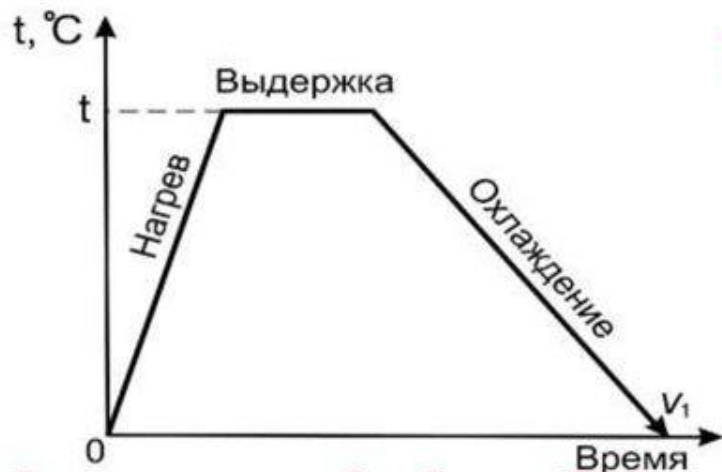


# Любая термическая обработка состоит из нагрева до определенной температуры, выдержки и

## охлаждения



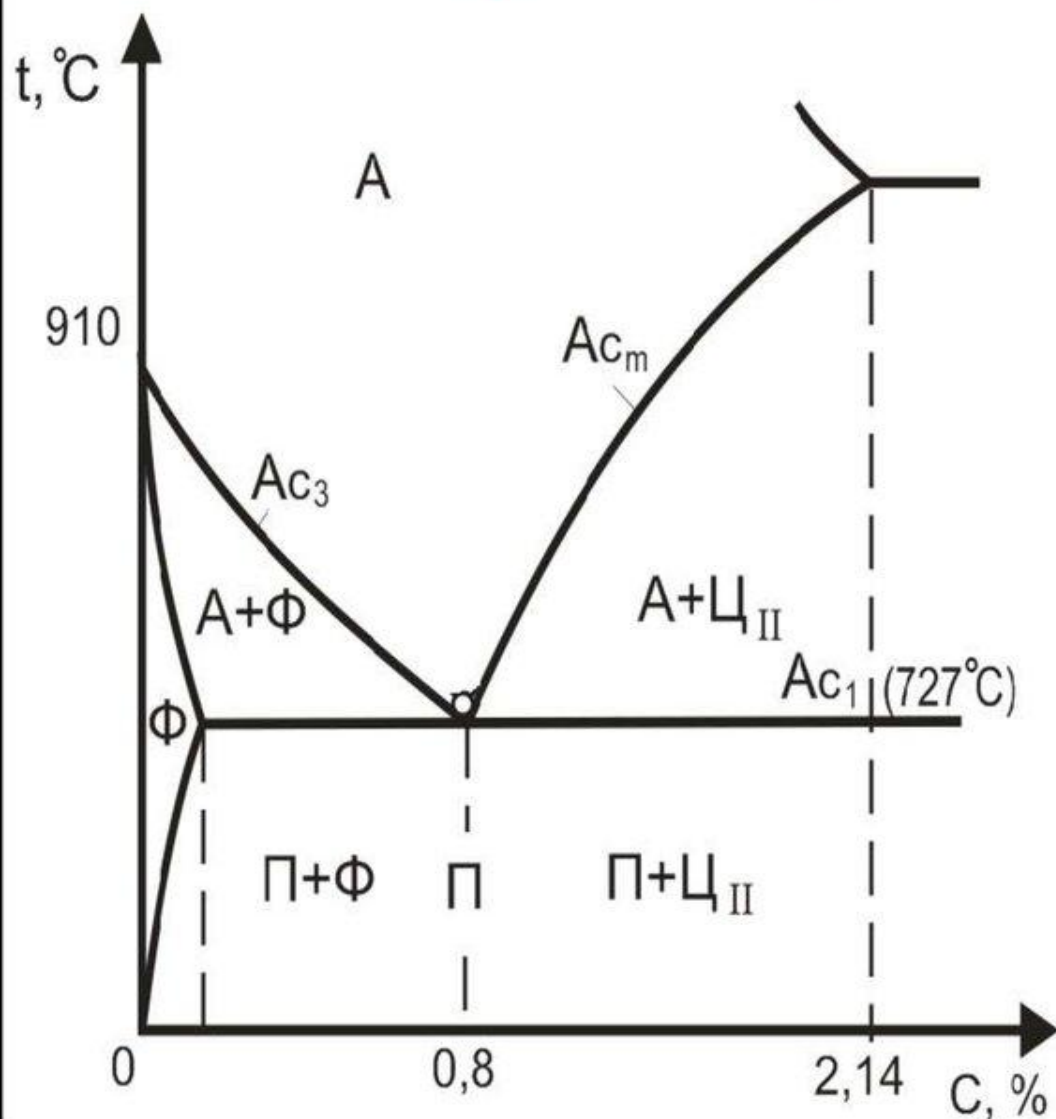
Режим термообработки (ТО) представляется графиком в координатах температура – время. Он характеризуется параметрами:

- 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



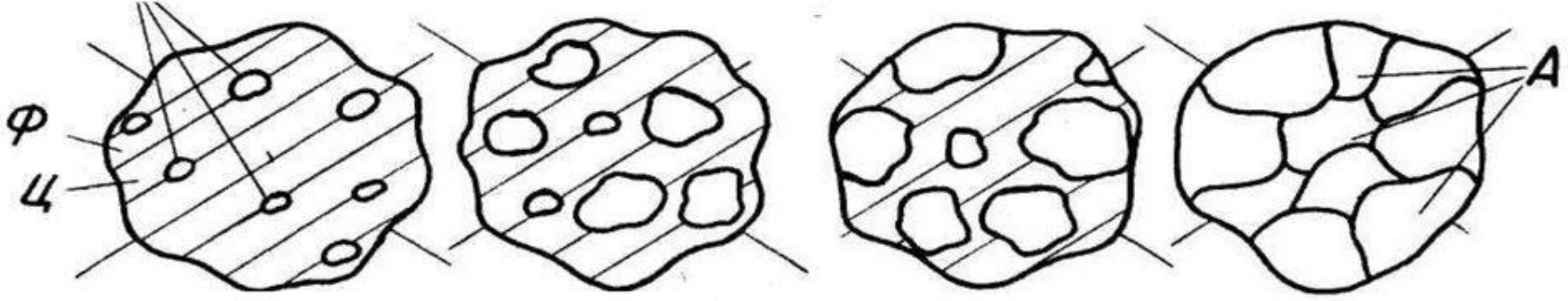
**$AC_1$**  – критическая точка перлитного превращения.  $727^\circ\text{C}$  (линия PSK). При этой температуре происходит перекристаллизация перлита в аустенит ( $\text{П} \rightarrow \text{A}$ ).

**$AC_3$**  – критическая точка полной перекристаллизации в аустенит доэвтектоидной стали.  $(\Phi + \text{A}) \rightarrow \text{A}$ . Температура ее определяется по линии GS в зависимости от содержания углерода в стали.

**$AC_m$**  – 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

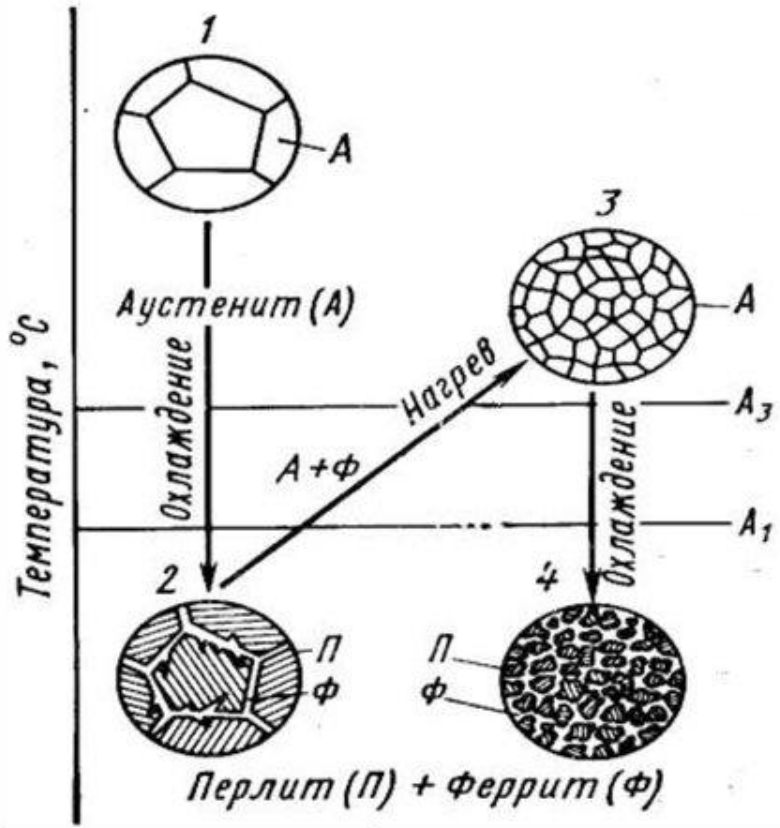
Размер начальных зерен Аустенита



Размер исходного зерна Аустенита (перлита)

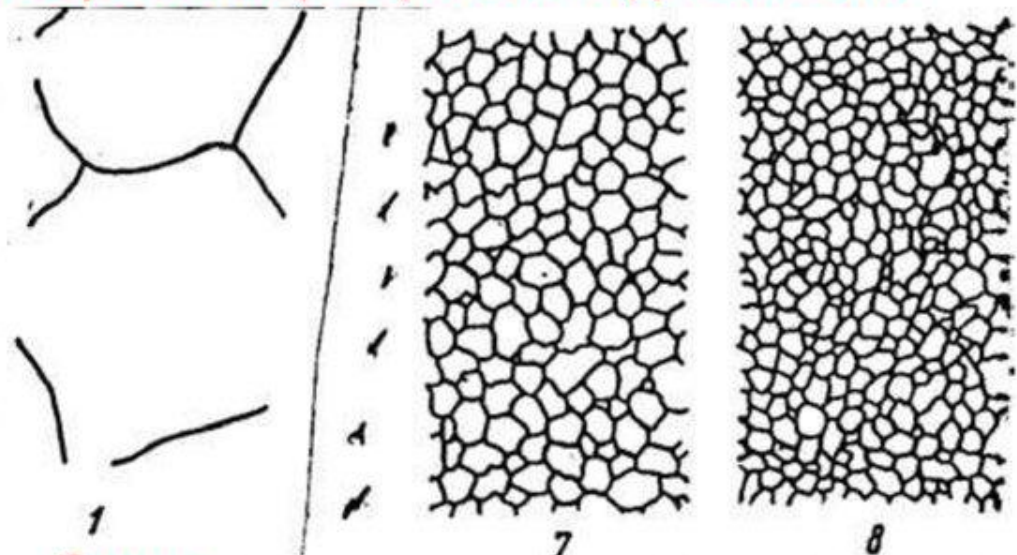
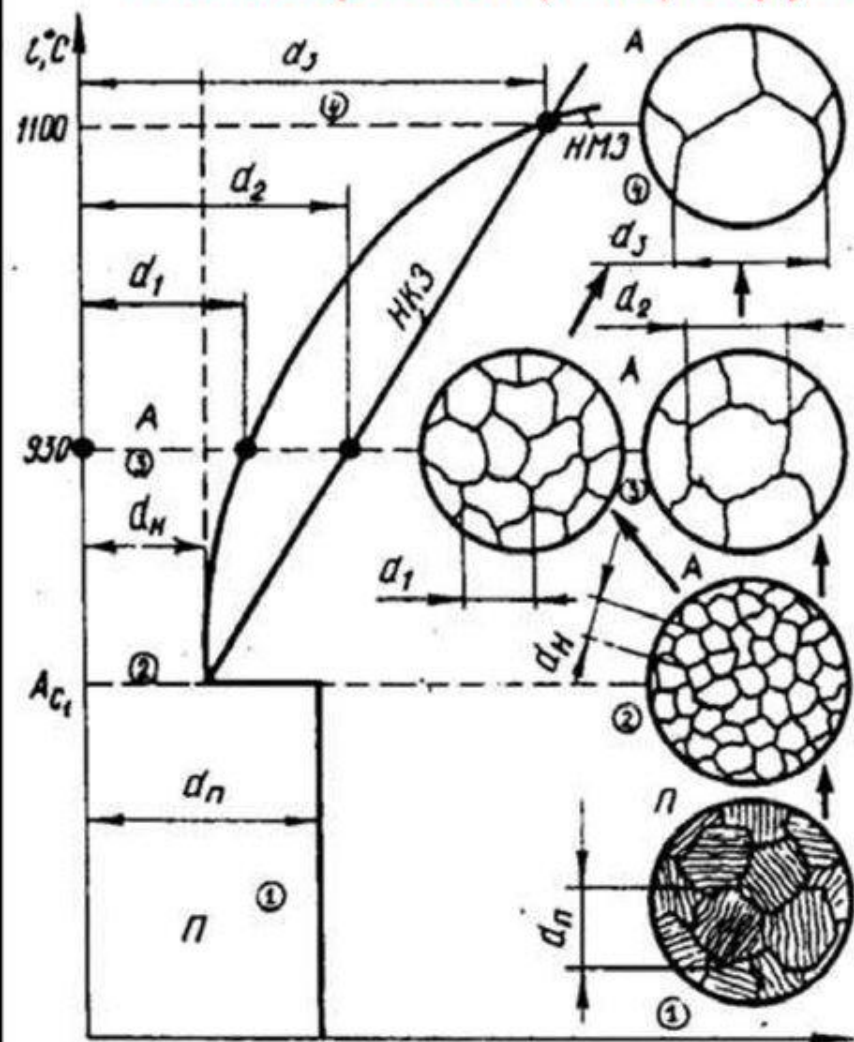
### Схема перекристаллизации перлита в аустенит

