

Любая термическая обработка состоит из нагрева до

## определенной температуры, выдержки и охлаждения



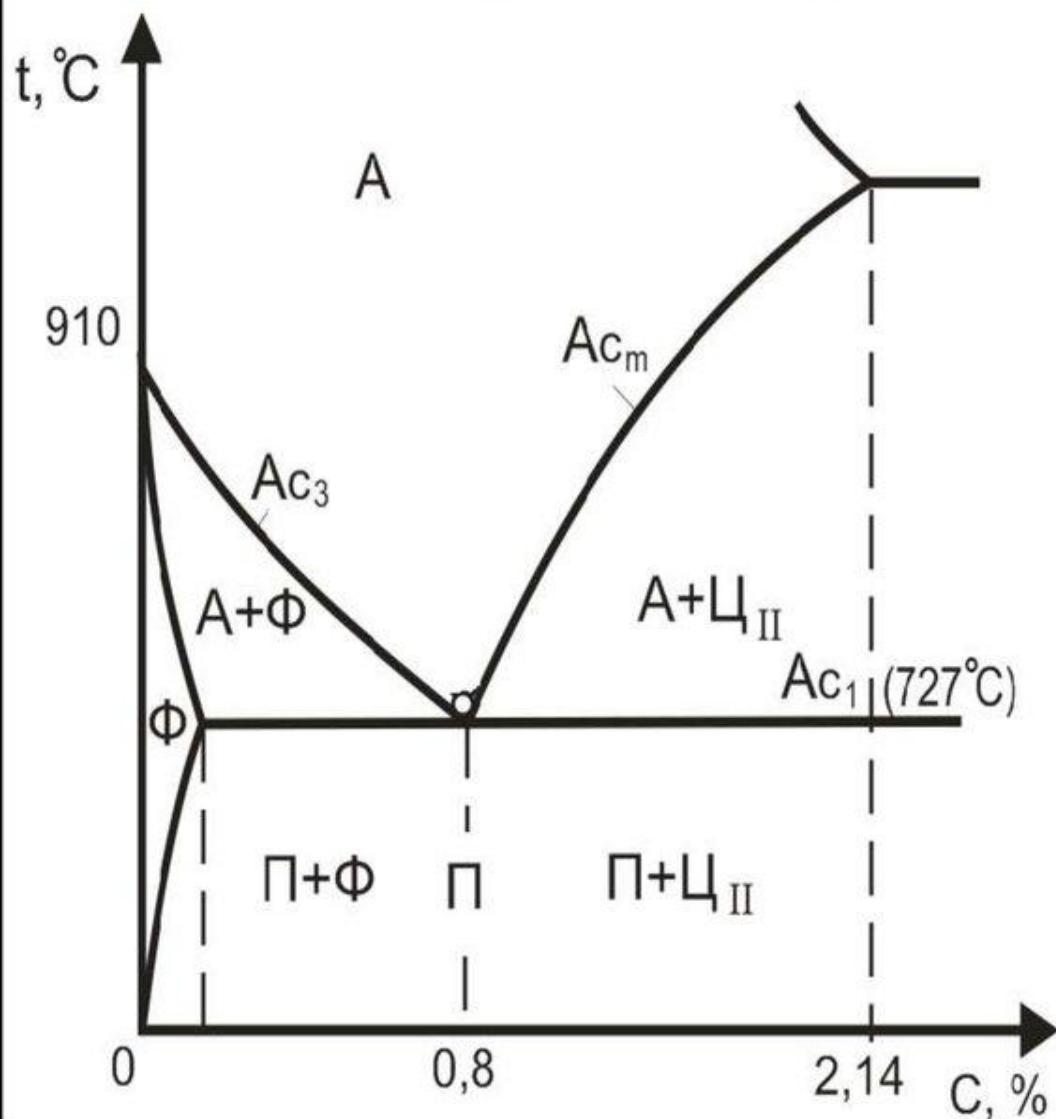
Режим термообработки (ТО) представляется графиком в координатах температура – время. Он характеризуется параметрами:

- температура нагрева;
- время выдержки при этой температуре;
- скорость нагрева;
- скорость охлаждения.

Параметры термической обработки зависят от химического состава стали и конфигурации изделия.

**Термическая обработка** – процесс тепловой обработки металлов и сплавов, заключающийся в нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью. Применяется для получения материала с заданными свойствами путем изменения его фазового состава и перераспределения компонентов, размеров и формы кристаллических зерен, вида дефектов, их количества и распределения. К термической обработке относятся **отжиг, закалка, отпуск, старение**.

# ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ НАГРЕВАНИИ

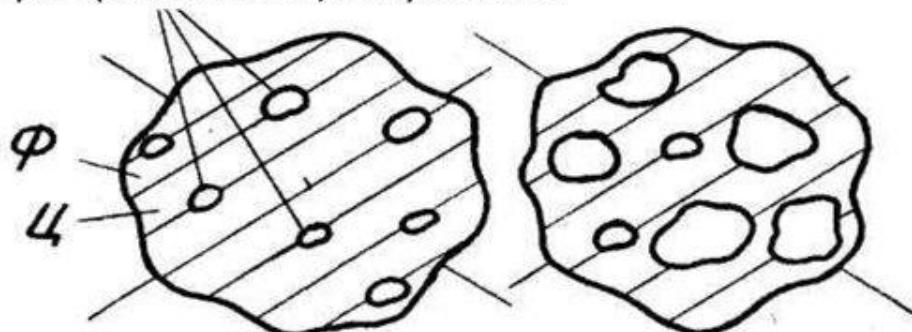


$\text{Ac}_1$  – критическая точка перлитаного превращения.  $727{}^{\circ}\text{C}$  (линия PSK). При этой температуре происходит перекристаллизация перлита в аустенит ( $\text{P} \rightarrow \text{A}$ ).

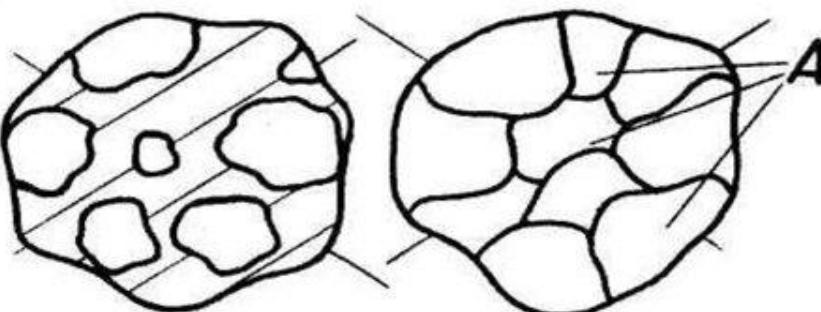
$\text{Ac}_3$  – критическая точка полной перекристаллизации в аустенит доэвтектоидной стали.  $(\text{F} + \text{A}) \rightarrow \text{A}$ . Температура ее определяется по линии GS в зависимости от содержания углерода в стали.

$\text{Ac}_m$  – критическая точка полной перекристаллизации в аустенит заэвтектоидной стали.  $(\text{A} + \text{Ц}) \rightarrow \text{A}$ . Температура ее определяется по линии SE в зависимости от содержания углерода в стали.

Центры кристаллизации Аустенита

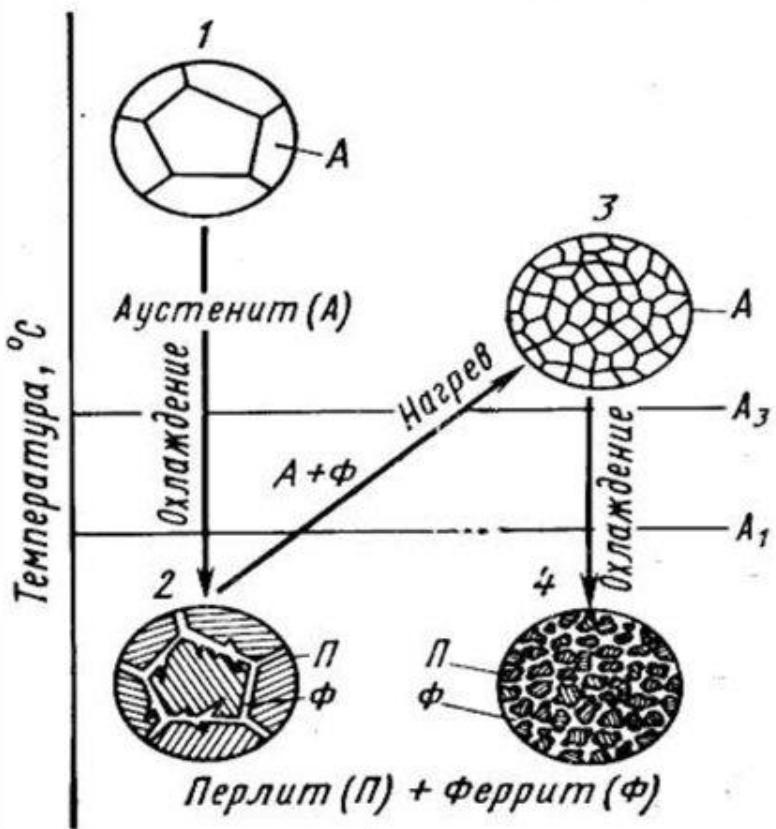


Размер начальных зерен Аустенита



Размер исходного зерна Аустенита (перлита)

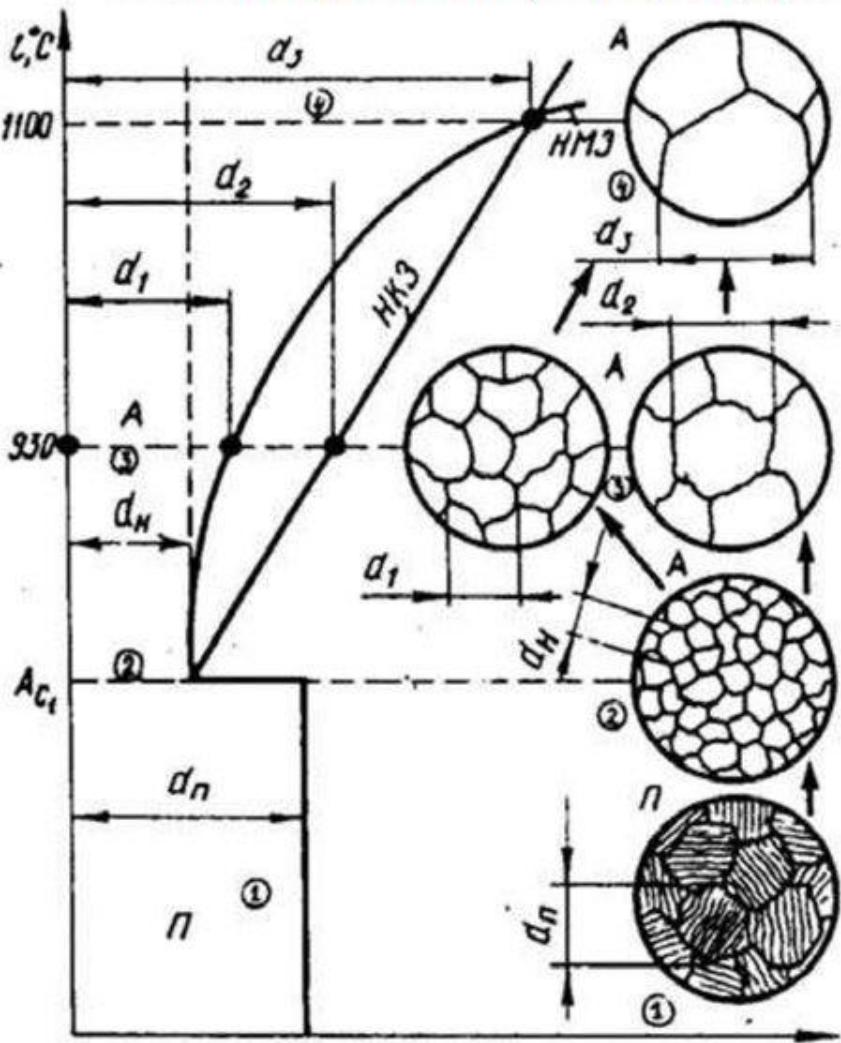
## Схема перекристаллизации перлита в аустенит



Изменение размера зерна при фазовой перекристаллизации доэвтектоидной стали.

