

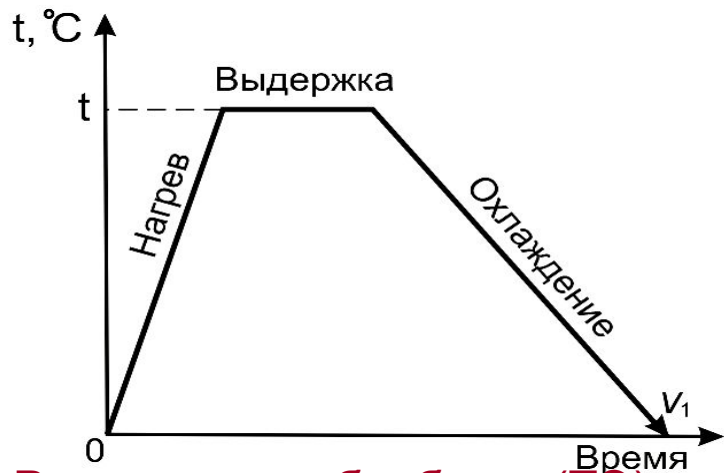
Термическая обработка стали

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, имеющих целью изменение структуры и свойств стали. Основные виды термической обработки – это отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение и химико-термическая обработка



Любая термическая обработка состоит из нагрева до определенной температуры,

выдержки и охлаждения



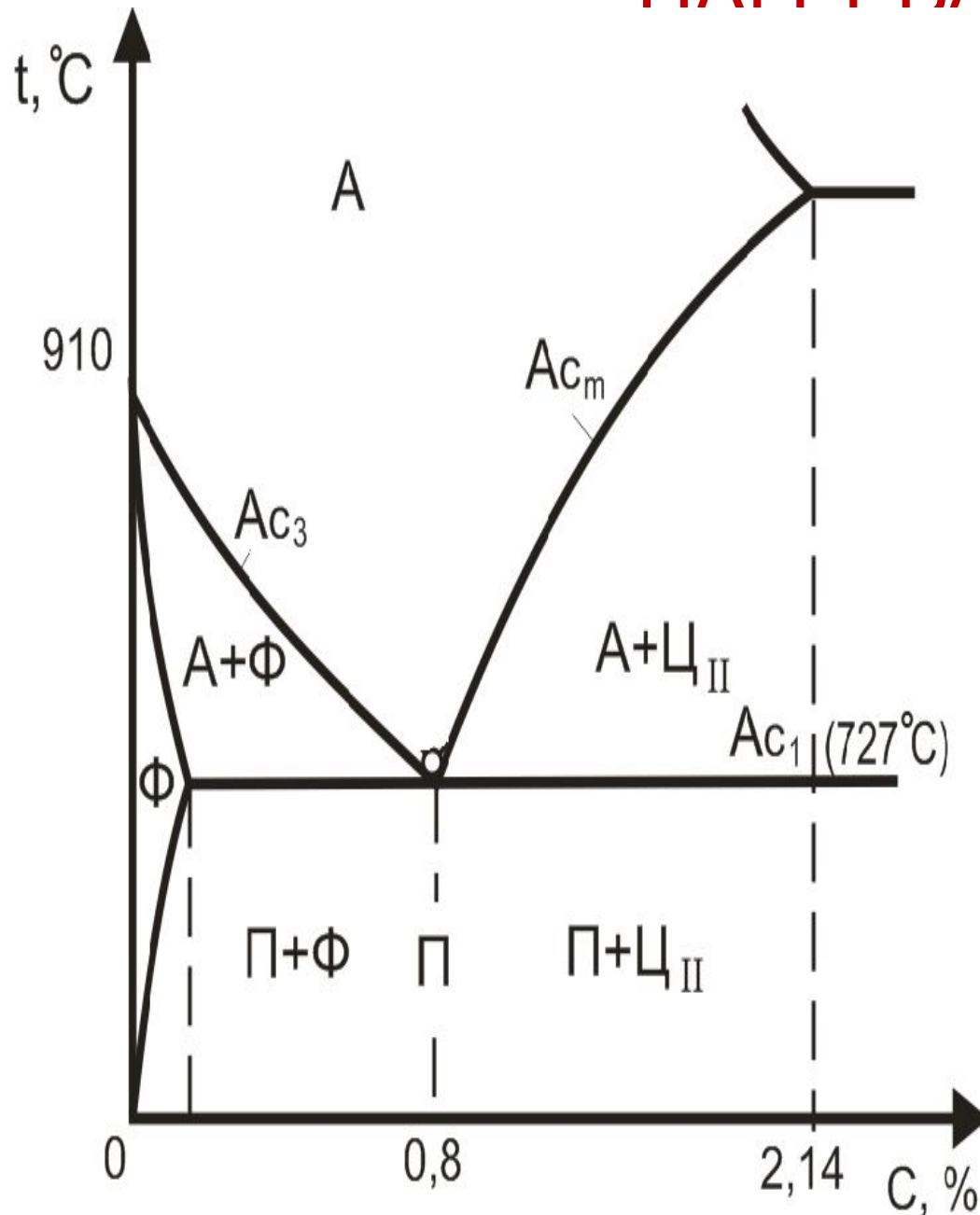
Режим термообработки (ТО) представляется графиком в координатах температура — время. Он характеризуется параметрами:

- 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

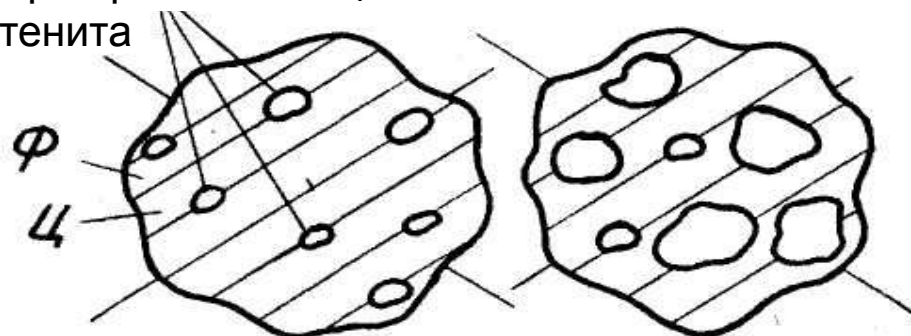


Ac_1 – критическая точка перлитного превращения. 727°C (линия PSK). При этой температуре происходит перекристаллизация перлита в аустенит ($P \rightarrow A$).

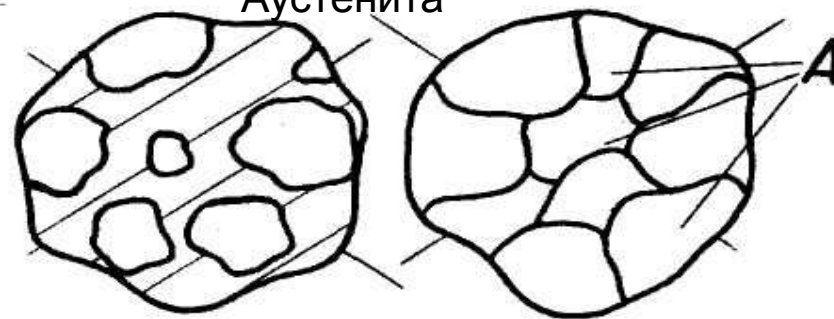
Ac_3 – критическая точка полной перекристаллизации в аустенит доэвтектоидной стали. $(F + A) \rightarrow A$. Температура ее определяется по линии GS в зависимости от содержания углерода в стали.