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



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**.

Размер зерна  $d$

$d_{п}$  – исходный размер зерна перлита;

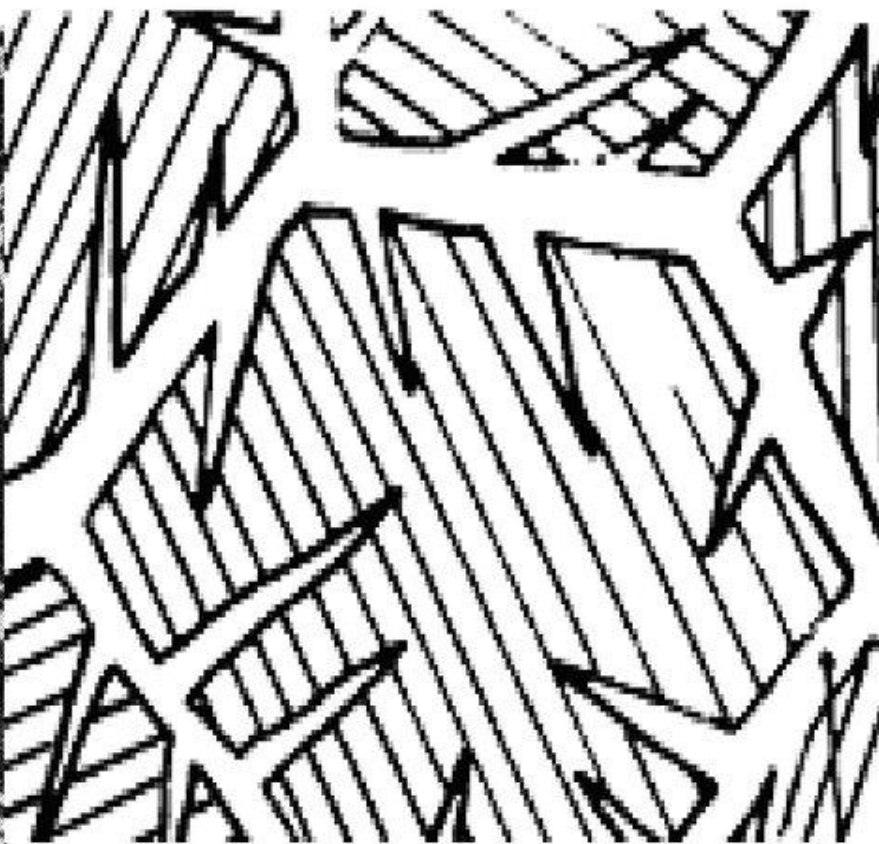
$d_{н}$  – размер начальных зерен аустенита;

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

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



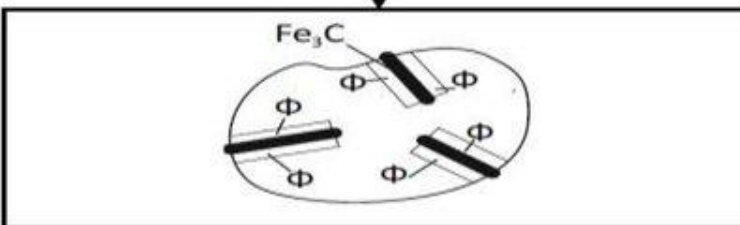
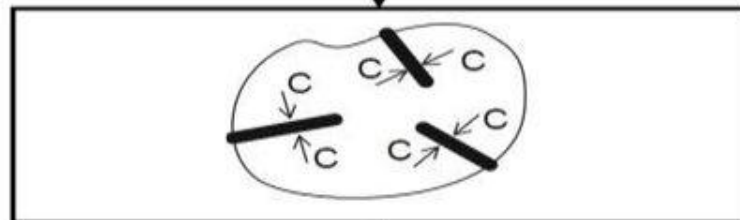
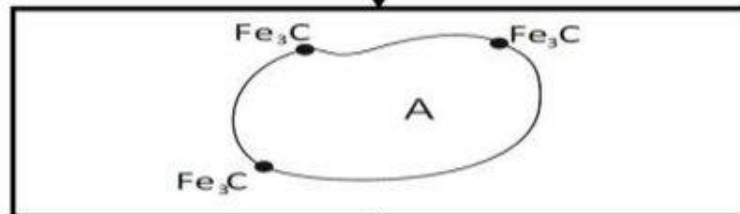
а)



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 $A \rightarrow П$



Процесс повторяется

Диффузия углерода к границам зерна аустенита и образование зародышей цементита  $Fe_3C$

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

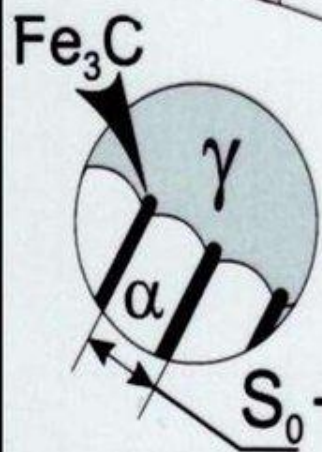
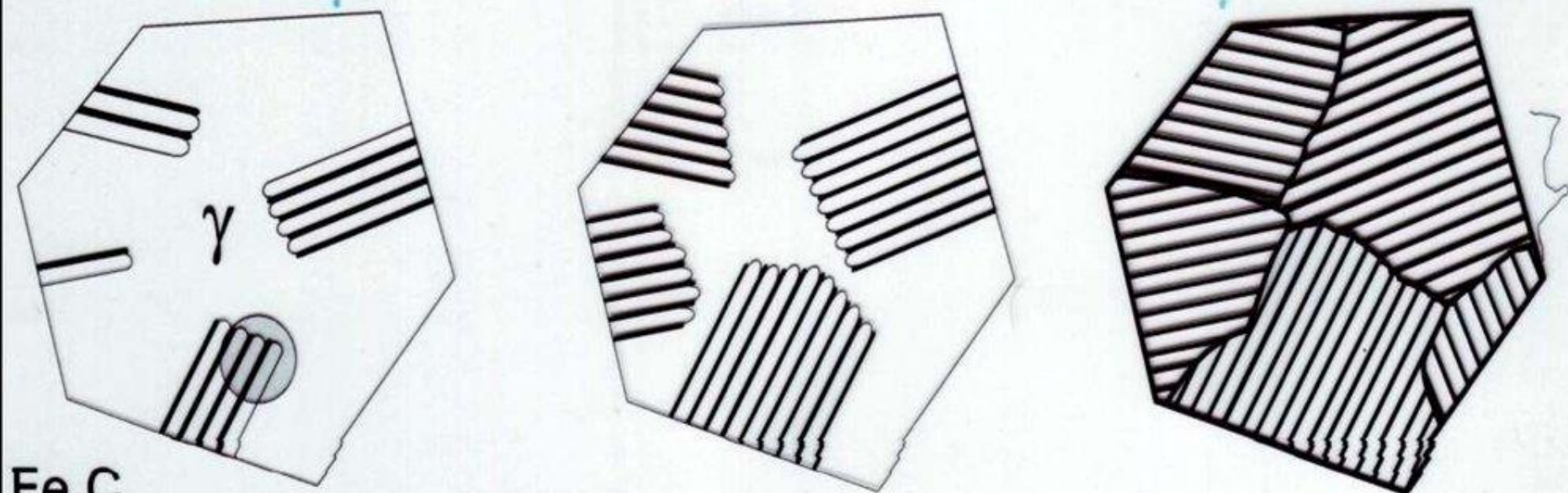
Полиморфное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение участков обедненного углеродом аустенита в феррит

Рост пластинок феррита, отеснение атомов углерода в соседние объемы аустенита, возникновение новых зародышей цементита  $Fe_3C$ , далее процесс повторяется, образуются перлитные колонии