При нагреве до высоких температур зерно крупное (1), после охлаждения размер его сохраняется (2). Повторный нагрев несколько выше  $A_{c3}$  позволяет измельчить зерно аустенита (3), а после охлаждения получить мелкозернистую структуру (4)

## Схема роста зерна аустенита при нагревании (перегреве) в наследственно мелкозернистой (НМЗ) и крупнозернистой (НКЗ) эвтектоидных сталей

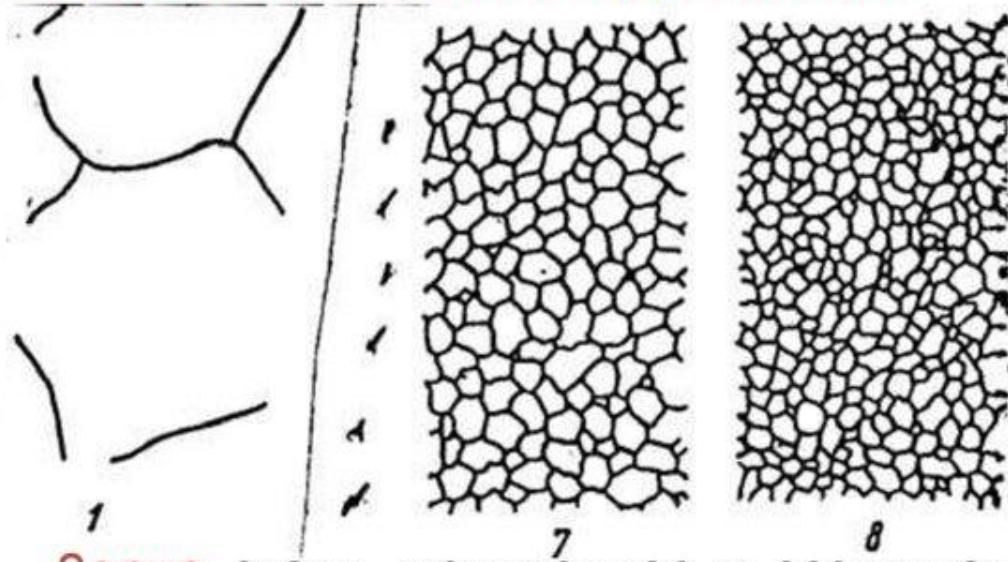


Размер зерна  $d$

$d_p$  – исходный размер зё尔на перлита;

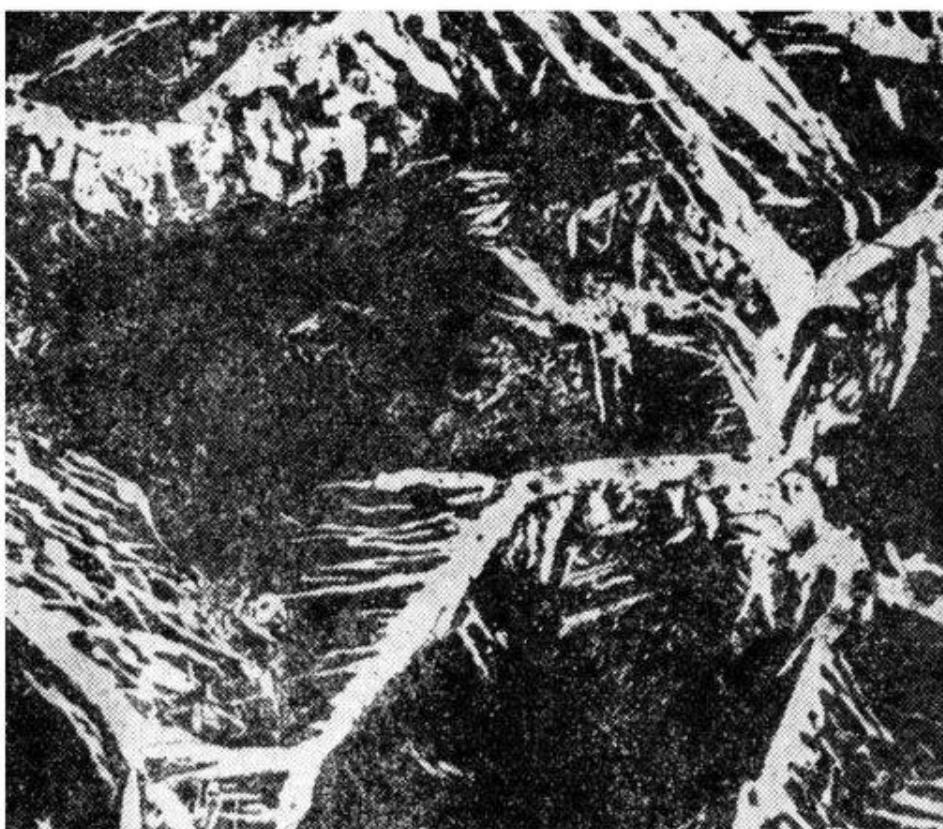
$d_h$  – размер начальных зерен аустенита;

$d_1, d_2, d_3$  – размеры действительного зерна аустенита.

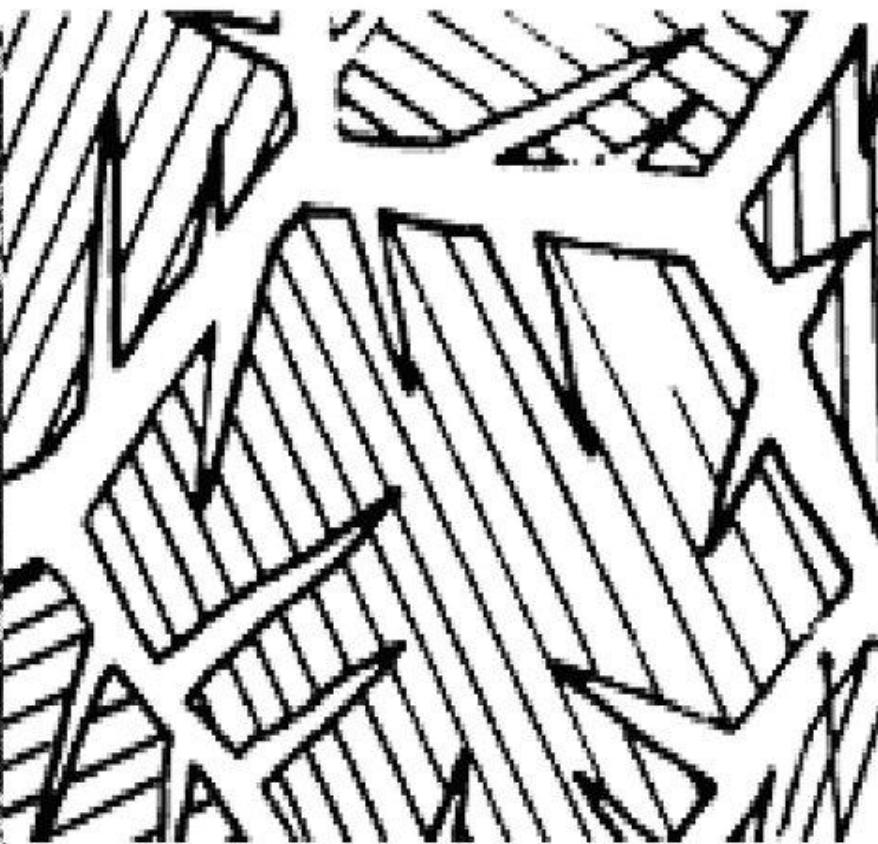


Зерно стали, полученное в результате термической обработки, называется **действительным зерном**. Оно характеризуется **номером балла** и определяется сравнением под микроскопом (при 25 – 800-кратном увеличении) с балльной шкалой ГОСТ 5639-82. Стали с баллом зерна, № –3 – +5 являются **крупнозернистыми – перегретыми**, с зерном № 6 – 14 – **мелкозернистыми**.

## Фотография (а) и схема (б) микроструктуры Видманштетта



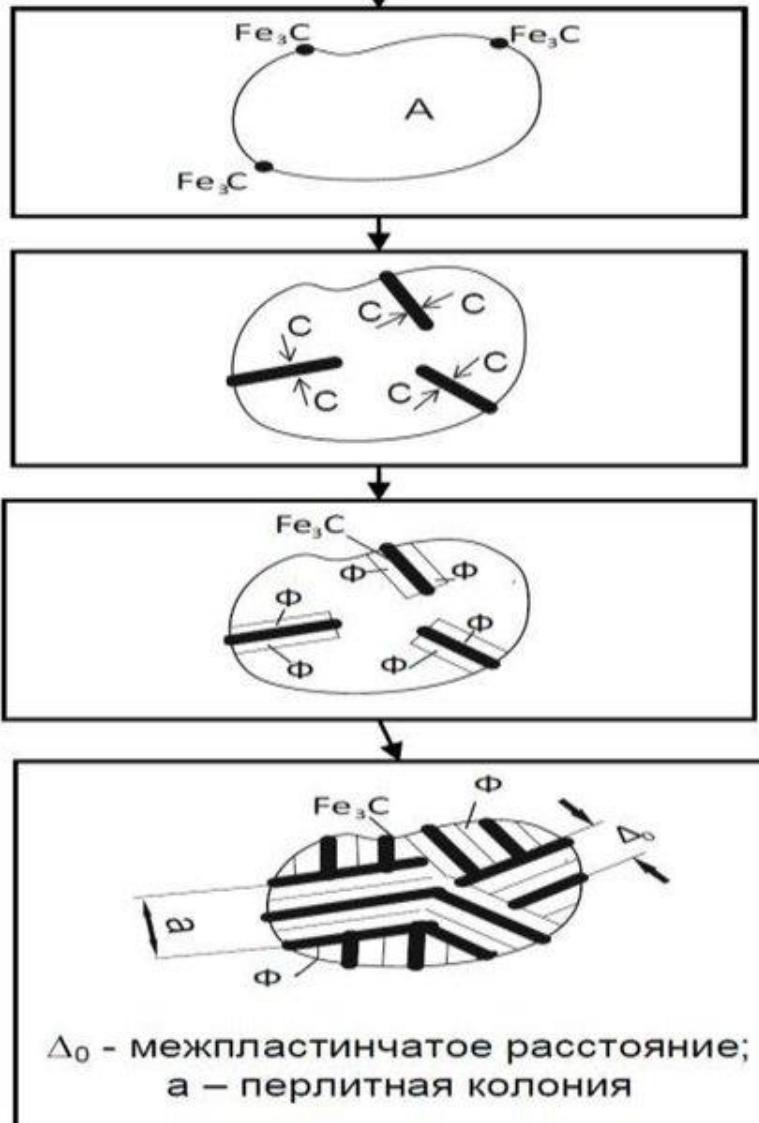
а)



б)

Эта структура образуется вследствие ускоренного охлаждения **перегретой** стали из аустенитного состояния. Она встречается в стальных отливках (корпус автосцепки, надрессорная балка и др.) и сварных швах. Стали с **видманштеттовой** структурой имеют низкую ударную вязкость и высокую склонность к хрупкому разрушению.

