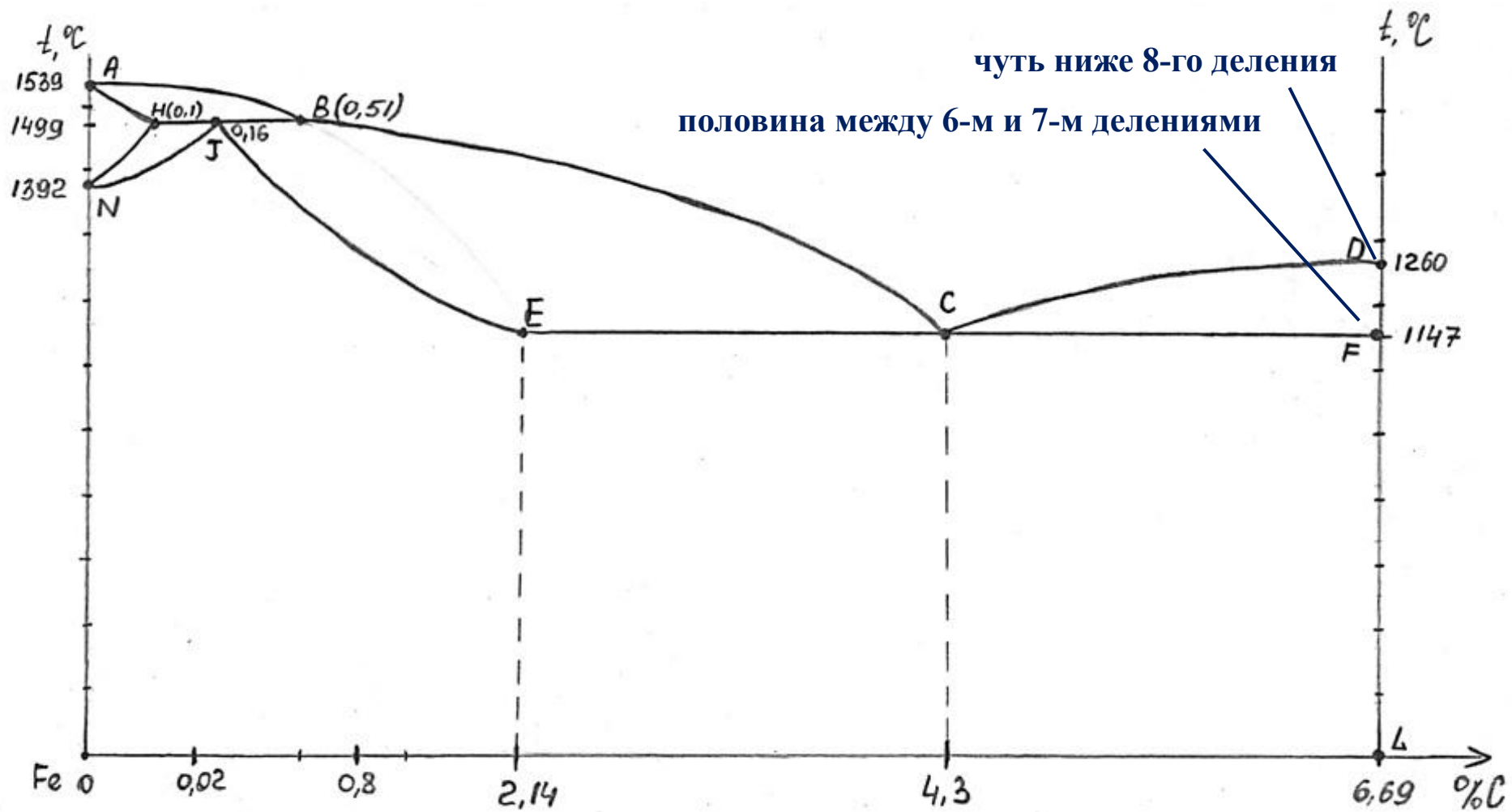


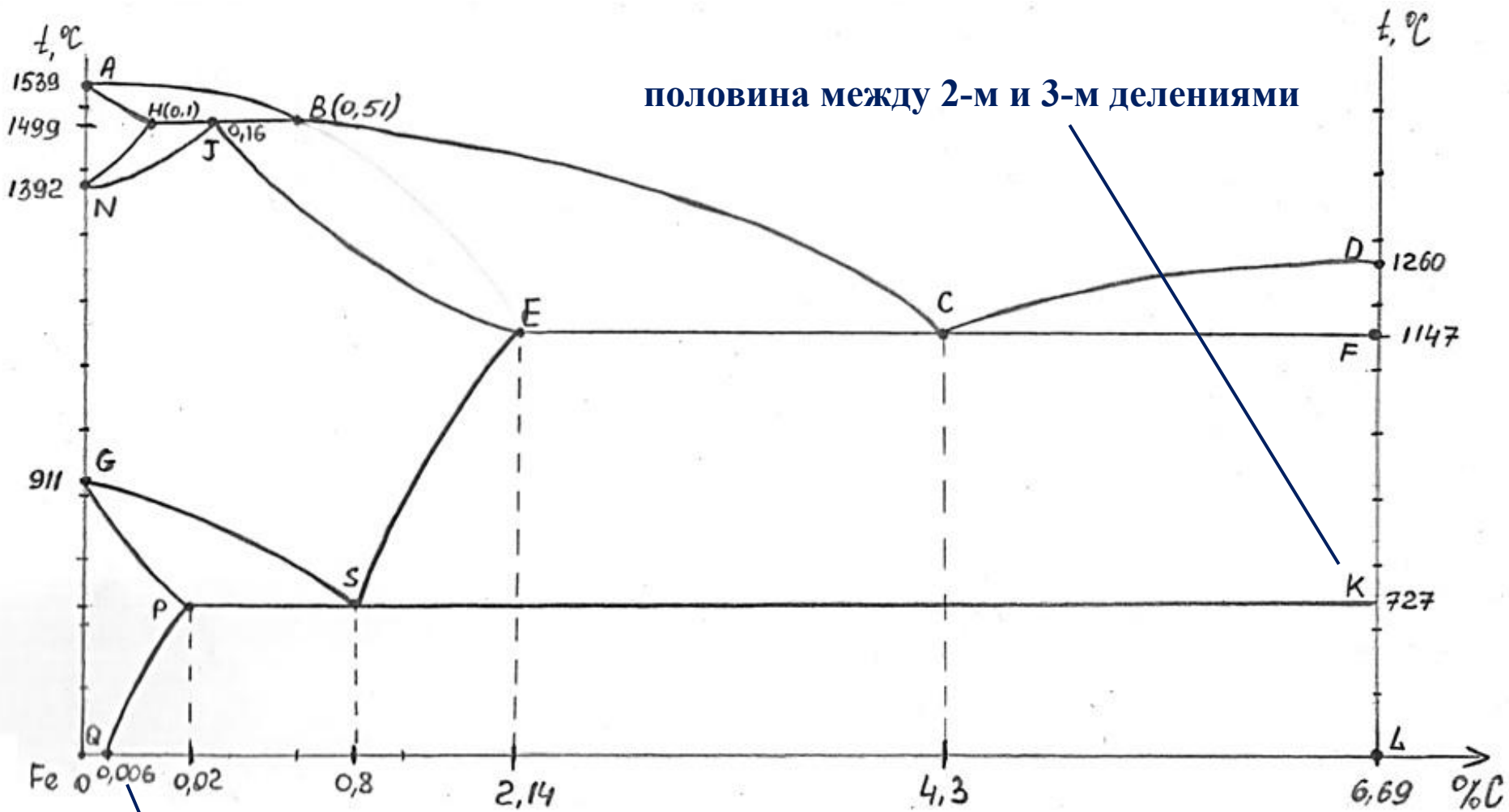
чуть выше 10-го деления

чуть ниже 10-го деления

чуть ниже 9-го деления







Компоненты:

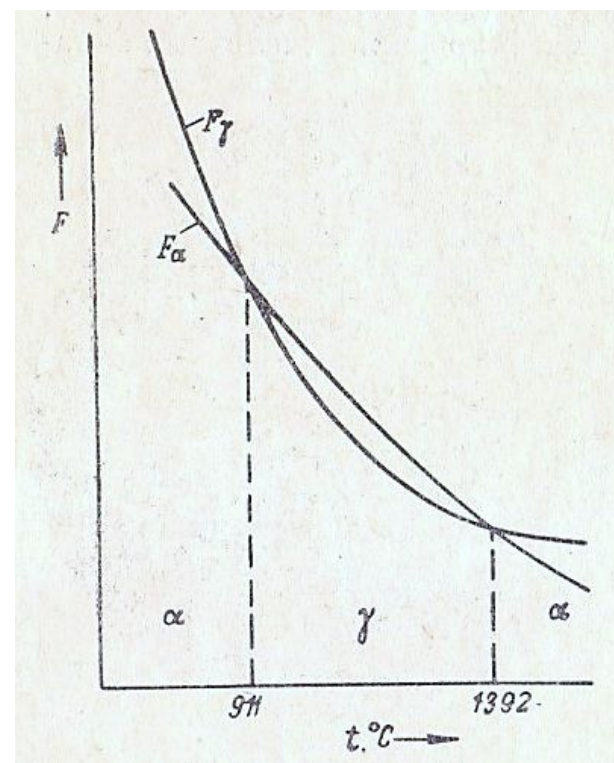
→ Железо

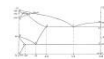
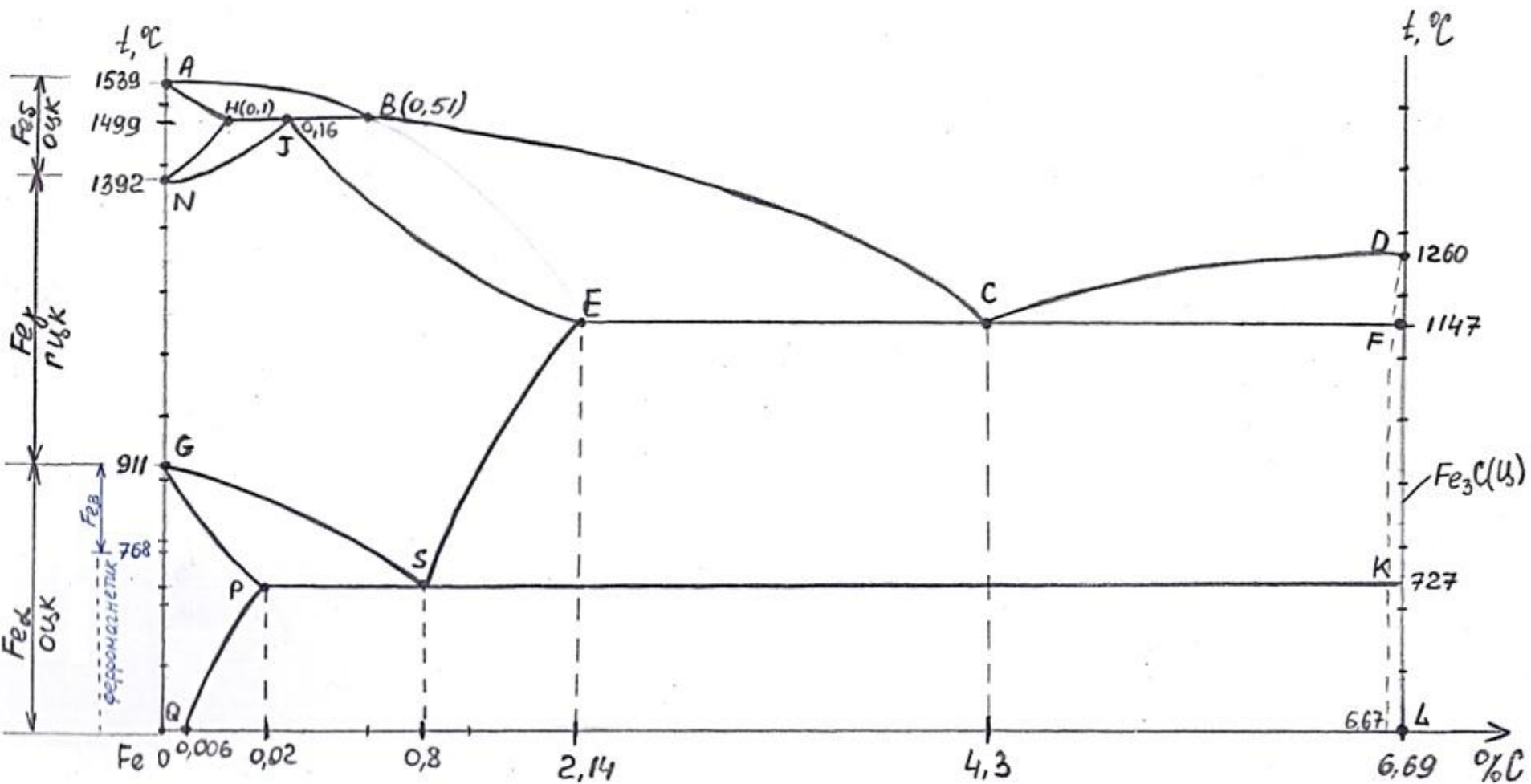
Переходный металл серого цвета; атомный номер 26; $t_{\text{плавл}} = 1539^\circ\text{C}$; плотность $\rho_{Fe} = 7,68 \text{ г/см}^3$; атомный радиус $R_{Fe} = 1,26 \text{ \AA}$; предел прочности $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$; пластичность $\delta = 50 \%$; твёрдость 50 НВ .

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°C $Fe_\alpha \leftrightarrow Fe_\gamma$;
- при 1392°C $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\delta$





➔ Углерод

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

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