СХЕМА ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В ПЕРЛИТ

# ● ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

## Схема образования перлита в зерне аустенита



$S_0$  - межпластинчатое расстояние

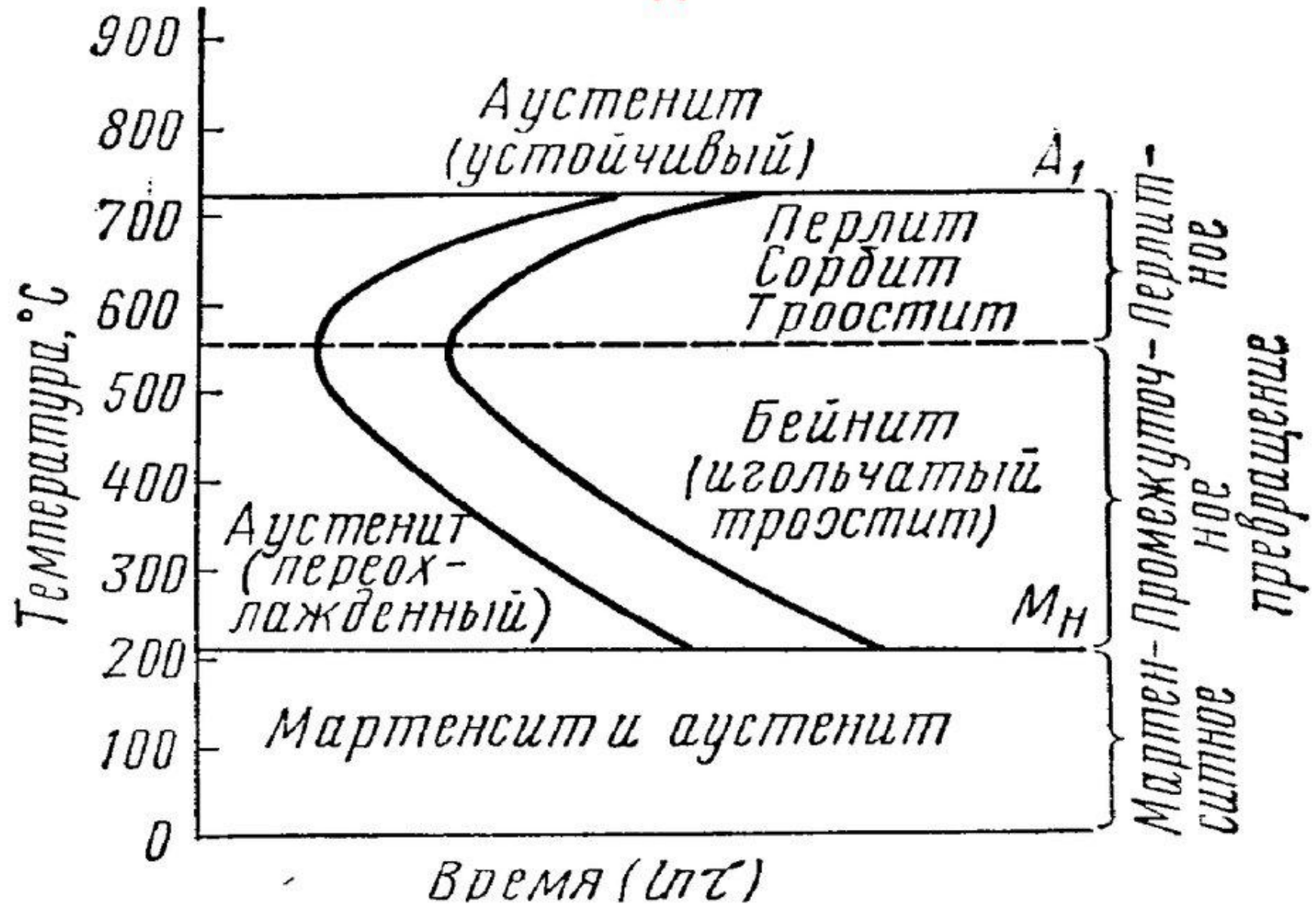
В зависимости от дисперсности различают:

- **перлит** (700-650<sup>0</sup>С)  $S_0=0,5-1,0$  мкм
- **сорбит** (650-600<sup>0</sup>С)  $S_0=0,2-0,4$  мкм
- **троостит** (600-550<sup>0</sup>С)  $S_0<0,1$  мкм

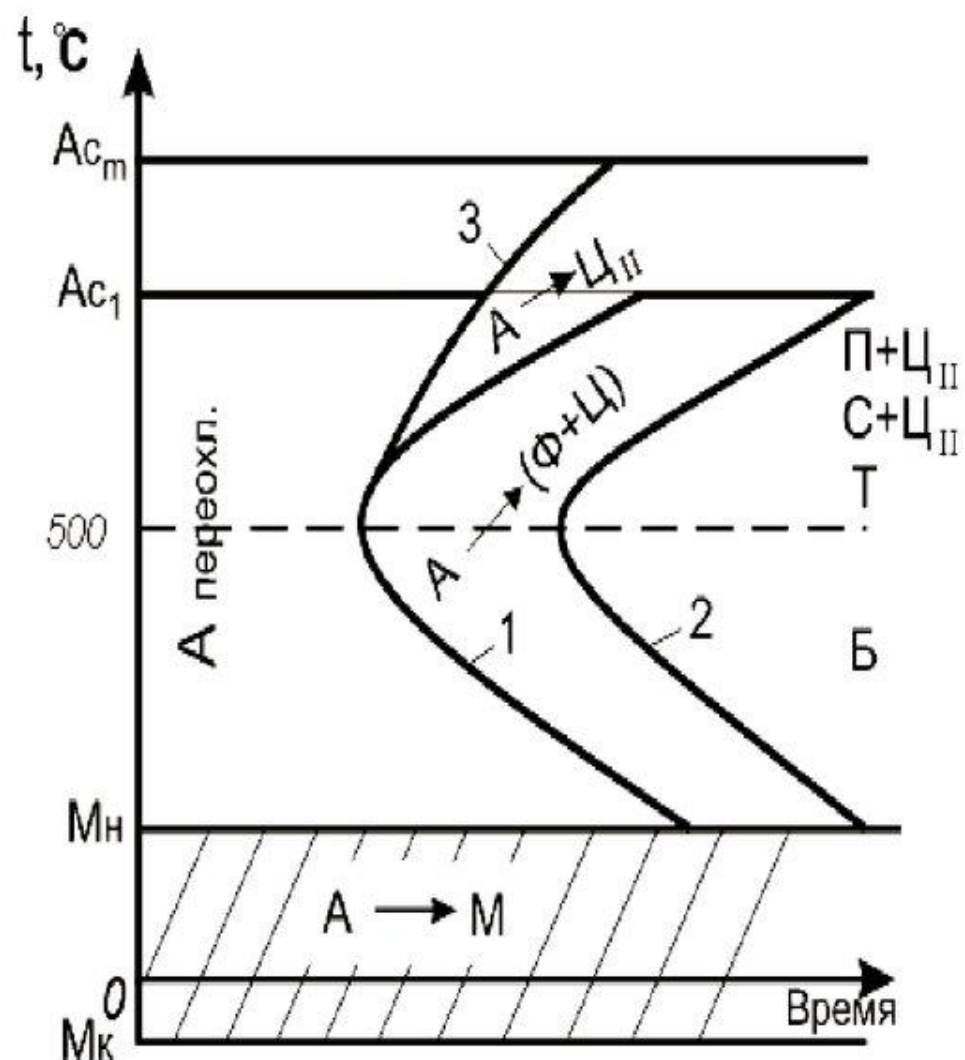
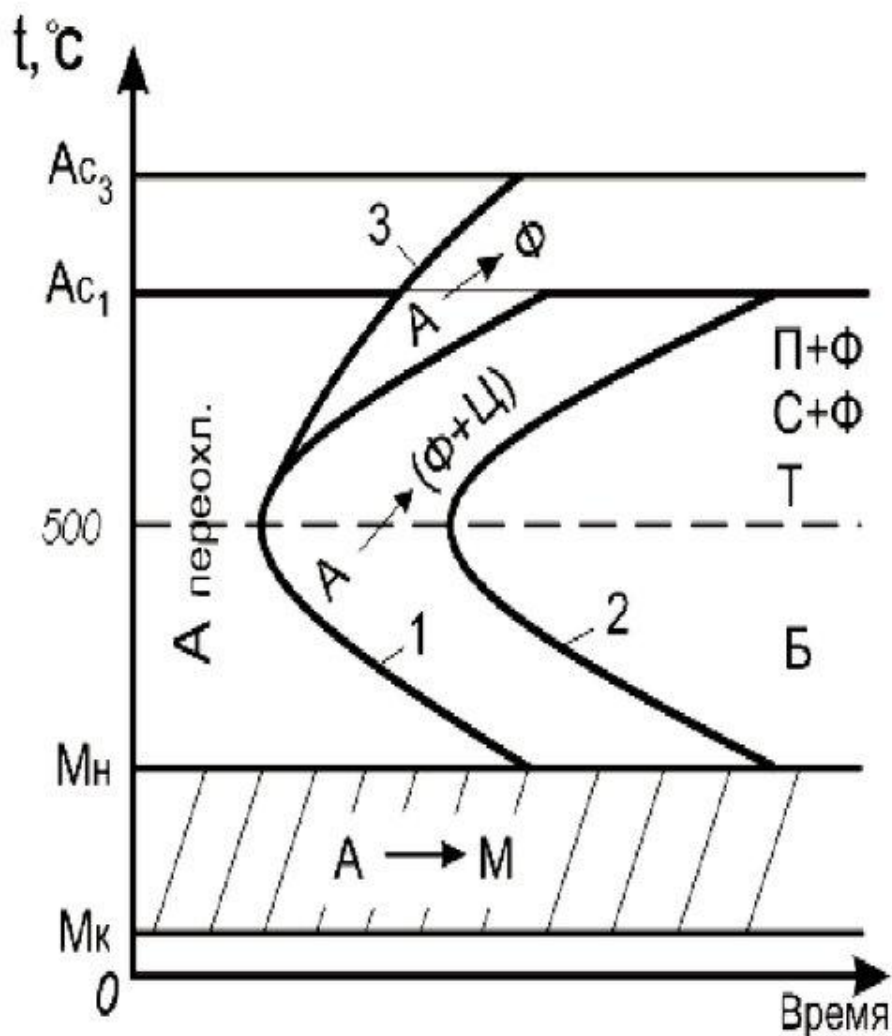
- В зависимости от полноты протекания диффузионных процессов возможны три принципиально различных по механизму превращения аустенита:
- *перлитное – полностью диффузионное, протекает в интервале температур от  $A_1$  (727°C) до 500°C;*
- *бейнитное – частично диффузионное, идет в температурном интервале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



# 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)

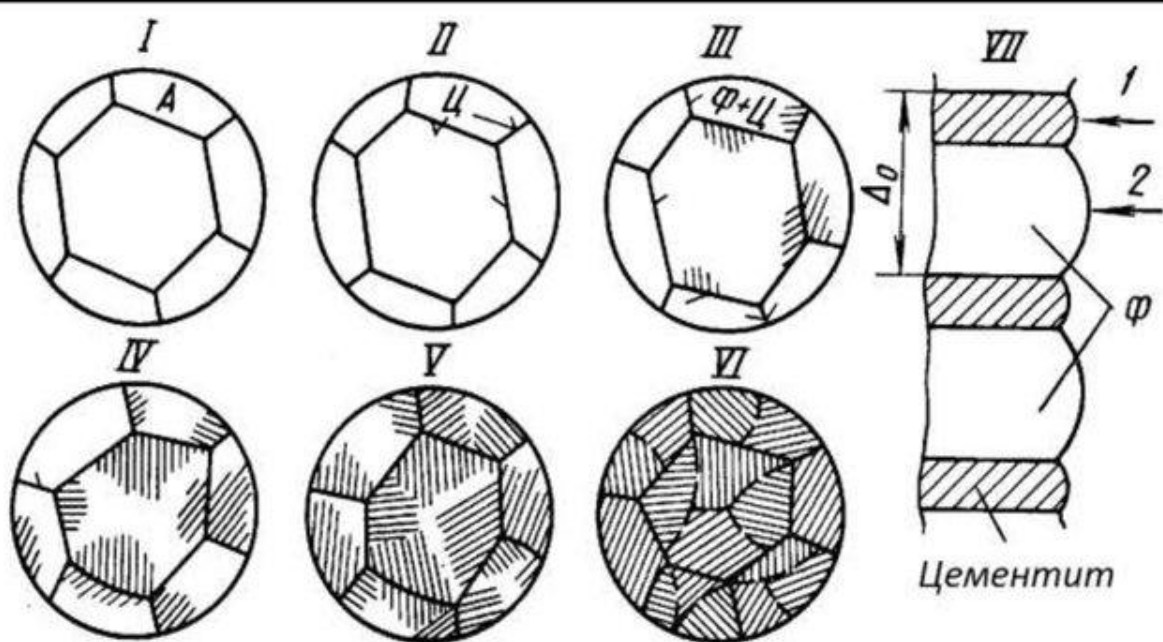
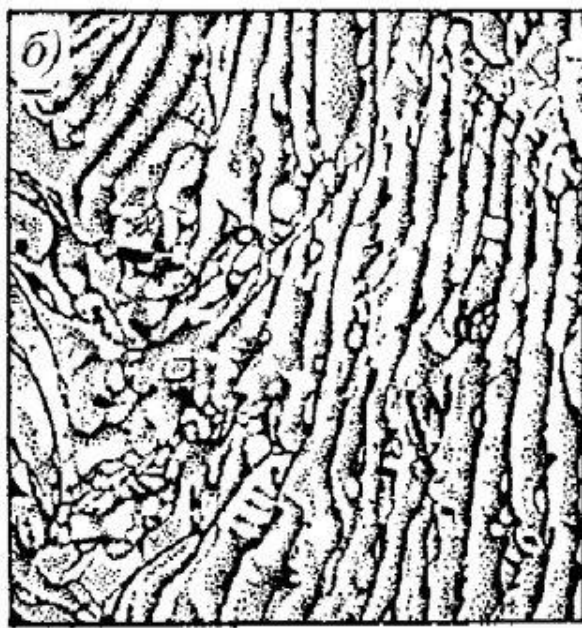