## Механизм превращения А—>П



Диффузия углерода к границам зерна аустенита и образование зародышей цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$

Рост частиц цементита в виде пластин за счет подпитки углеродом из прилегающих участков аустенита

Полиморфное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение участков обедненного углеродом аустенита в феррит

Рост пластинок феррита, оттеснение атомов углерода в соседние объемы аустенита, возникновение новых зародышей цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$ , далее процесс повторяется, образуются перлитные колонии

СХЕМА ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В ПЕРЛИТ

## Схема образования перлита в зерне аустенита



В зависимости от дисперсности различают:

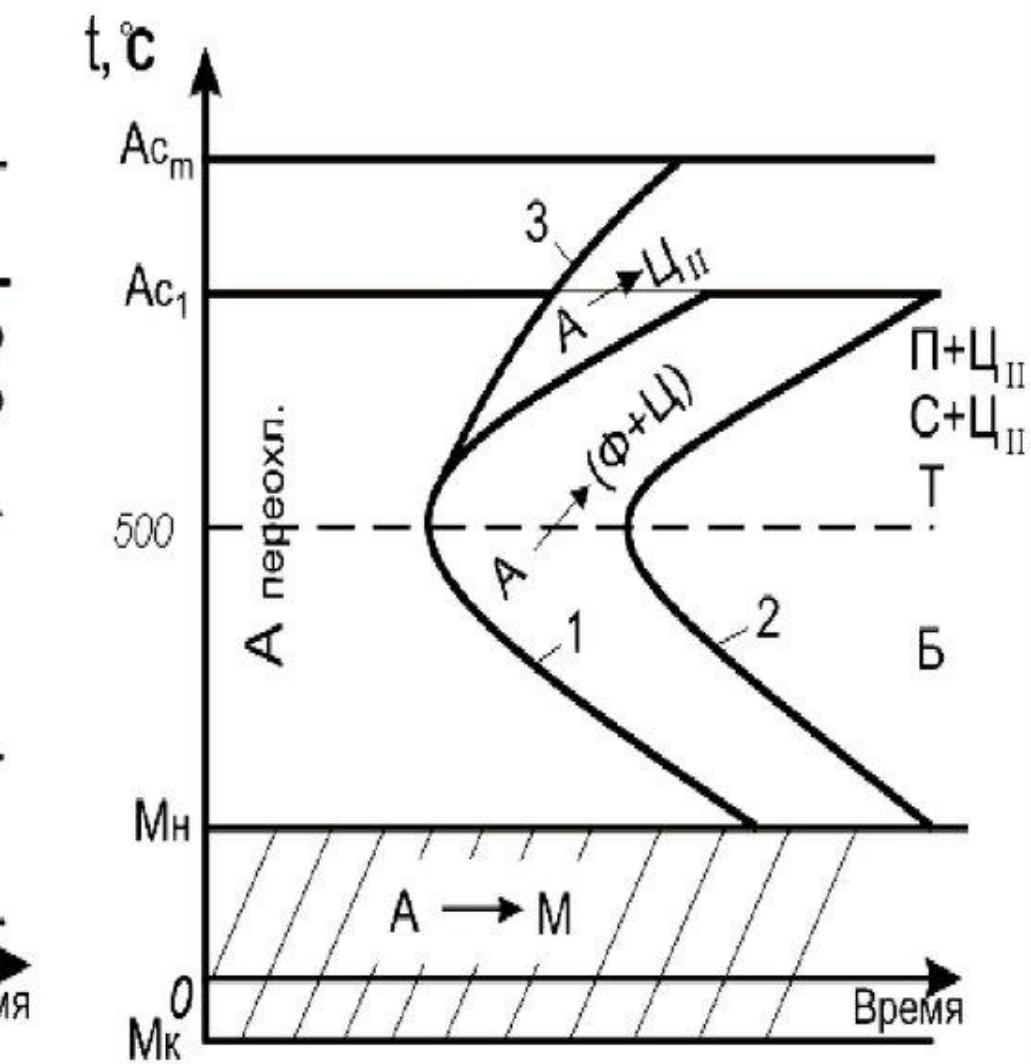
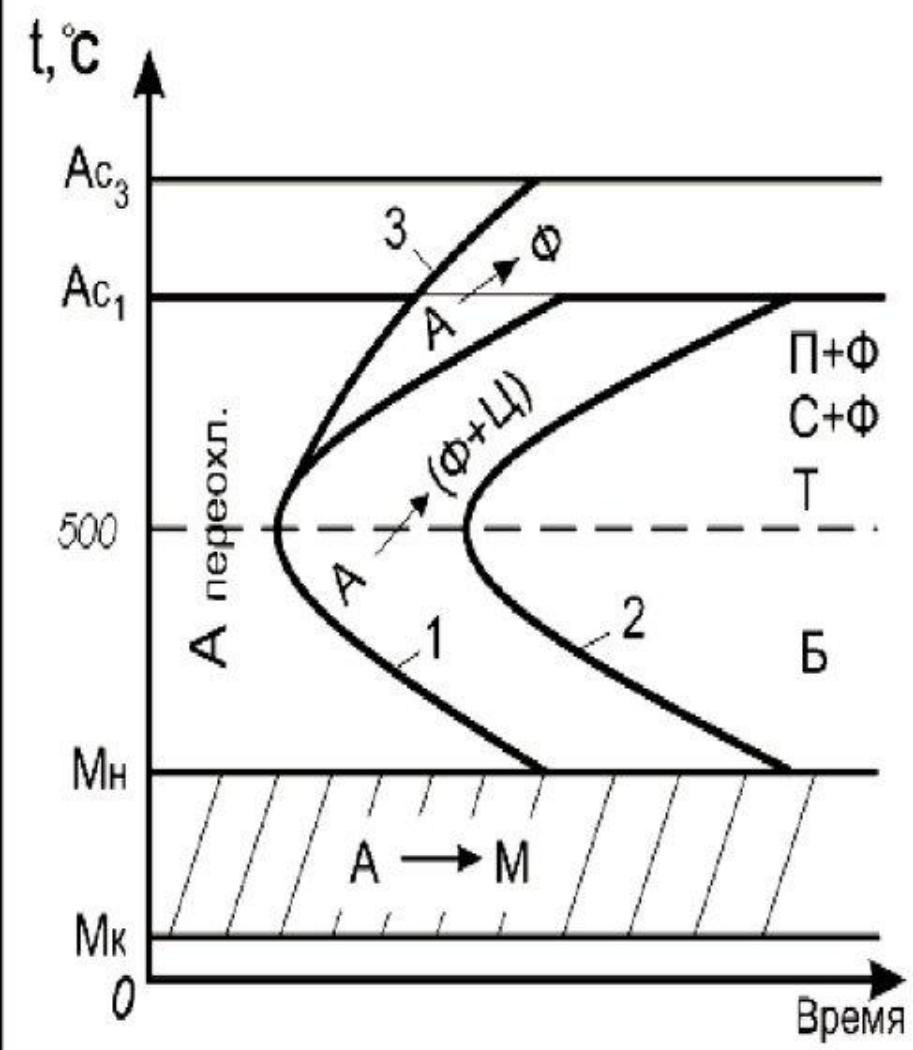
- **перлит** ( $700$ - $650^\circ\text{C}$ )  $S_0 = 0,5$ - $1,0$  мкм
- **сорбит** ( $650$ - $600^\circ\text{C}$ )  $S_0 = 0,2$ - $0,4$  мкм
- **троостит** ( $600$ - $550^\circ\text{C}$ )  $S_0 < 0,1$  мкм

- В зависимости от полноты протекания диффузионных процессов возможны три принципиально различных по механизму превращения аустенита:
- *перлитное – полностью диффузионное, протекает в интервале температур от  $A_1(727^{\circ}\text{C})$  до  $500^{\circ}\text{C}$ ;*
- *бейнитное – частично диффузионное, идет в температурном интервале от точки минимальной устойчивости аустенита до  $M_h$ ;*
- *мартенситное – бездиффузионное, происходит в температурном интервале  $M_h - M_c$ .*

# Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали



Диаграмма изотермического превращения аустенита  
доэвтектоидной и заэвтектоидной сталей



1 – линия, соответствующая времени начала распада аустенита, 2 – линия (время) конца распада аустенита, 3 – линия, соответствующая времени начала выделения избыточного феррита (цементита)

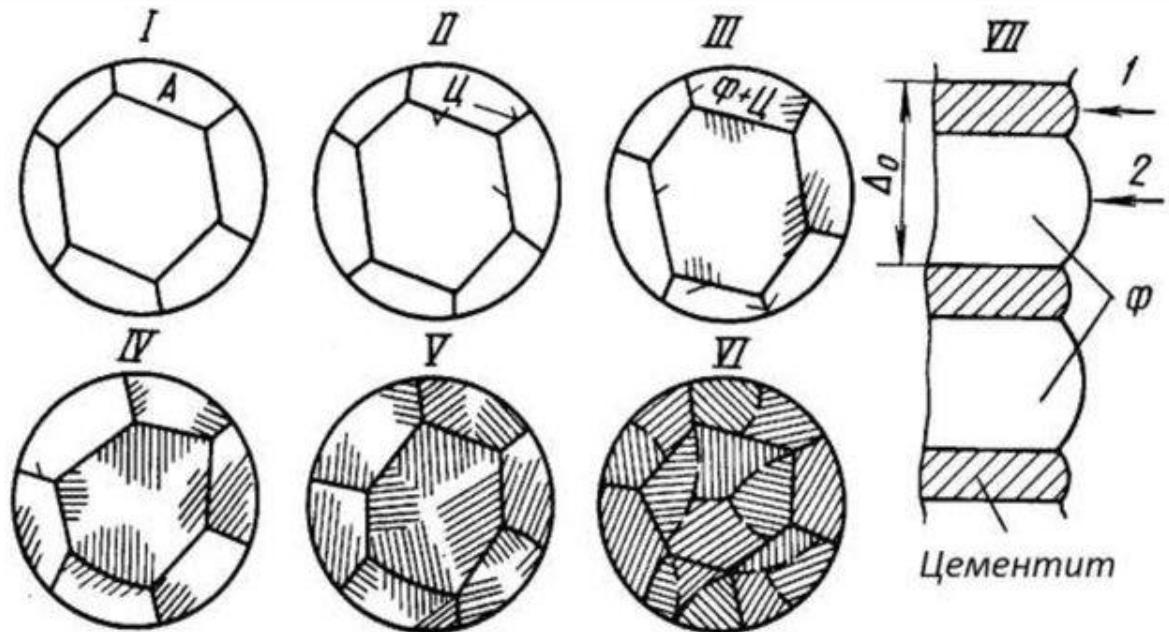
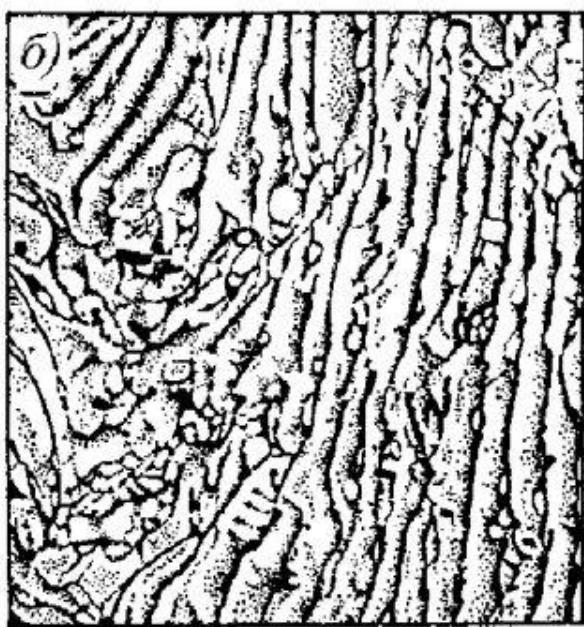


Схема образования  
микроструктуры  
пластинчатого  
перлита



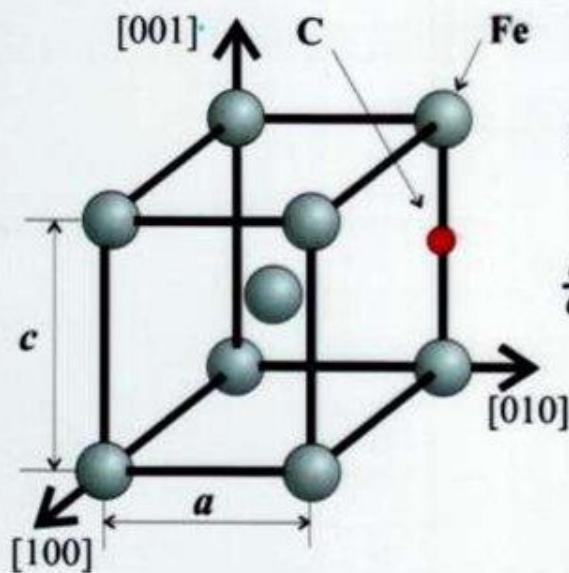
Структура перлита,

сорбита

и троостита

# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

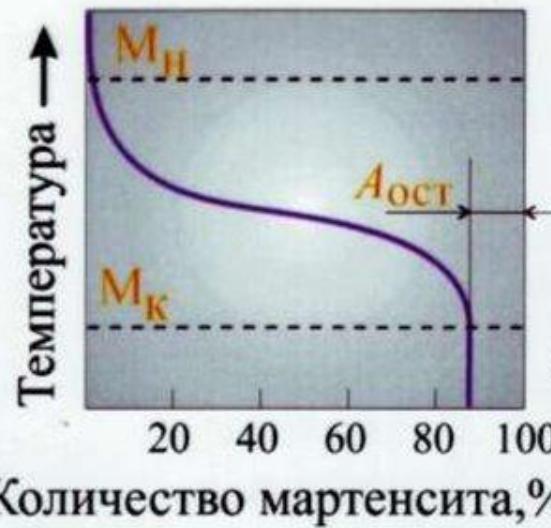
Мартенсит - пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$  - железе



$\frac{c}{a}$  - степень тетрагональности решетки мартенсита

$$\frac{c}{a} = 1 + 0,046 \cdot C (\%)$$

Кривая мартенситного превращения



$M_H$  и  $M_K$  - температуры начала и конца мартенситного превращения

$A_{ост}$  - остаточный аустенит

Структура мартенсита

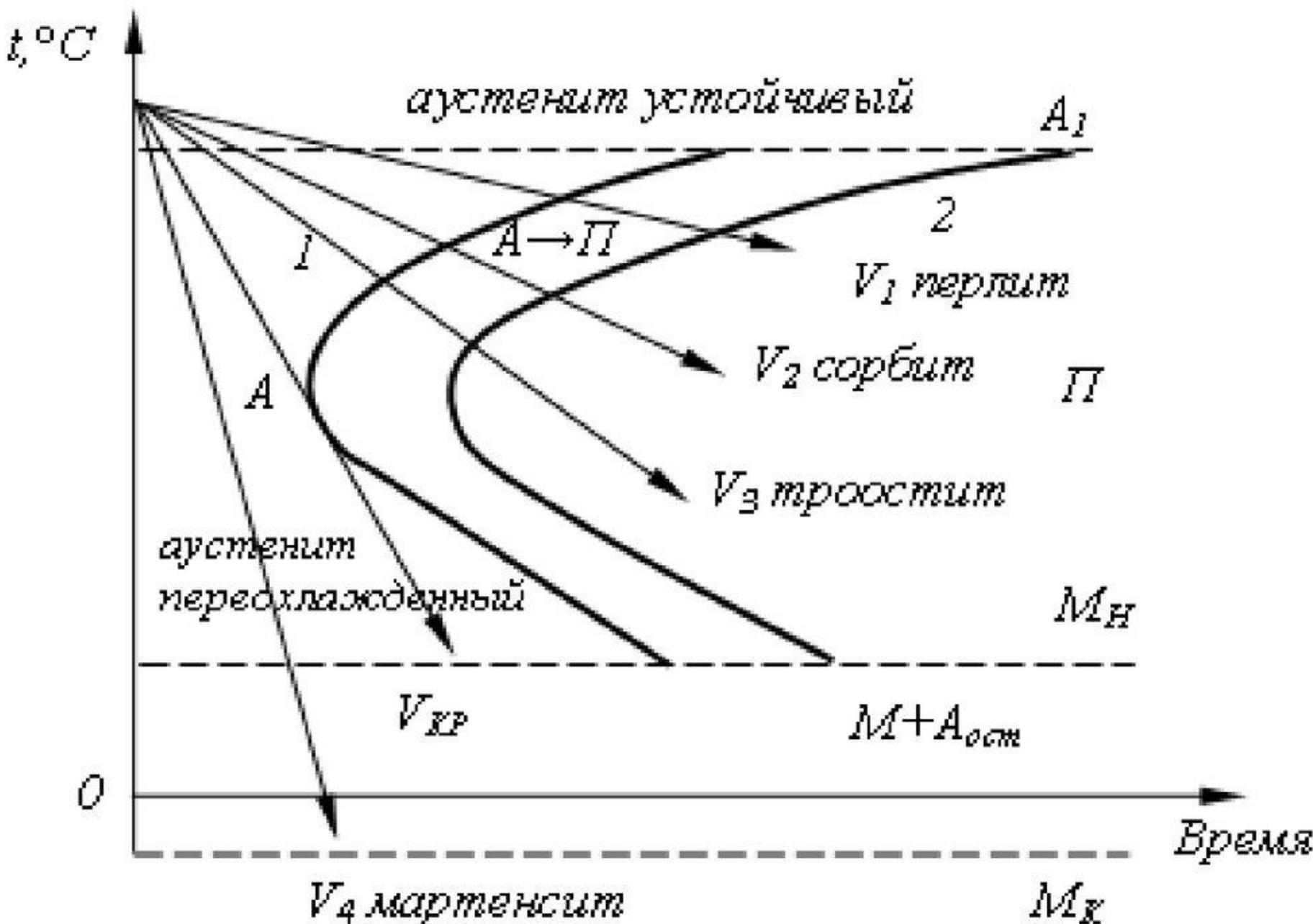


Пакетный (реечный) мартенсит

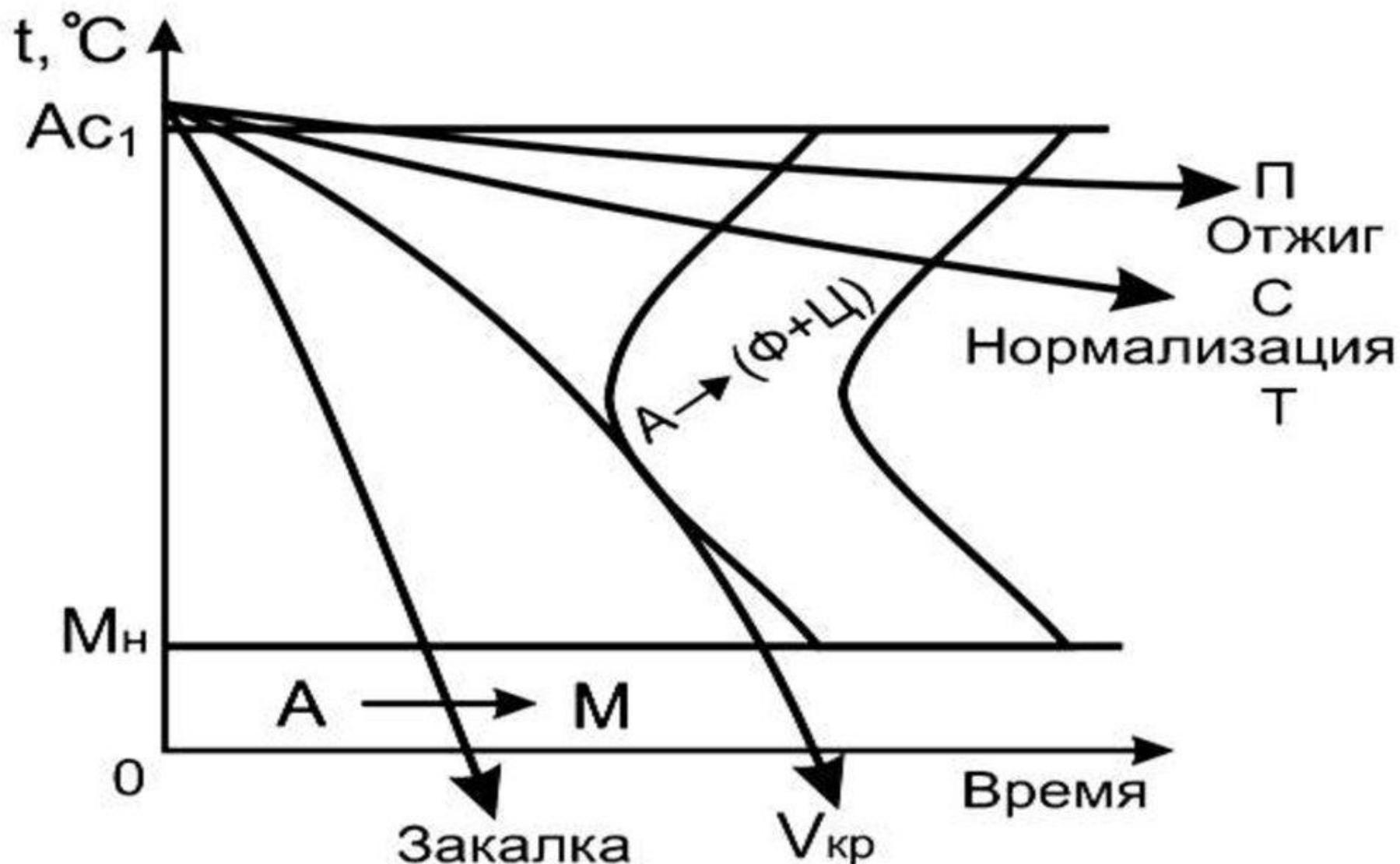


Пластинчатый (двойникованный) мартенсит

# ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

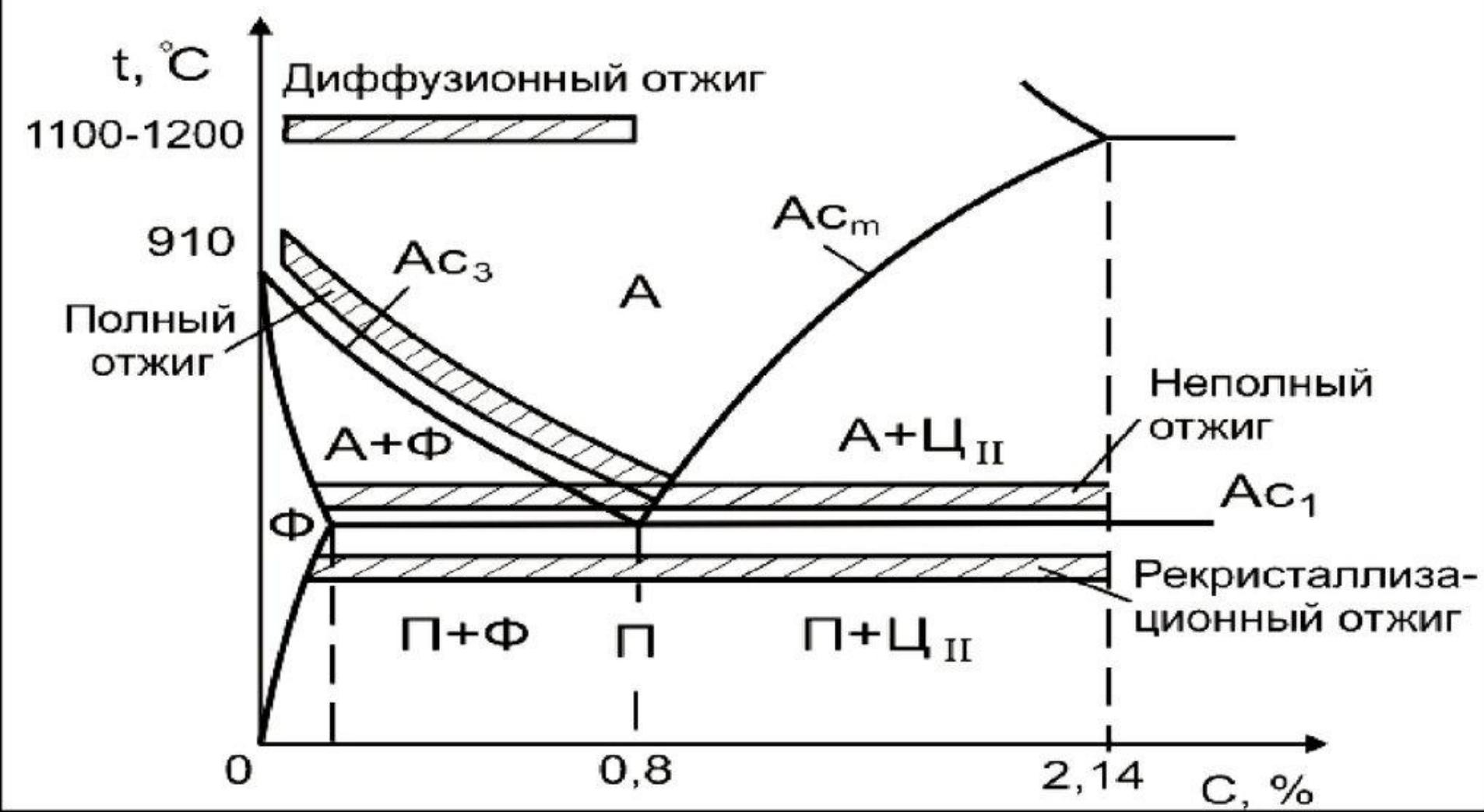


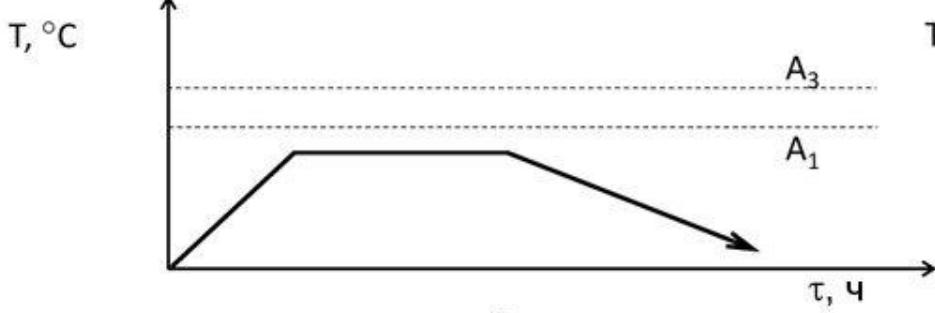
*Диаграмма изотермического распада аустенита для эвтектоидной стали с нанесенными на нее скоростями охлаждения при различных видах термообработки*