Схема образования  
 микроструктуры  
 пластинчатого  
 перлита



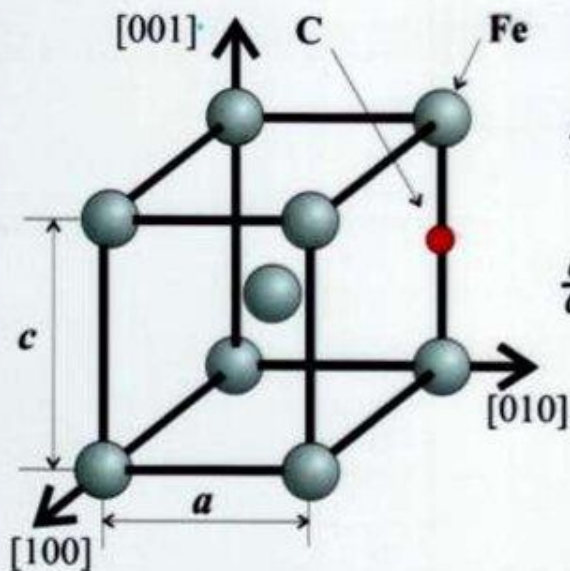
Структура перлита,

сорбита

и троостита

# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

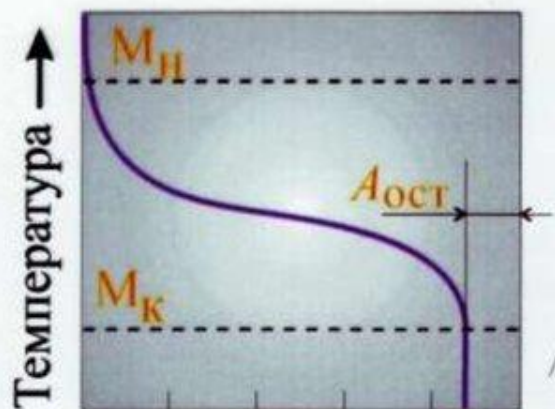
Мартенсит - пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$  - железе



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

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

Кривая мартенситного  
превращения



$M_H$  и  $M_K$  - температуры  
начала и конца мартенсит-  
ного превращения

$A_{ост}$  - остаточный аустенит

Количество мартенсита, %

Структура мартенсита



Пакетный (реечный) мартенсит



Пластинчатый (двойникованный)  
мартенсит

# ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

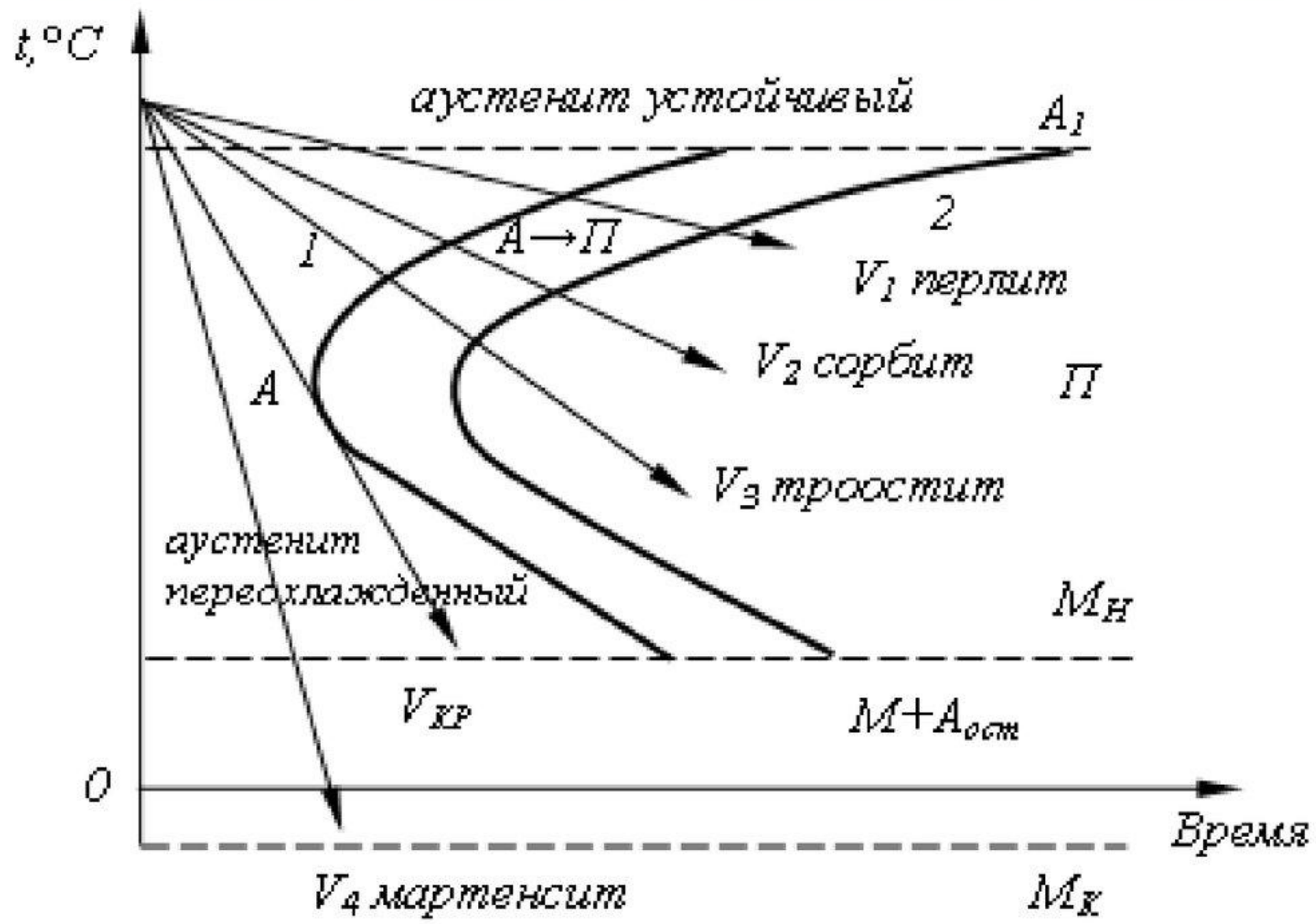
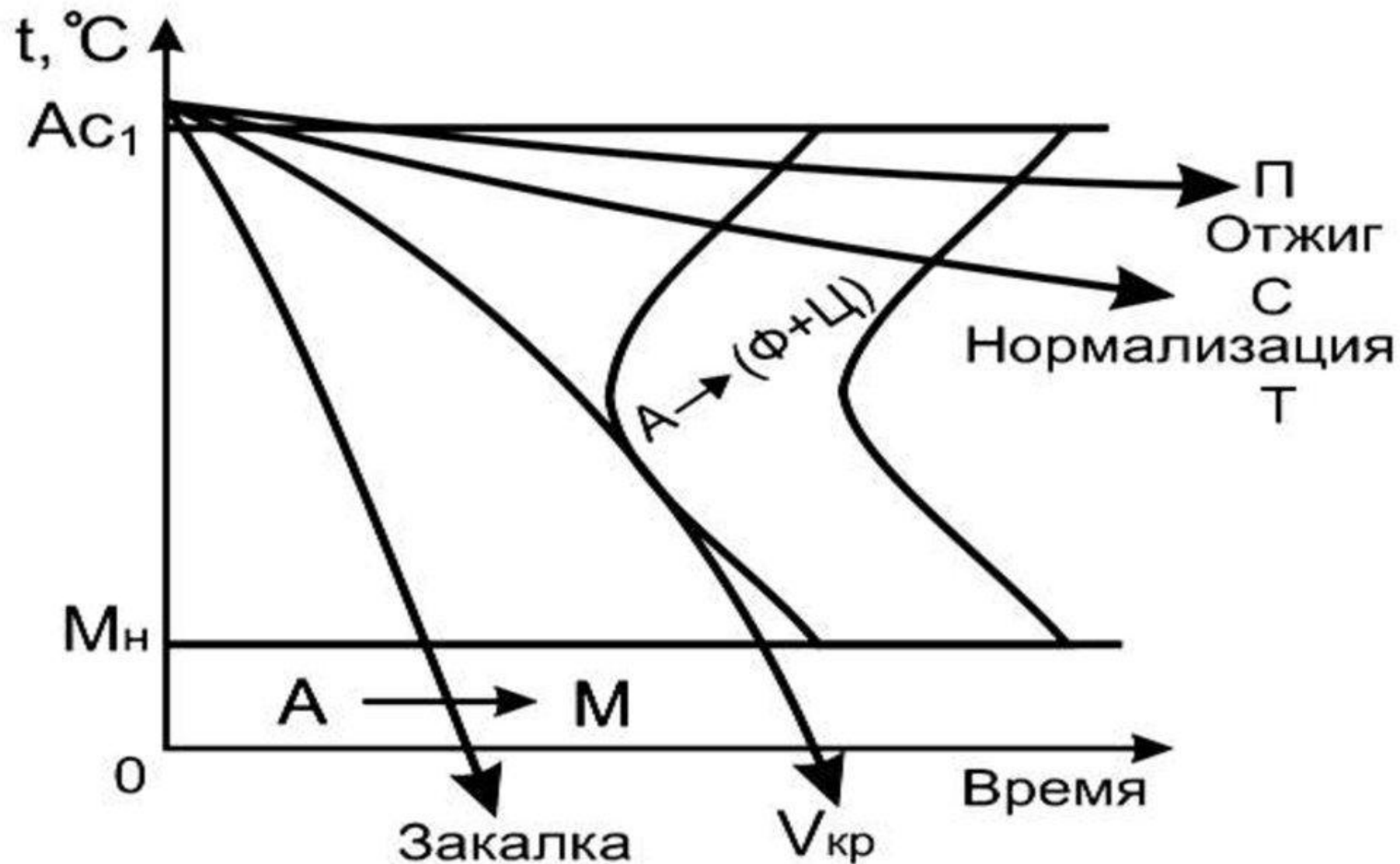
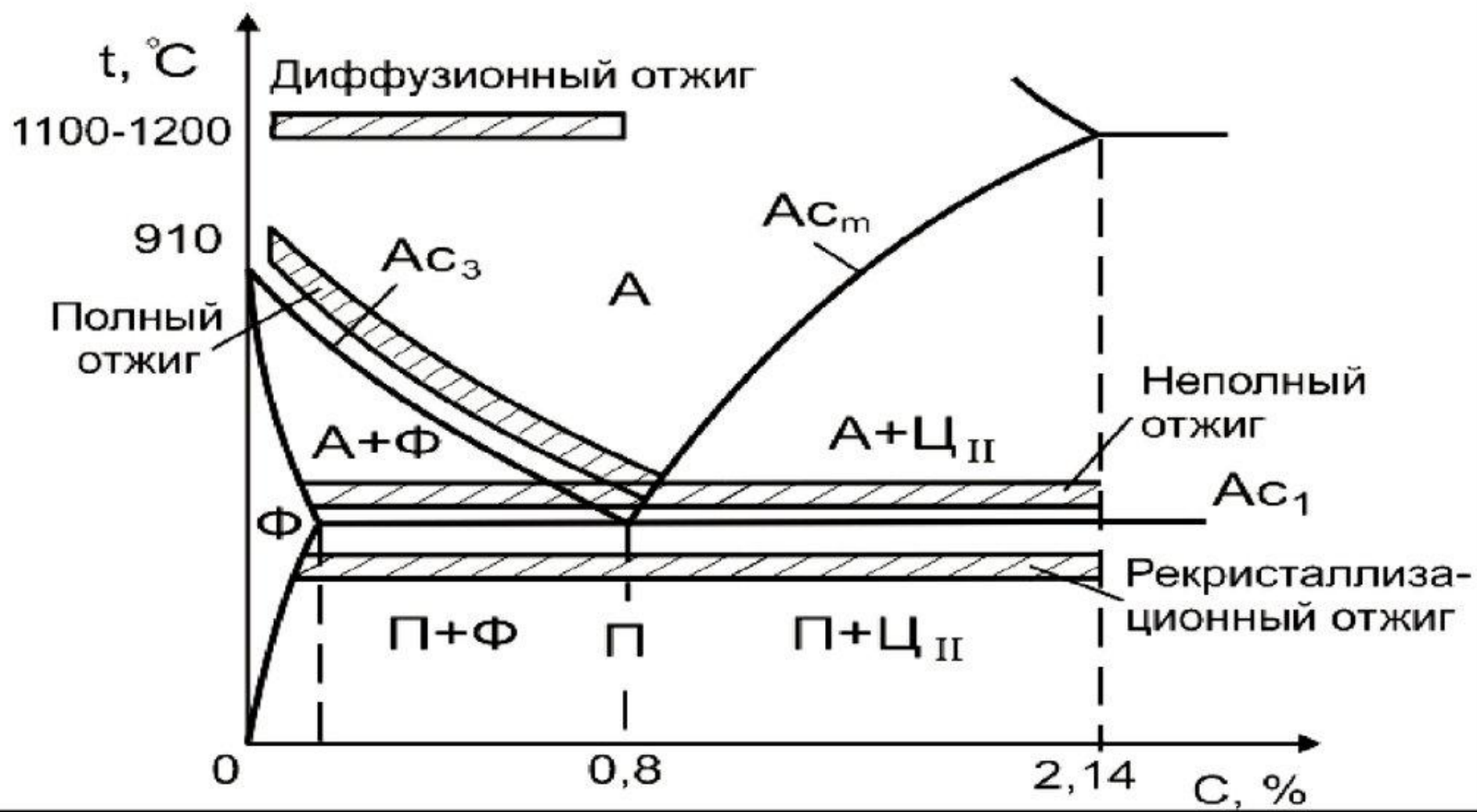