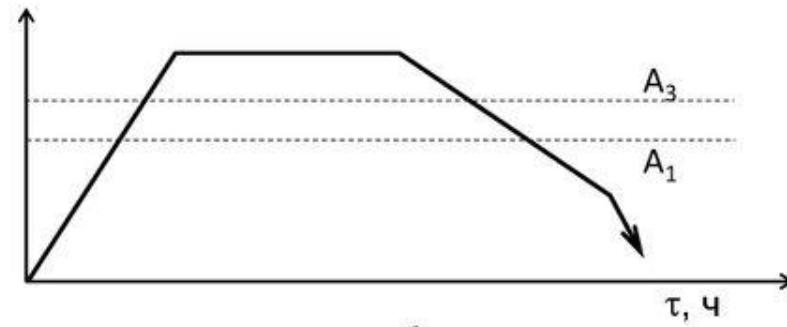
# ОТЖИГ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Операция термической обработки, связанная с нагревом до температуры отжига, выдержкой и последующем **медленном охлаждении** (вместе с печью)

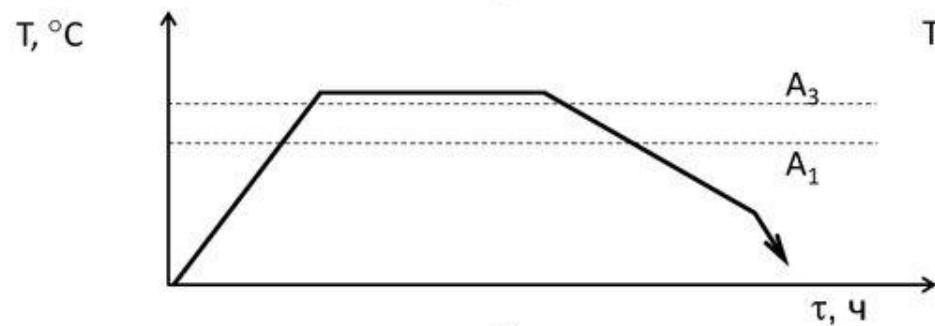




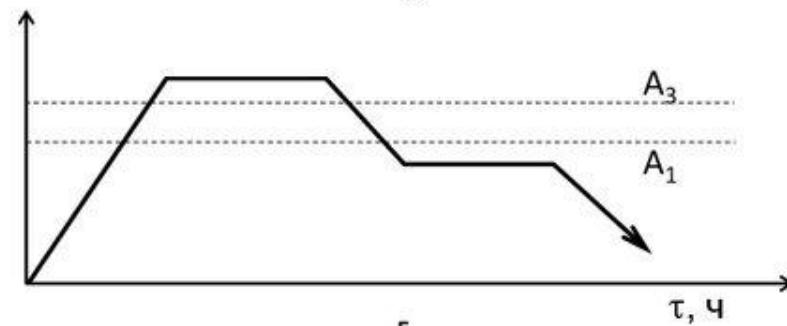
а



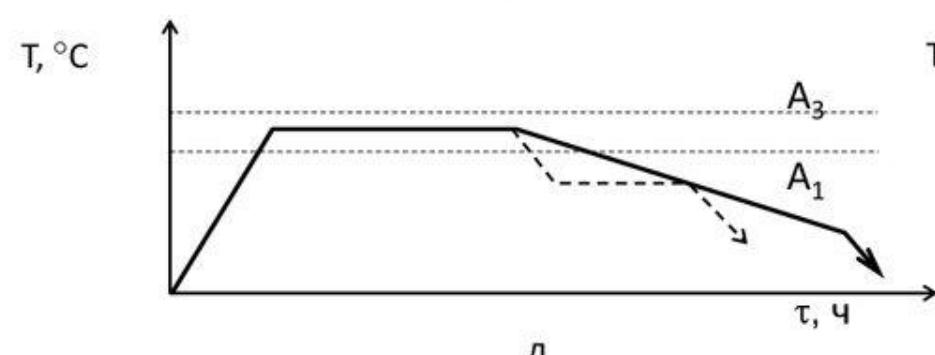
б



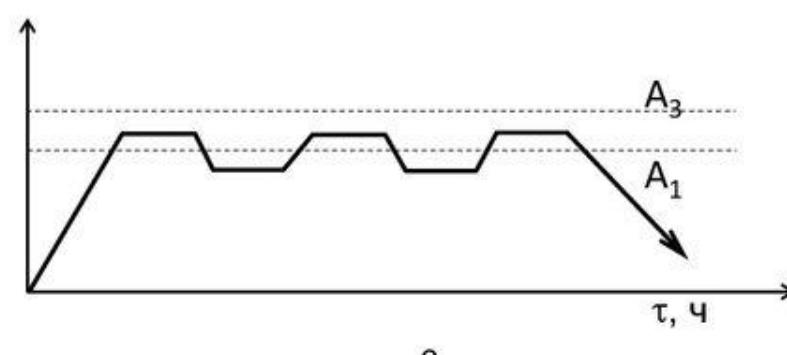
в



г



д



е

**Виды отжига стали:** а – рекристаллизационный и низкотемпературный;

- б – диффузионный;

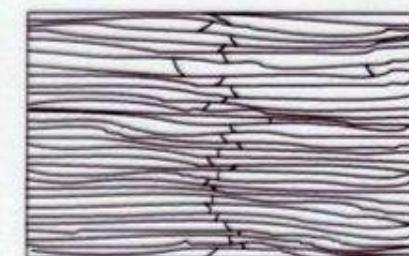
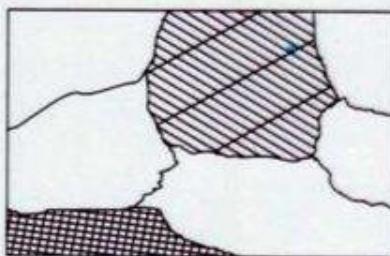
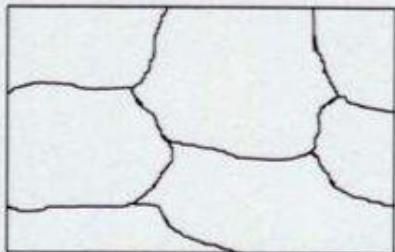
- г – изотермический;

- в – полный;

- д – неполный;

- е – циклический

# Изменение микроструктуры при пластической деформации

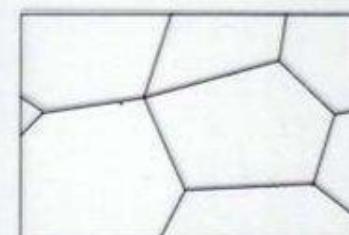
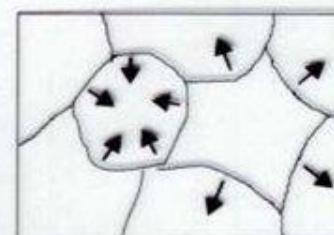
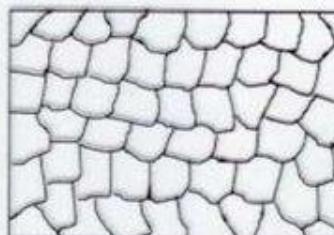
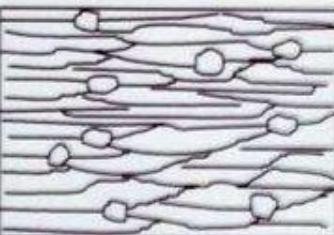
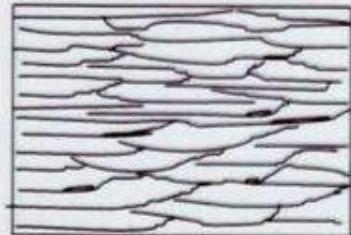


Исходная  
структура

Увеличение степени деформации →

Изменение микроструктуры деформированного  
металла при нагреве .

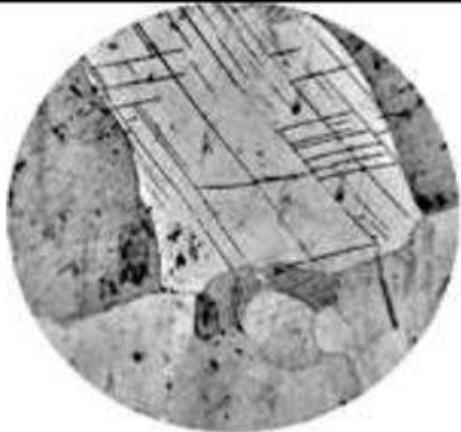
Температура нагрева →



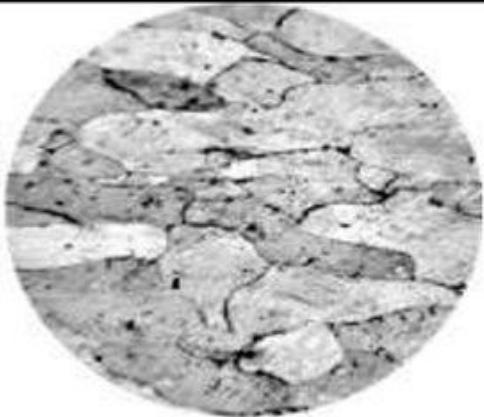
После деформации

Первичная рекристаллизация

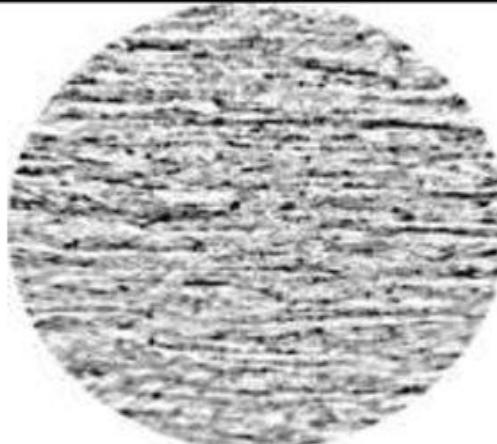
Собирательная рекристаллизация



Марка	сталь 05
Тип сплава:	Деформированные и рекристаллизованные сплавы
Травитель:	3% р-р азотной кислоты в спирте
Обработка:	обжатие 5%
Твердость (НВ, ГПа):	1.12
Описание:	Следы деформации - полосы (линии) сдвига в отдельных зернах, в которых плоскости легчайшего сдвига ближе к направлению максимальных касательных напряжений.



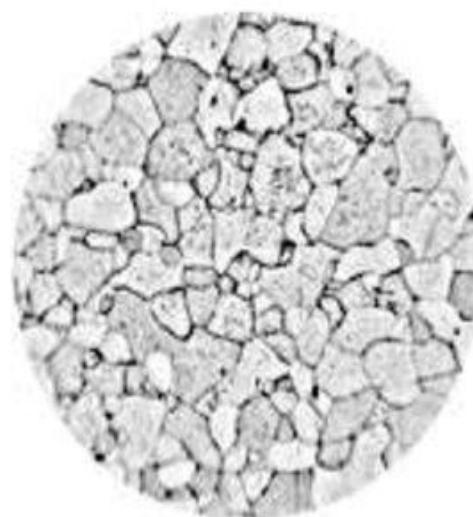
обжатие 30%  
**Твердость (НВ, ГПа):** 1.36



обжатие 80%  
**Твердость (НВ, ГПа):** 2.1

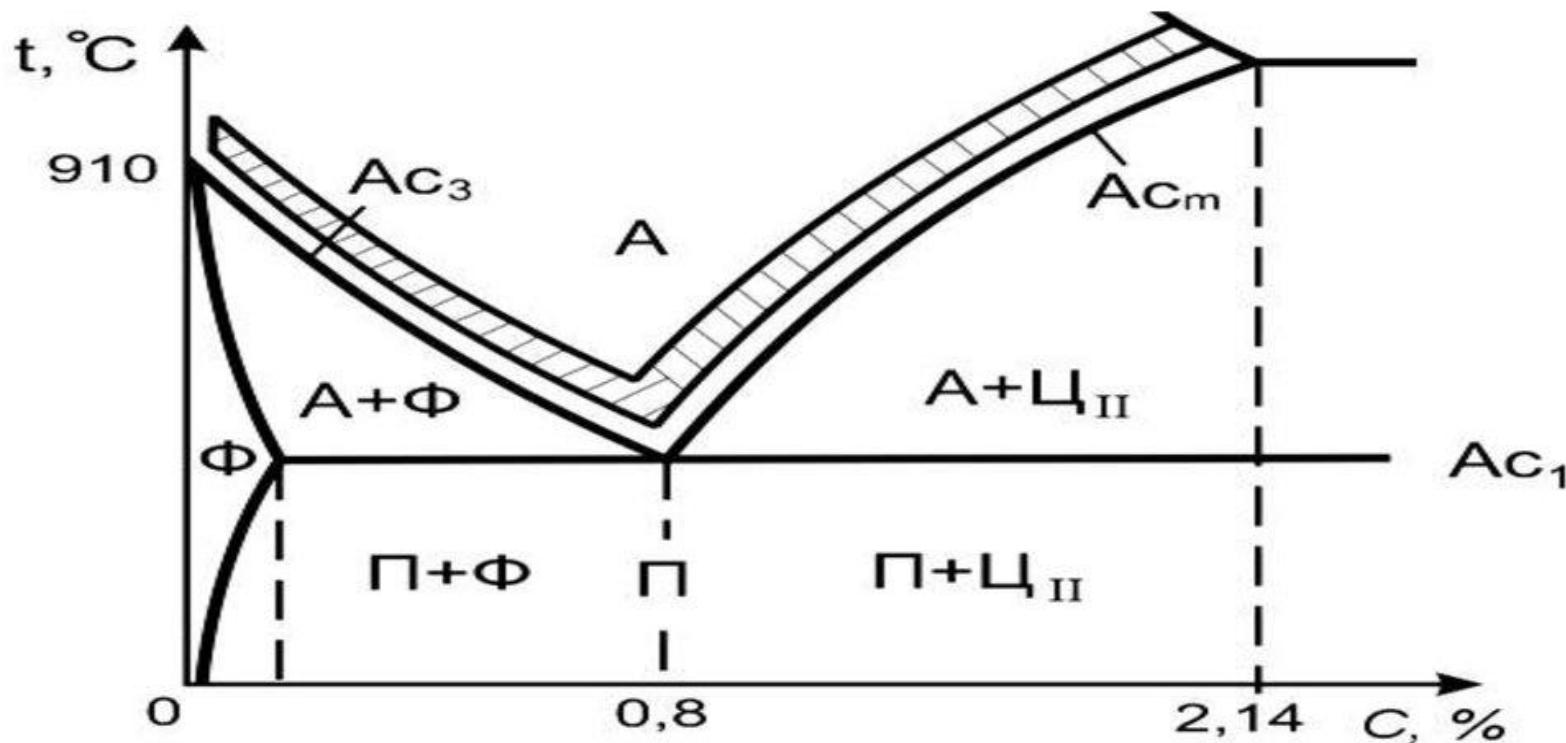


обжатие 80%,  
Отжиг при 600°C  
**Твердость (НВ, ГПа):** 1.06



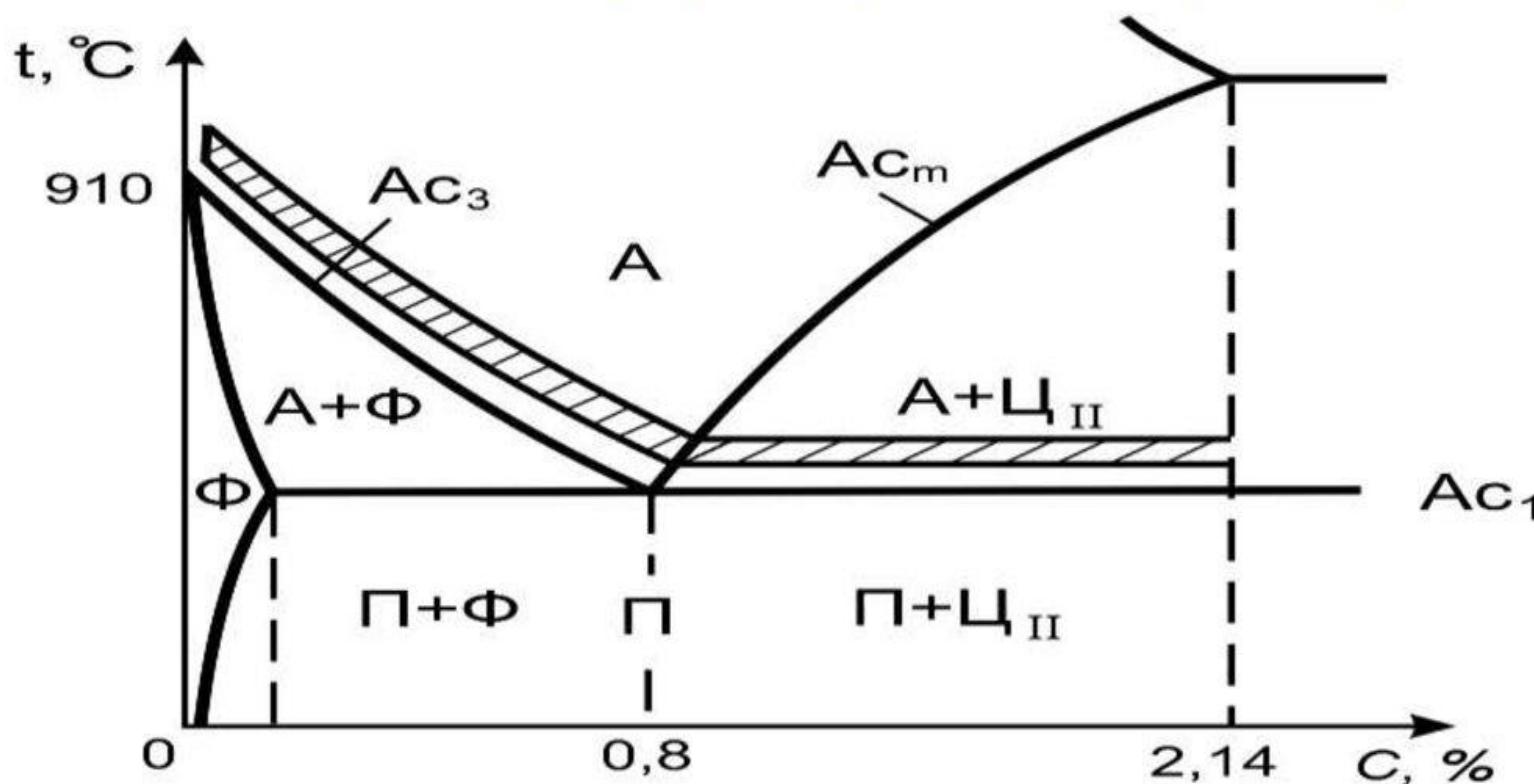
обжатие 80%,  
Отжиг при 700°C  
**Твердость (НВ, ГПа):** 1.04

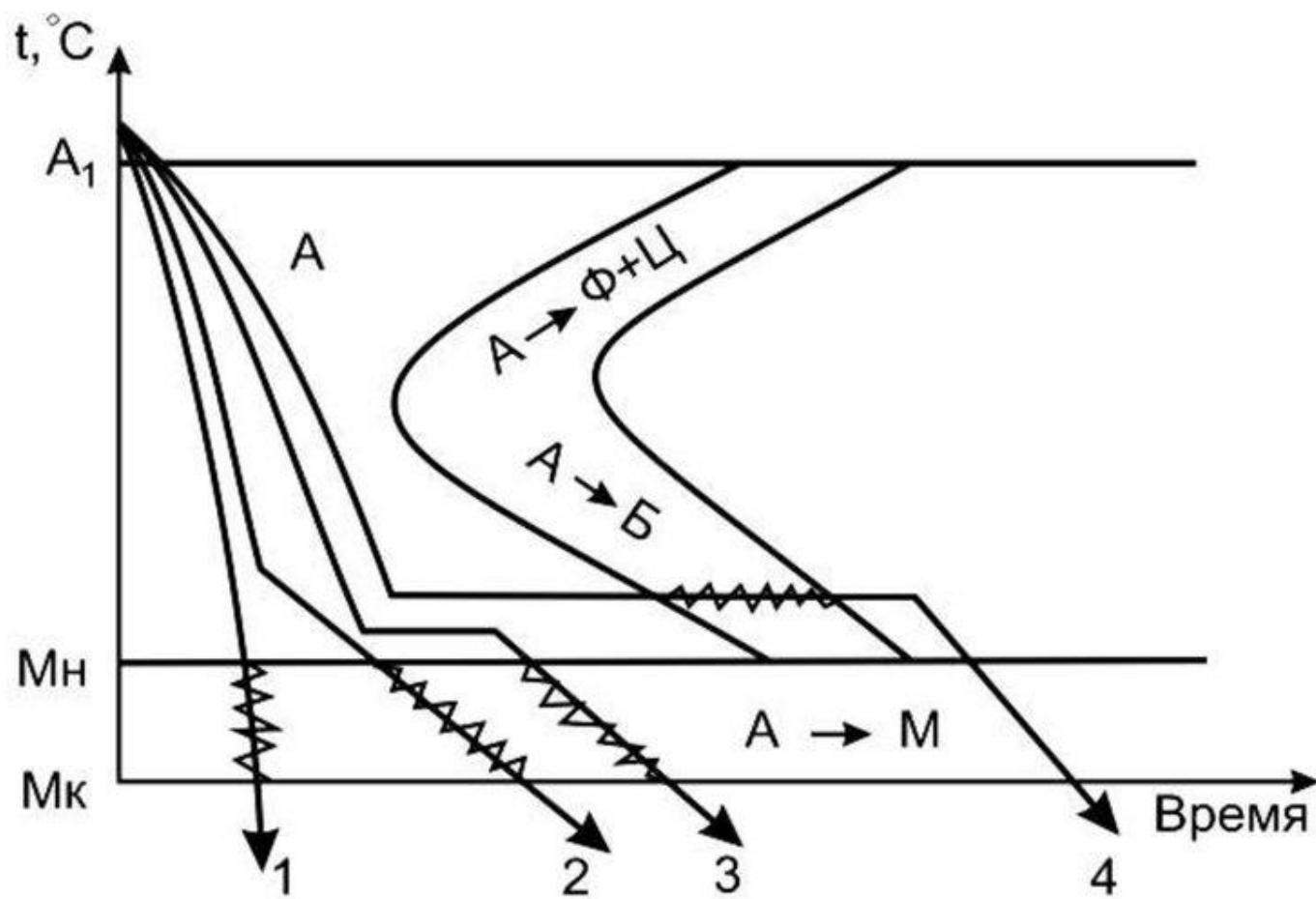
**НОРМАЛИЗАЦИЯ** (нормализационный отжиг) – операция ТО, связанная с нагревом стали до аустенитного состояния, выдержки при температуре нагрева и последующего **ускоренного охлаждения на воздухе** (получаются следующие структуры: **сорбит+феррит в доэвтектоидных сталях (С+Ф);** **сорбит в эвтектоидных сталях (С);** **сорбит+вторичный цементит в заэвтектоидных сталях )**



Температурный интервал нагрева стали под нормализацию

**ЗАКАЛКА** - операция ТО, заключается в нагреве стали до температуры выше критической (доэвтектоидных сталей на 30 - 50°C выше  $Ac_3$  (**полная**), заэвтектоидных на 30 - 50°C выше  $Ac_1$ ,) (**неполная**) выдержке и последующем охлаждении со скоростью выше **критической** с целью получения мартенситной структуры, обеспечивающей максимальную твердость, прочность и износостойкость (**не является окончательной операцией термической обработки**)