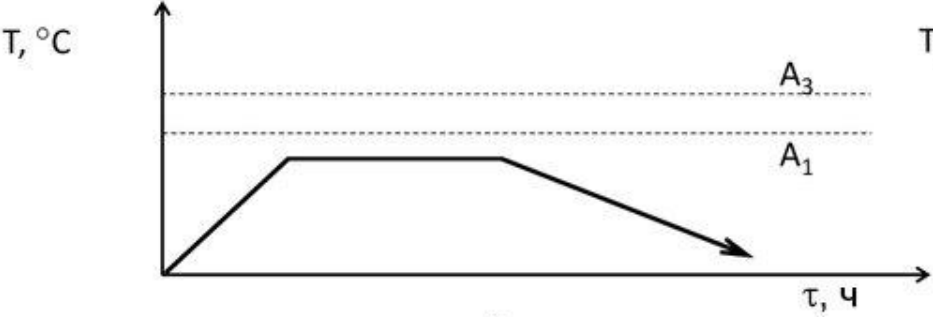
Диаграмма изотермического распада аустенита для эвтектоидной стали с нанесенными на нее скоростями охлаждения при различных видах термообработки



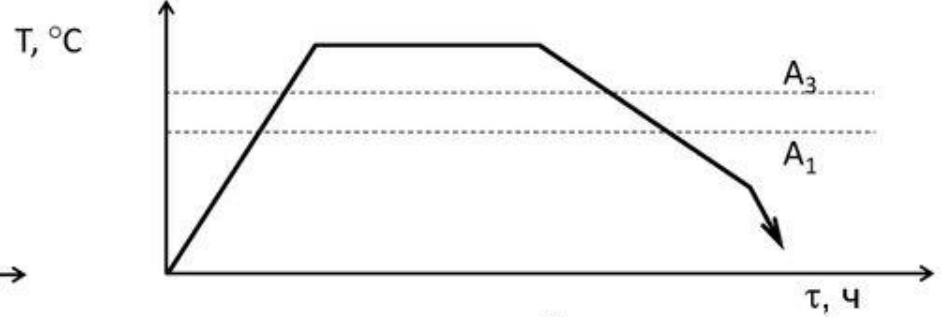
# ОТЖИГ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

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

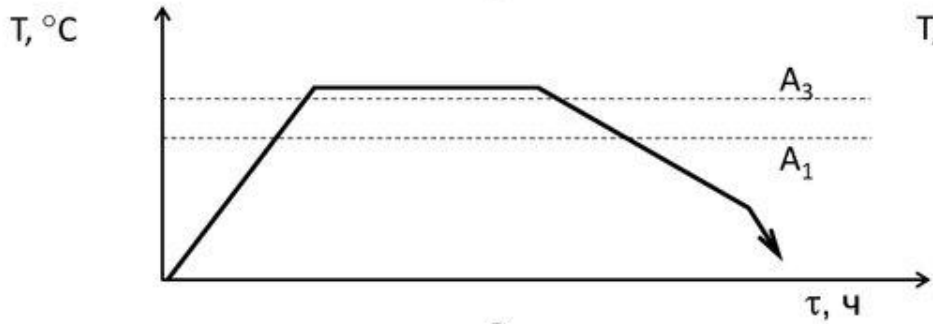




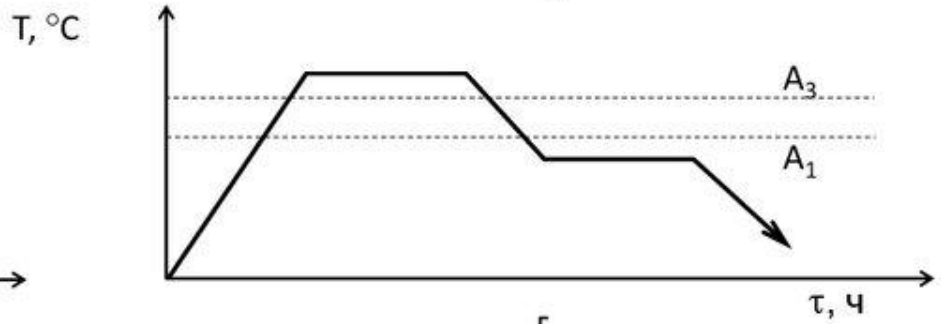
a



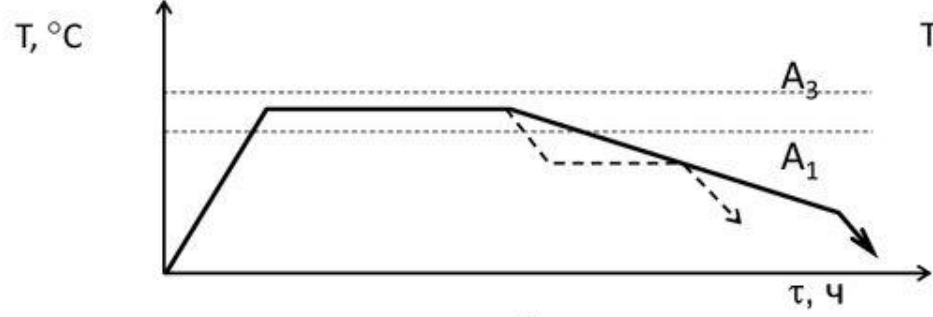
б



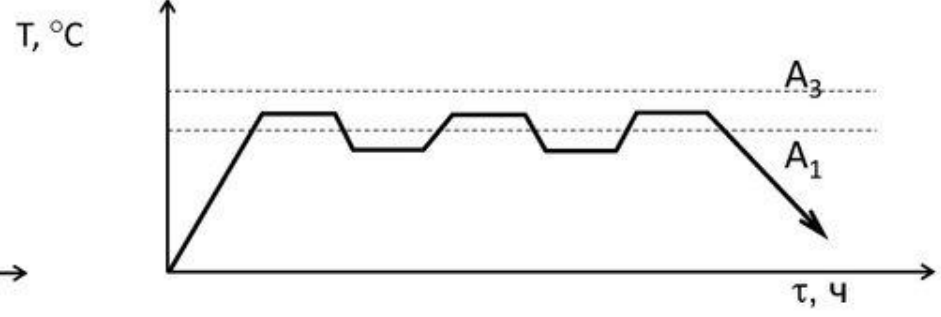
в



г



д



е

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

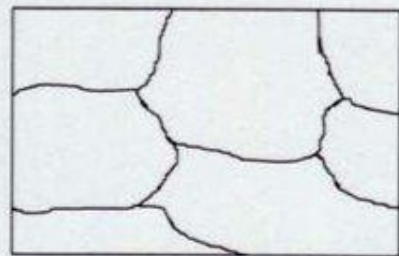
- б – диффузионный;
- г – изотермический;

- в – полный;
- д – неполный;

- е – циклический



# Изменение микроструктуры при пластической деформации

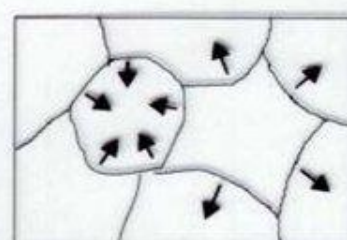
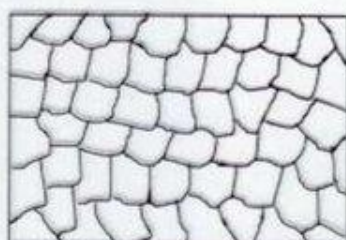
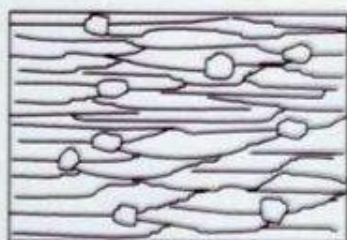
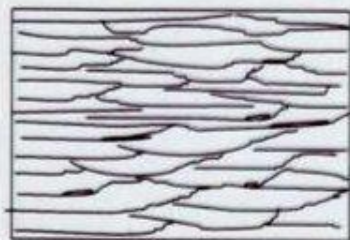