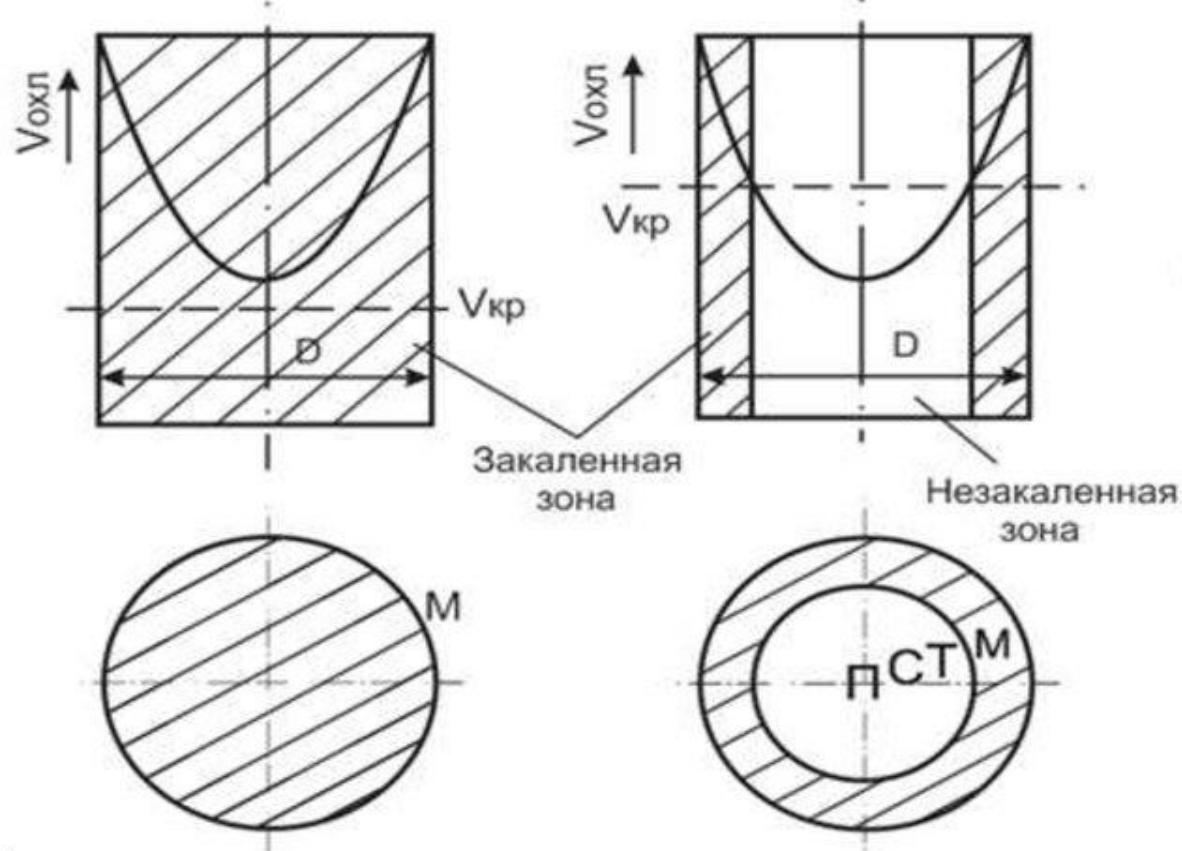
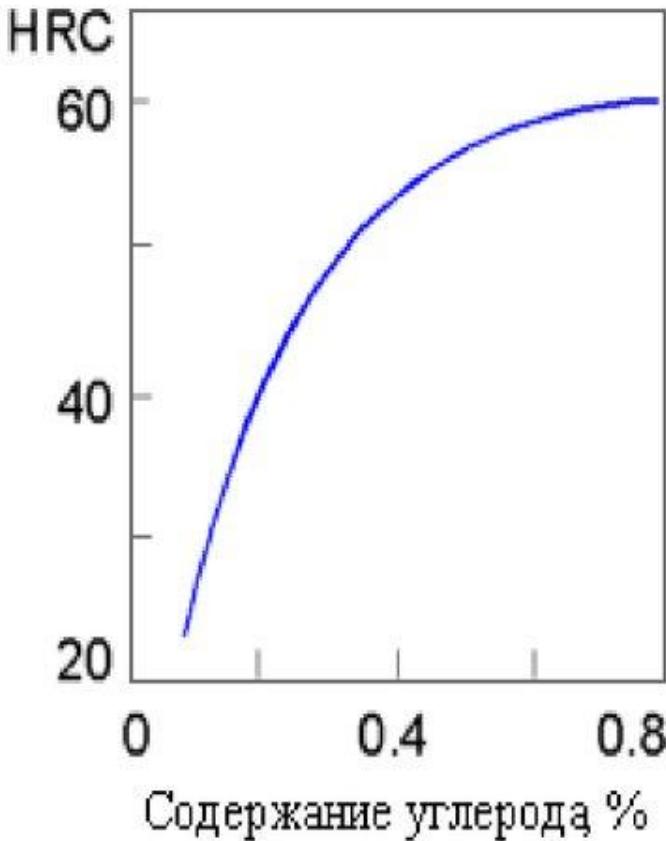




## Способы охлаждения при закалке сталей:

- 1 – непрерывная закалка;
- 2 – закалка в двух средах;
- 3 – ступенчатая закалка;
- 4 – изотермическая закалка;

# ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ И ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛИ



**Закаливаемость** – это способность стали повышать твердость в результате закалки (чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость).

**Прокаливаемость** – это способность стали получать закаленный слой на определенную глубину. Под закаленным слоем понимают слой со структурой мартенсита или троосто-мартенсита, обладающий высокой твердостью.

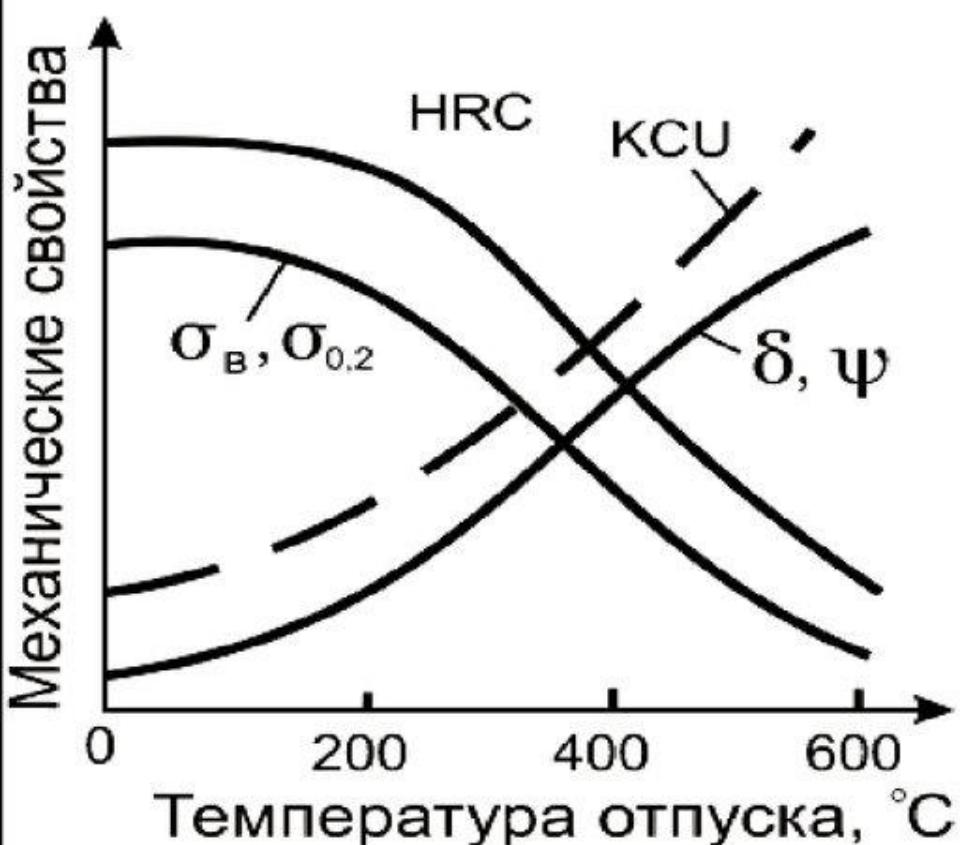
**ОТПУСК** - операция ТО, связанная с нагревом закаленной стали до температуры ниже  $Ac_1$ , выдержке и последующем охлаждении с определенной скоростью. Он является окончательной операцией термической обработки, т.к. обеспечивает требуемые механические свойства стали и полностью или частично устраняет внутренние напряжения (температурные и структурные), возникающие при закалке.

**ВИДЫ ОТПУСКА:** 1) **Низкий отпуск.** Нагрев – 150 – 200°C, выдержка – 1 – 1,5 часа. Снижаются внутренние напряжения. Мартенсит закалки переходит в мартенсит отпуска. Твердость (60 – 64 HRC).

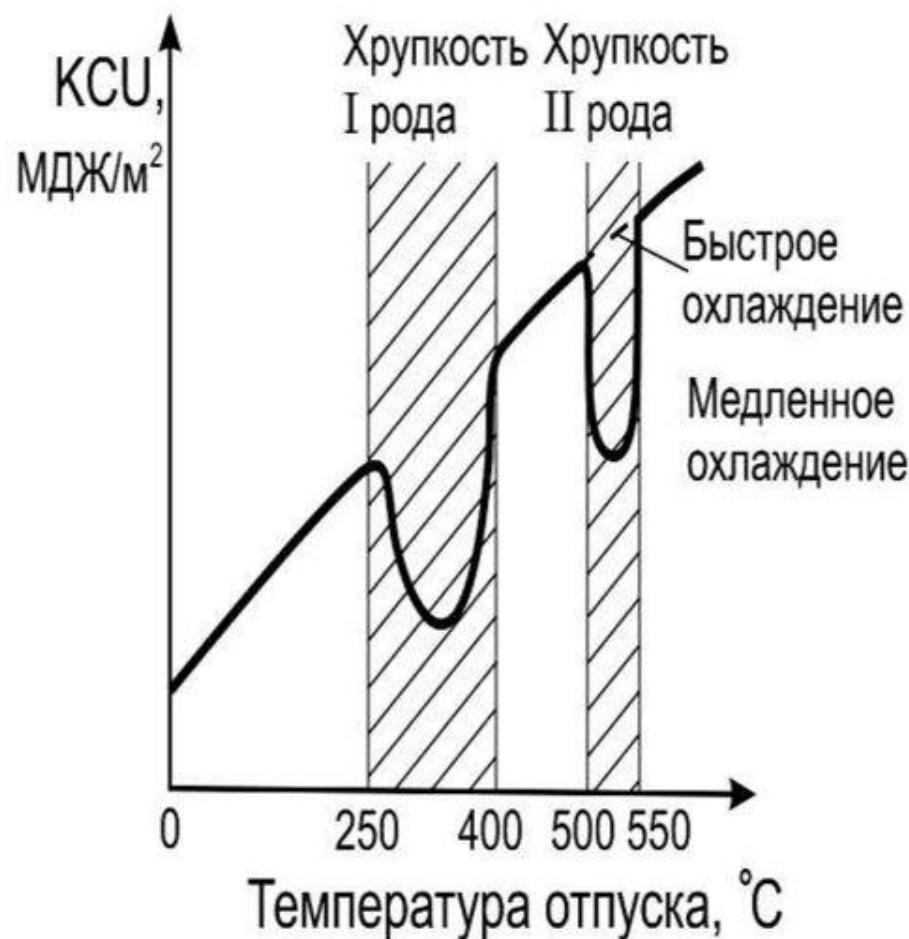
2) **Средний отпуск.** Нагрев – 350 – 500°C, выдержка – 1 – 8 ч. мартенсит закалки переходит в троостит отпуска – 40 – 45 HRC. Обеспечивается наилучшее сочетание предела упругости с пределом выносливости.

3) **Высокий отпуск.** Нагрев – 500 – 680°C, выдержка – 1 – 8 ч. Полностью снимаются внутренние напряжения. Структура – сорбит отпуска – 25 – 35 HRC. Наилучшее соотношение прочности, пластичности и ударной вязкости стали.

## *Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали*



*Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали с 0,4%С*



*Влияние температуры отпуска на ударную вязкость стали*

## **ОТПУСКНАЯ ХРУПКОСТЬ**

**Это понижение ударной вязкости при отпуске.** В зависимости от температуры проявления различают отпускную хрупкость I и II рода.

**Отпускная хрупкость I рода, или необратимая отпускная хрупкость, проявляется в температурном интервале 250 - 400°С. Она наблюдается у всех конструкционных сталей. Хрупкость этого рода связывают с неравномерным распадом мартенсита, когда карбиды образуются преимущественно по границам зерен и охрупчивают сталь.**

Хрупкость этого вида необратима: повторный отпуск при той же температуре не повышает ударную вязкость. Хрупкость устраняется нагревом до температуры выше 400°С, но снижает твердость.

**Отпускная хрупкость II рода, или обратимая отпускная хрупкость, возникает в температурном интервале 500 - 550°С. Она наблюдается в сталях, содержащих Cr, Mn, Ni, повышенное количество фосфора, если они медленно охлаждаются после отпуска.**

Наиболее вероятная причина хрупкости II рода заключается в обогащении границ зерен фосфором и другими элементами внедрения, что способствует образованию межзеренных трещин.

Хрупкость II рода является обратимой, она устраняется повторным отпуском с последующим быстрым охлаждением для подавления диффузия атомов фосфора и предотвращения образования его скоплений.

## ВЫБОР ОПЕРАЦИЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

**Закалке и низкому отпуску** подвергают детали машин, работающие в условиях изнашивания, высоких контактных нагрузок, например, детали подшипников качения, режущий, измерительный инструмент. *Структура* для доэвтектоидной стали – мартенсит отпуска (**полная закалка**), для заэвтектоидной – мартенсит отпуска + цементит вторичный (**неполная закалка**). **Твердость – 60 HRC**)

**Закалку с последующим средним отпуском** применяют для упругих элементов машин из высокоуглеродистых сталей: пружин, мембран, рессор *Структура* – троостит отпуска, обеспечивает высокий предел упругости, выносливости и релаксационную стойкость.

**Твердость – 40 HRC.**

**Полная закалка с последующим высоким отпуском,** (**называется термическим улучшением**) создает наилучшее сочетание прочности и пластичности стали, **повышенная ударная вязкость**, и применяется для деталей машин из среднеуглеродистых сталей, испытывающих статические и динамические или циклические нагрузки (валы, шатуны, оси, крепежные детали). *Структура* – зернистый сорбит отпуска.

**Твердость – 30 HRC.**

## Пример выполнения индивидуального задания

Выбрать режим термической обработки кронштейна, из стали 25Л для устранения перегрева и получения твердости 280 НВ (30 HRC). Описать превращения в структуре стали на всех стадиях операций ТО.

Указанная твердость соответствует структуре **Сорбит отпуска**. Получение этой структуры для доэвтектоидной стали возможно полной закалкой на мартенсит и последующим высоким отпуском. Перегрев устраняется полным отжигом (на мелкое зерно) или нормализацией. Температура нагрева  $T_h = Ac_3 + (30 - 50) ^\circ C = 820 + (30 - 50) = 850 - 870 ^\circ C$ . (температура критической точки  $Ac_3$  определяется по линии GS диаграммы железо – цементит).

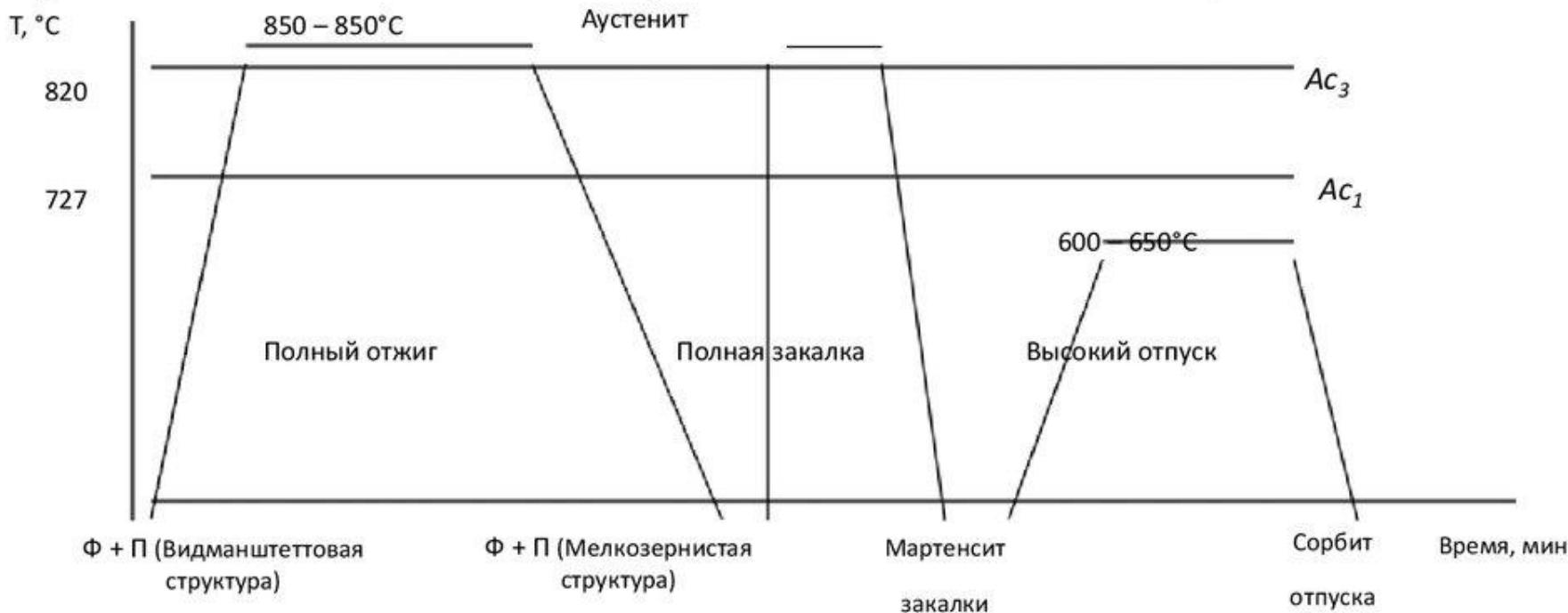
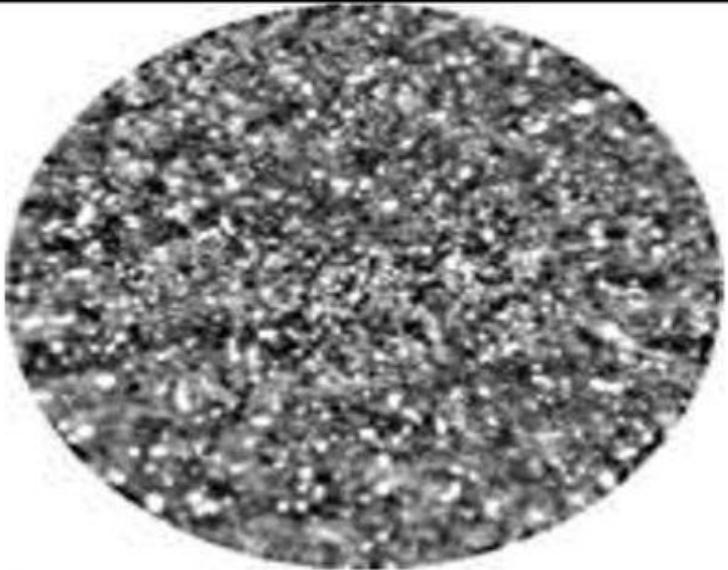
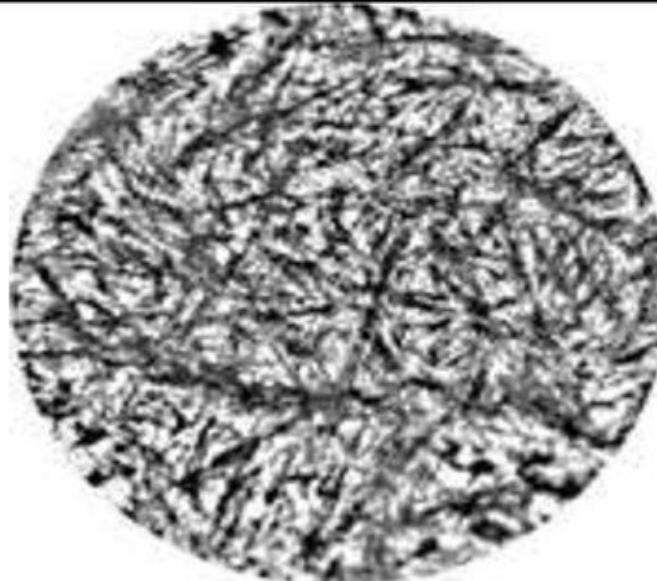


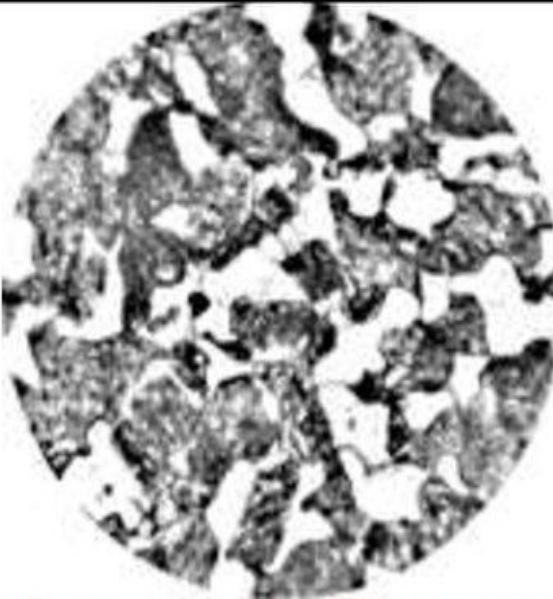
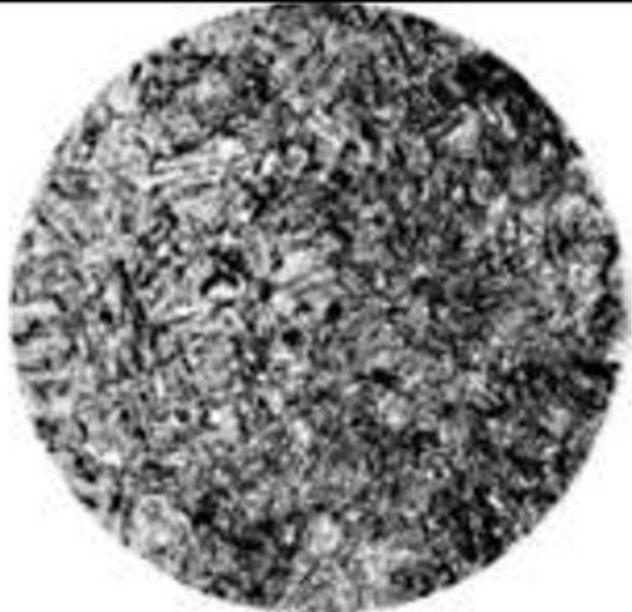
График термической обработки кронштейна из стали 25Л



**Марка** сталь У12  
**Травитель:** 3% р-р азотной кислоты в спирте  
**Обработка:** закалка с 750°C в воду (не полная)  
**Твердость (НВ, ГПа):** 6.74  
**Структурные составляющие:** мартенсит , цементит вторичный  
**Субструктура:** Игольчатая (подобная мартенситу)  
Неполная закалка.  
Включения зернистого цементита в мартенситной матрице.  
**Описание:** Остаточный аустенит имеется, но не выявляется.



**Тип сплава:** Стали термообработанные  
**Обработка:** закалка с 950°C в воду (полная)  
**Твердость (НВ, ГПа):** 5.41  
**Компоненты:** С (1.2 масс%)  
**Структурные составляющие:** мартенсит , аустенит остаточный  
**Субструктура:** Однородная  
**Форма включений:** Игольчатые ориентир.  
**Описание:** Иглы мартенсита (серые) на фоне большого количества остаточного аустенита (светлая матрица). Хорошо видно ориентированное расположение кристаллов мартенсита относительно решетки аустенита.



Марка	сталь 45	Обработка: закалка с 750°C в воду (не полная)
Тип сплава:	Стали термообработанные	Твердость (НВ, ГПа): 3.98
Травитель:	3% р-р азотной кислоты в спирте	Структурные составляющие:
Обработка:	закалка 850°C (полная)	мартенсит , феррит , аустенит остаточный
Твердость (НВ, ГПа):	5.66	Описание:
Компоненты:	C (0.45 масс%)	БРАК. Неполная закалка. Сохраняется избыточный феррит (светлые включения), существовавший перед началом охлаждения и наблюдается образовавшийся при закалке мартенсит с небольшим количеством остаточного аустенита между его иглами.
Структурные составляющие:	мартенсит	
Субструктура:	Игольчатая (подобная мартен	