Исходная структура

Увеличение степени деформации

Изменение микроструктуры деформированного металла при нагреве

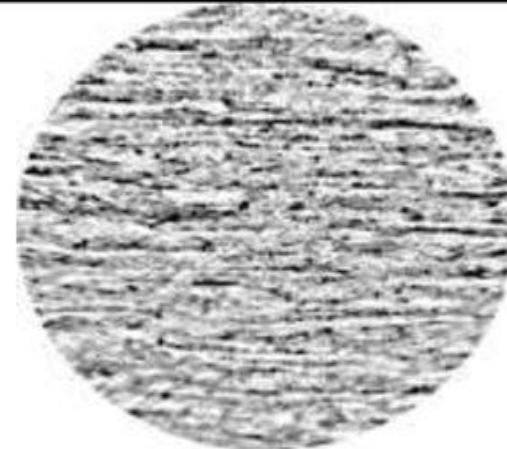
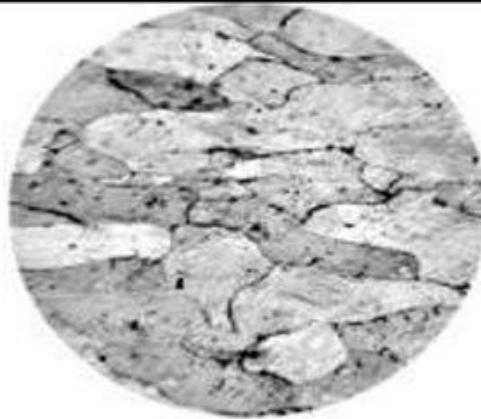
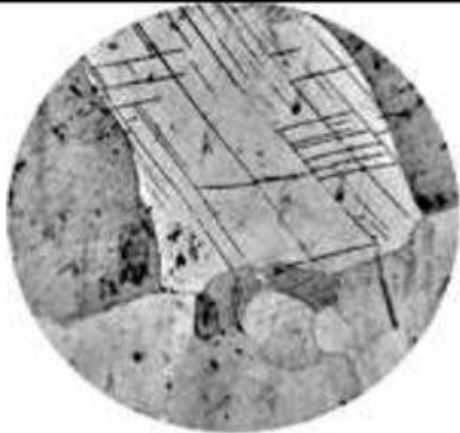
Температура нагрева



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

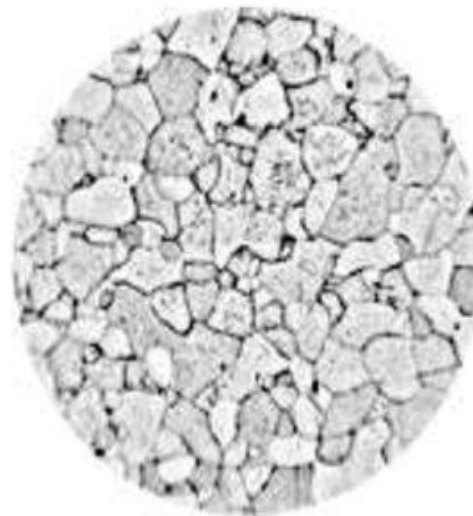
Описание: Следы деформации - полосы (линии) сдвига в отдельных зернах, в которых плоскости легчайшего сдвига ближе к направлению максимальных касательных напряжений.

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

обжатие 80%  
**Твердость (НВ, ГПа): 2,1**

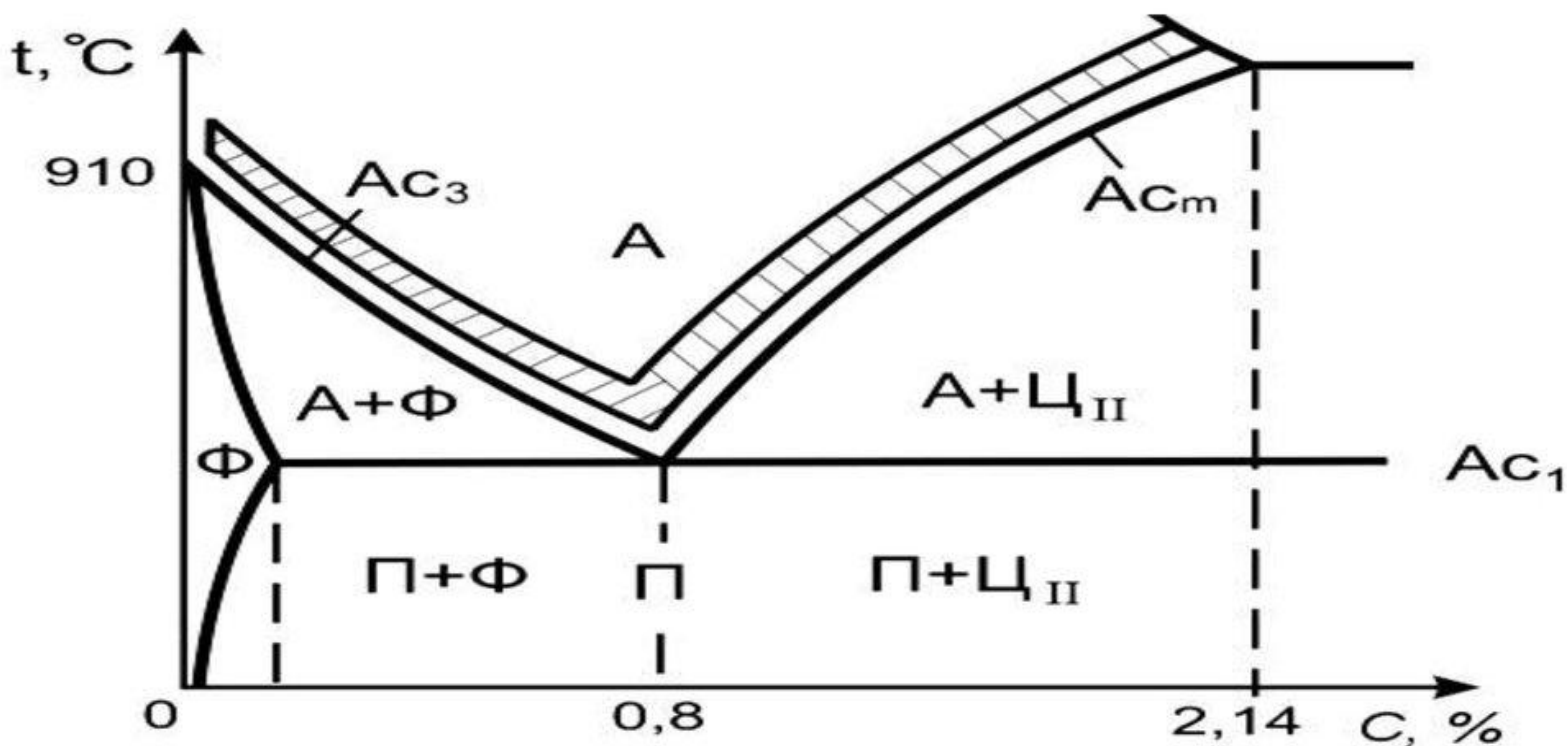


обжатие 80%,  
Отжиг при 600°C  
**Твердость (НВ, ГПа): 1.06**



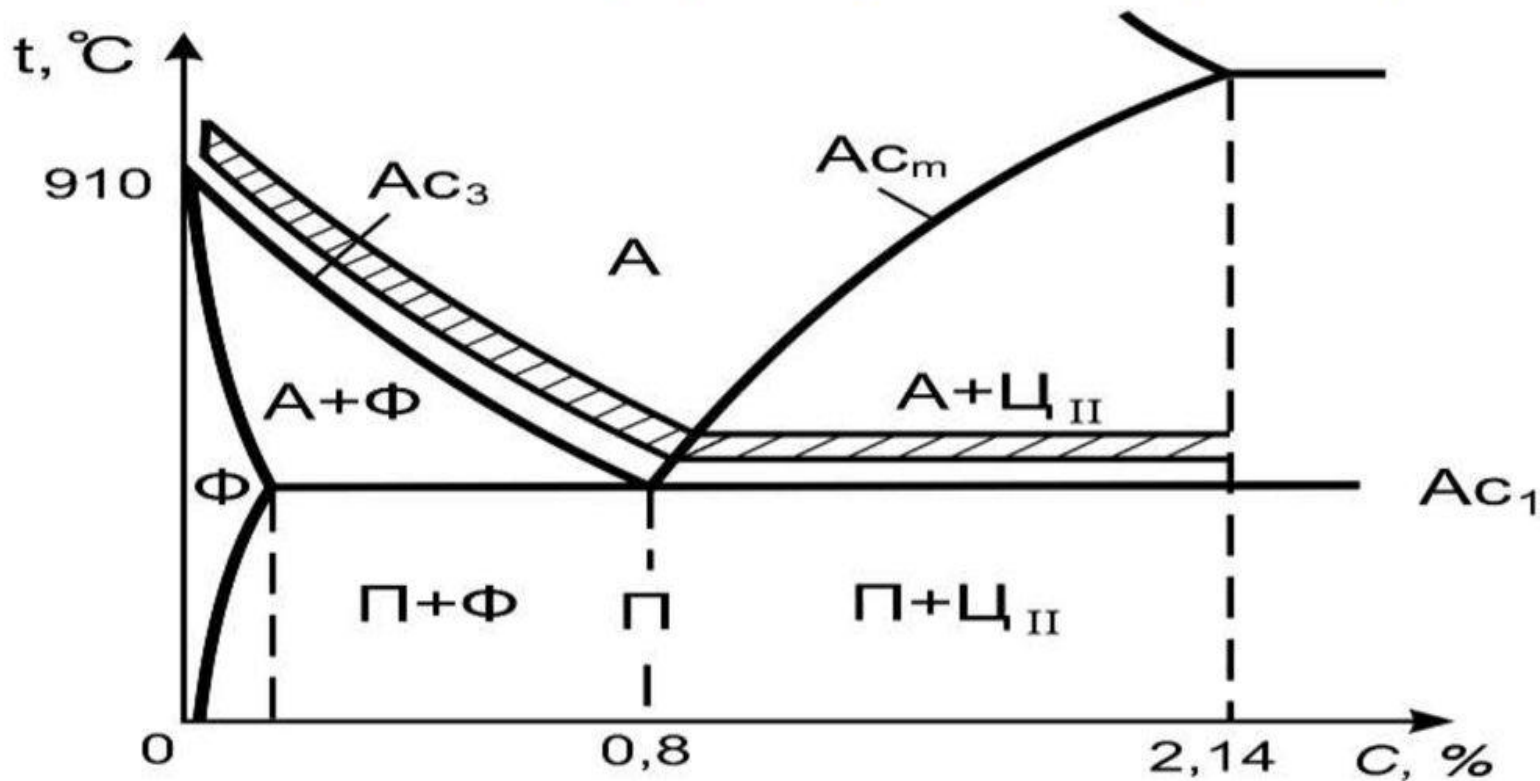
обжатие 80%,  
Отжиг при 700°C  
**Твердость (НВ, ГПа): 1.04**

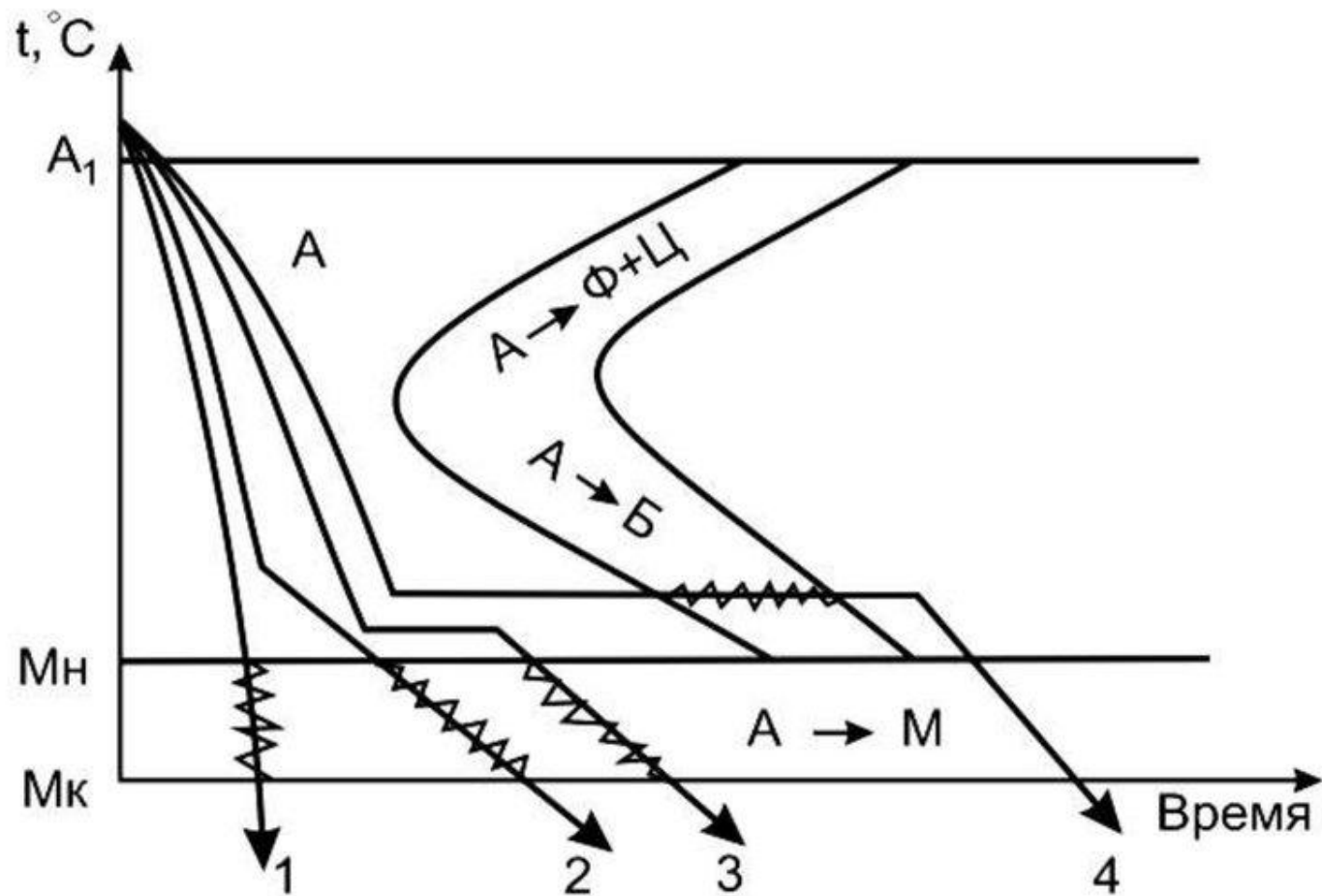
**НОРМАЛИЗАЦИЯ** (нормализационный отжиг) – операция ТО, связанная с нагревом стали до аустенитного состояния, выдержки при температуре нагрева и последующего **ускоренного охлаждения на воздухе** (получаются следующие структуры:  
**сорбит+феррит в доэвтектоидных сталях (С+Ф);**  
**сорбит в эвтектоидных 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  $30 - 50^\circ\text{C}$  выше  $A_{c3}$  (**полная**), заэвтектоидных на  $30 - 50^\circ\text{C}$  выше  $A_{c1}$ ) (**неполная**) выдержке и последующем охлаждении со скоростью выше **критической** с целью получения мартенситной структуры, обеспечивающей максимальную твердость, прочность и износоустойчивость (не является окончательной операцией термической обработки)

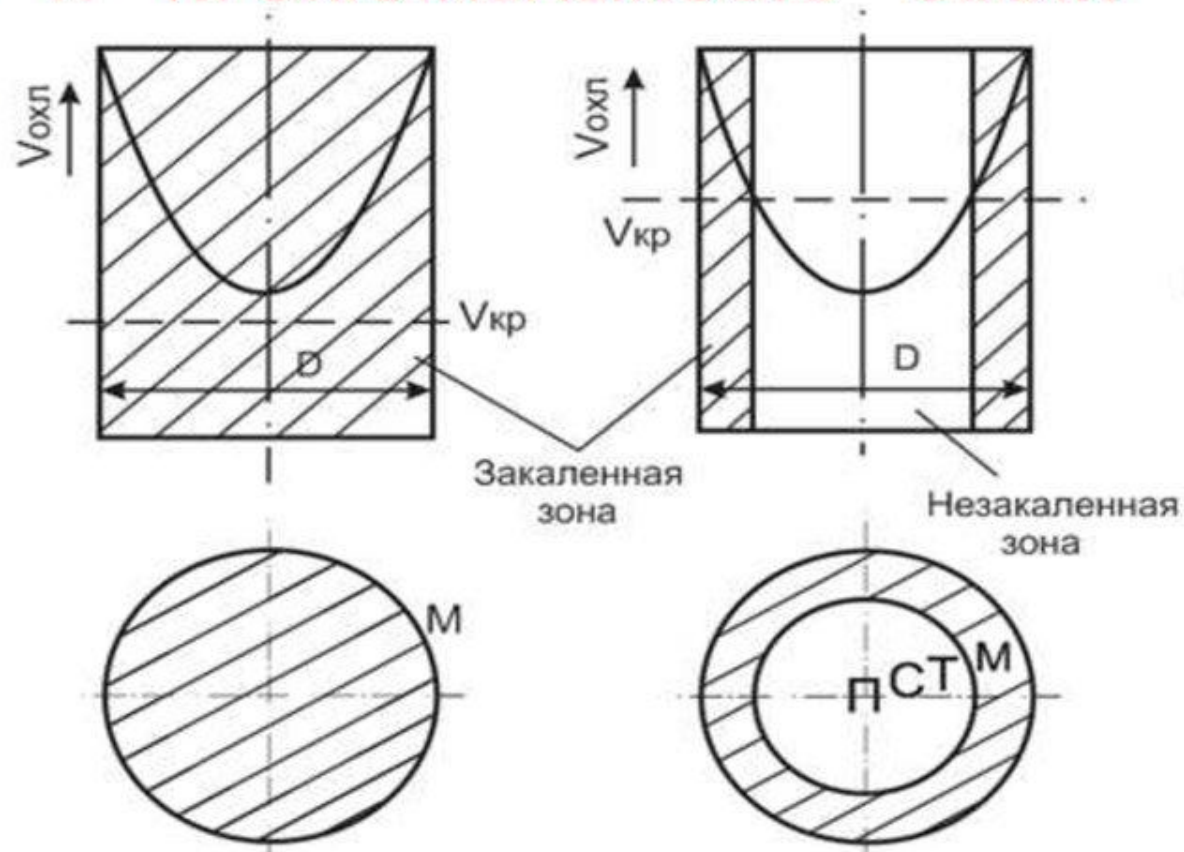
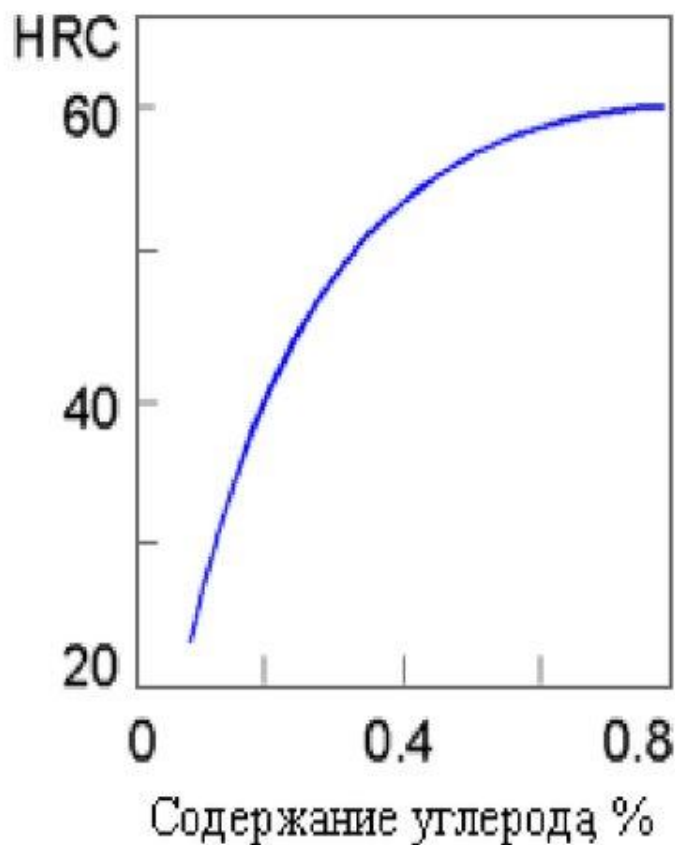




## Способы охлаждения при закалке сталей:

- 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.

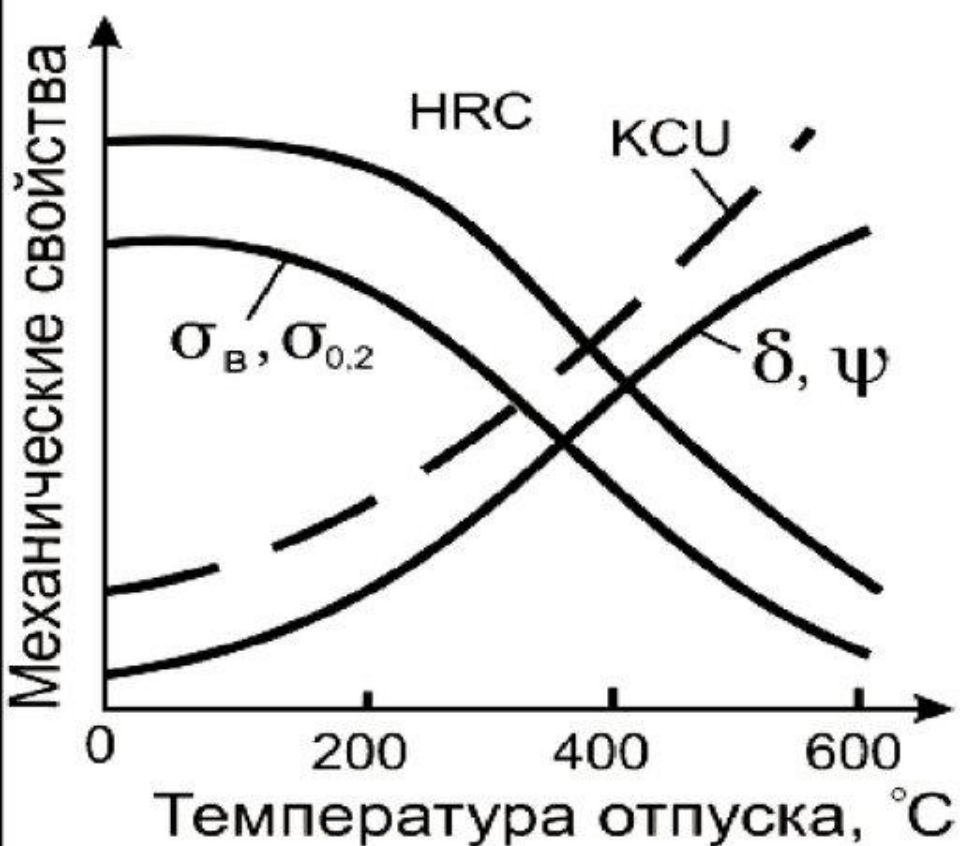
**ОТПУСК** - операция ТО, связанная с нагревом закаленной стали до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдержке и последующем охлаждении с определенной скоростью. Он является окончательной операцией термической обработки, т.к. обеспечивает требуемые механические свойства стали и полностью или частично устраняет 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).

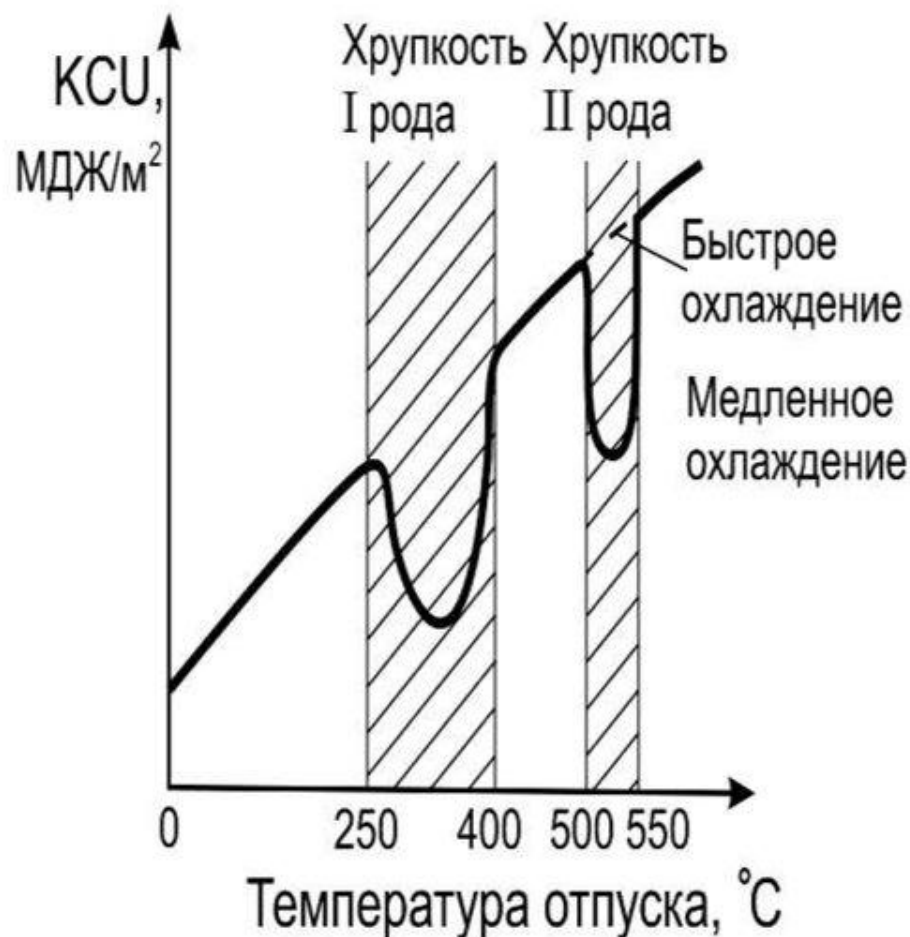
2) **Средний отпуск.** Нагрев – 350 – 500°C), выдержка – 1 – 8 ч. мартенсит закалки переходит в троостит отпуска – 40 – 45 HRC. Обеспечивается наилучшее сочетание предела упругости с пределом выносливости.

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% C



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°C. 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°C, но снижает твердость.

***Отпускная хрупкость II рода, или обратимая отпускная хрупкость, возникает в температурном интервале 500 - 550°C. 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  $T_H = A_{c3} + (30 - 50) ^\circ C = 820 + (30 - 50) = 850 - 870 ^\circ C$ . (температура критической точки  $A_{c3}$  определяется по линии GS диаграммы железо – цементит).

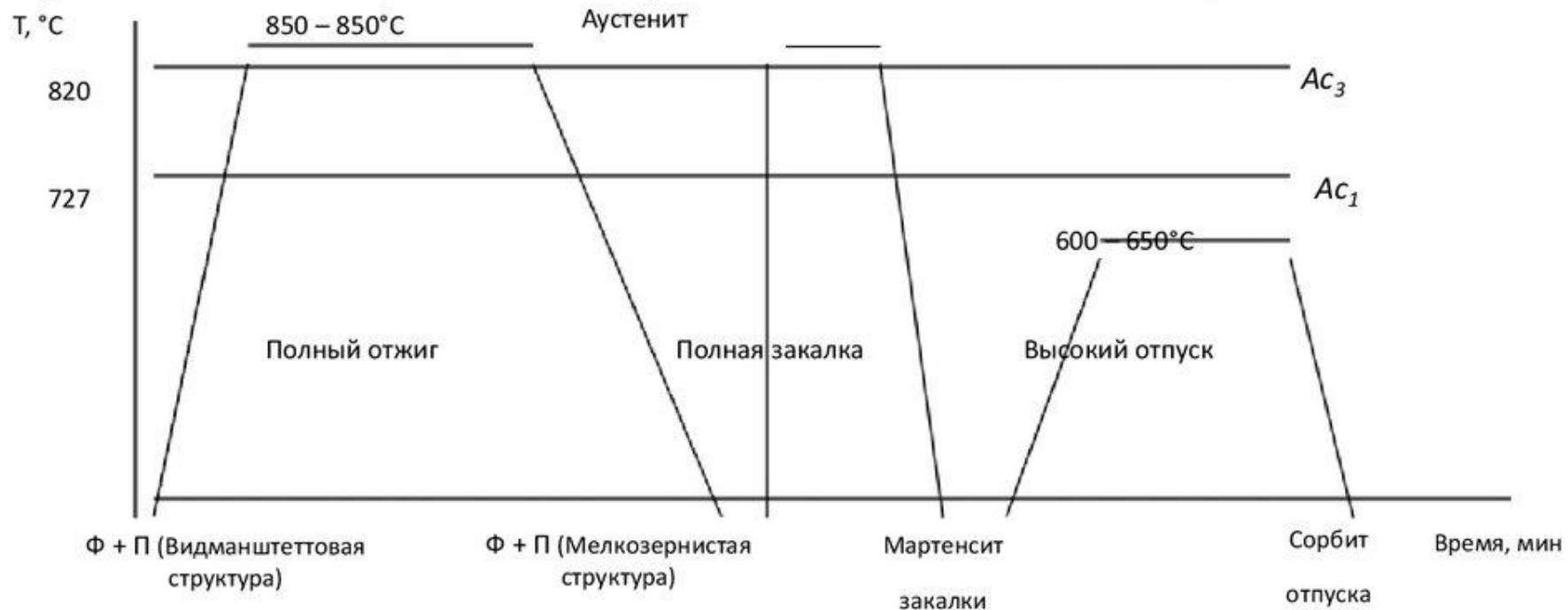
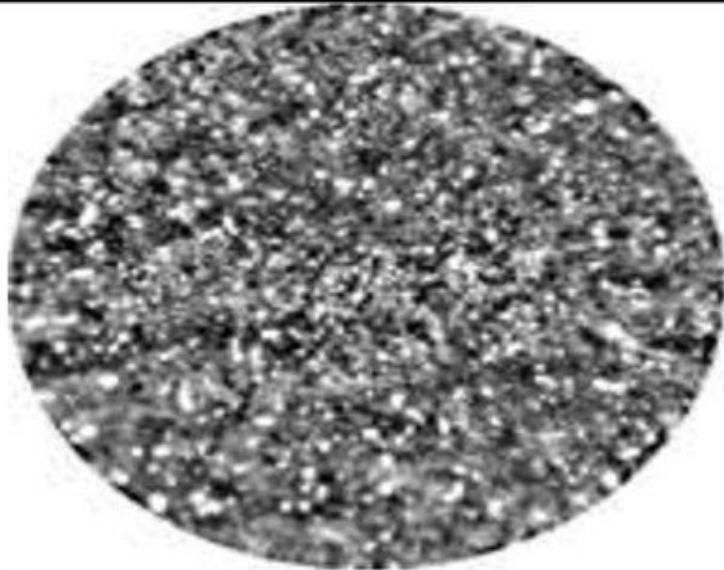


График термической обработки кронштейна из стали 25Л



**Марка:** сталь У12

**Травитель:** 3% р-р азотной кислоты в спирте

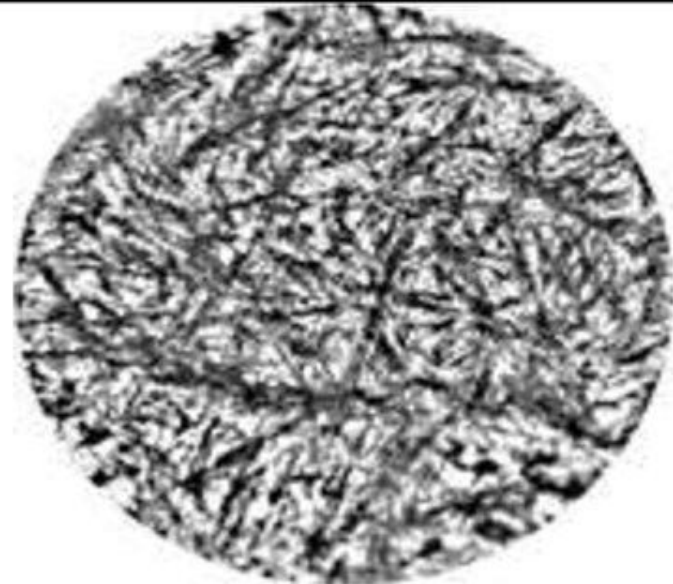
**Обработка:** закалка с 750°C в воду (не полная)

**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

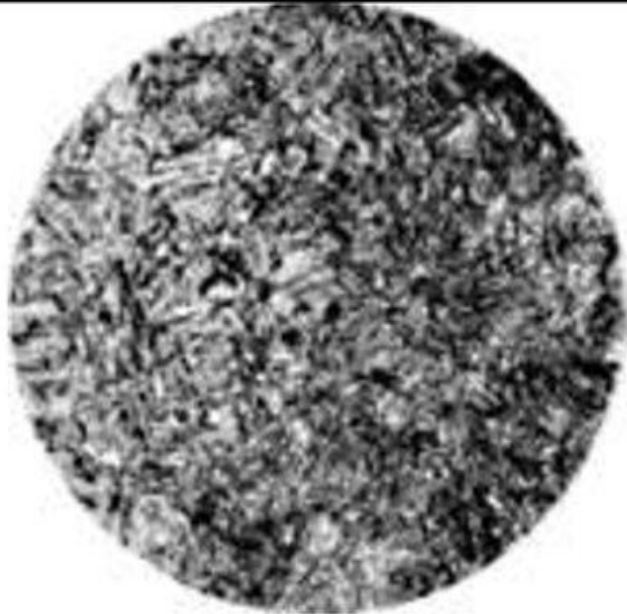
**Компоненты:** С (1.2 масс%)

**Структурные составляющие:** мартенсит, аустенит остаточный

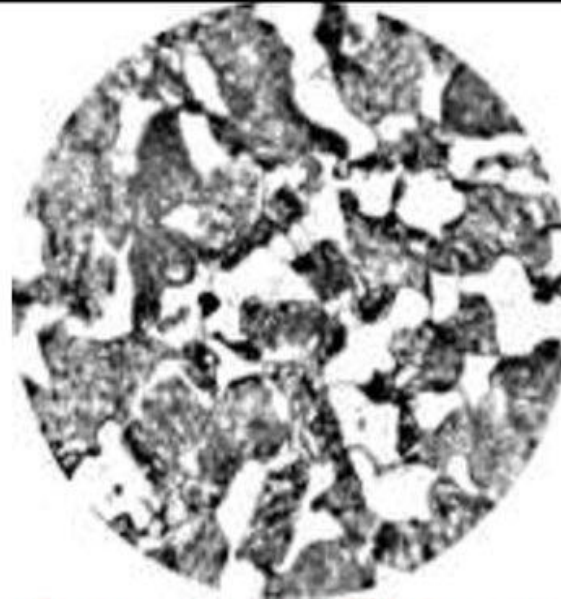
**Субструктура:** Однородная светлая (нет субструктуры)

**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
Тип сплава:	Стали термообработанные
Травитель:	3% р-р азотной кислоты в спирте
Обработка:	закалка 850°C (полная)
Твердость (НВ, ГПа):	5.66
Компоненты:	С (0.45 масс%)
Структурные составляющие:	мартенсит
Субструктура:	Игольчатая (подобная мартен)



**Обработка:** закалка с 750°C в воду  
(не полная)

**Твердость (НВ, ГПа):** 3.98

**Структурные составляющие:**  
мартенсит , феррит , аустенит остаточный

**Описание:**

**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.