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

Центры кристаллизации
Аустенита

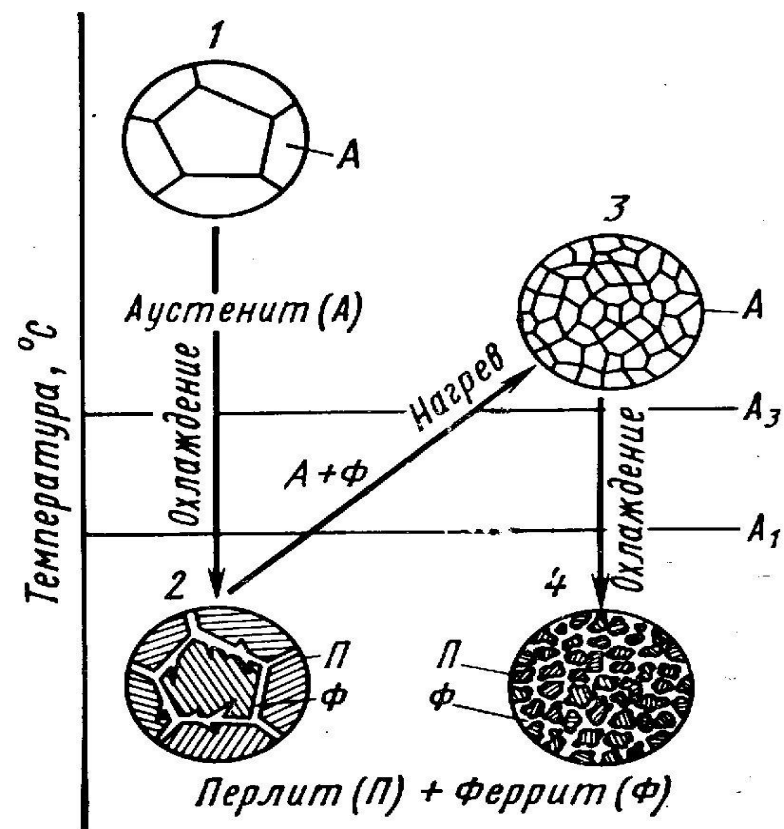


Размер начальных зерен
Аустенита



Размер исходного зерна Аустенита
(перлита)

Схема перекристаллизации перлита в аустенит

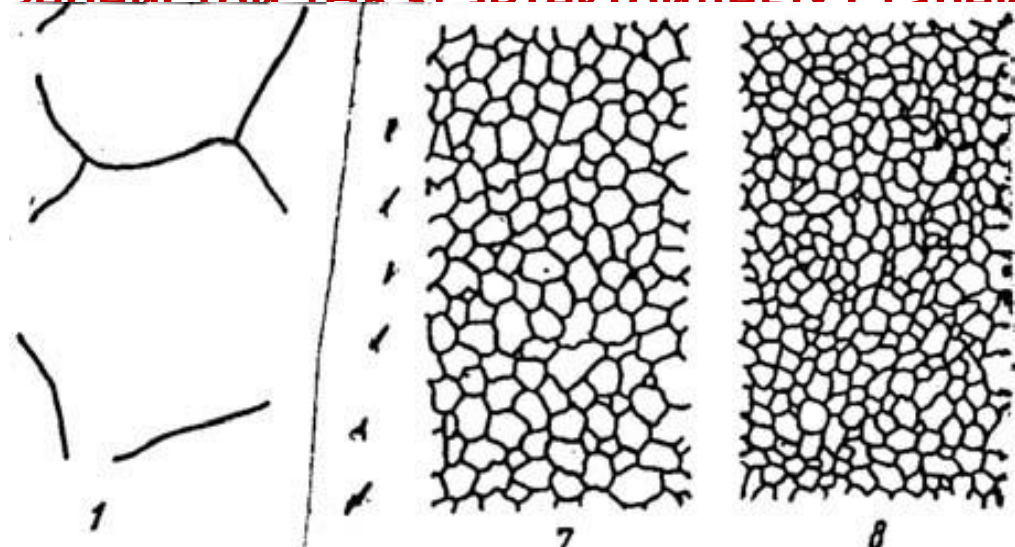
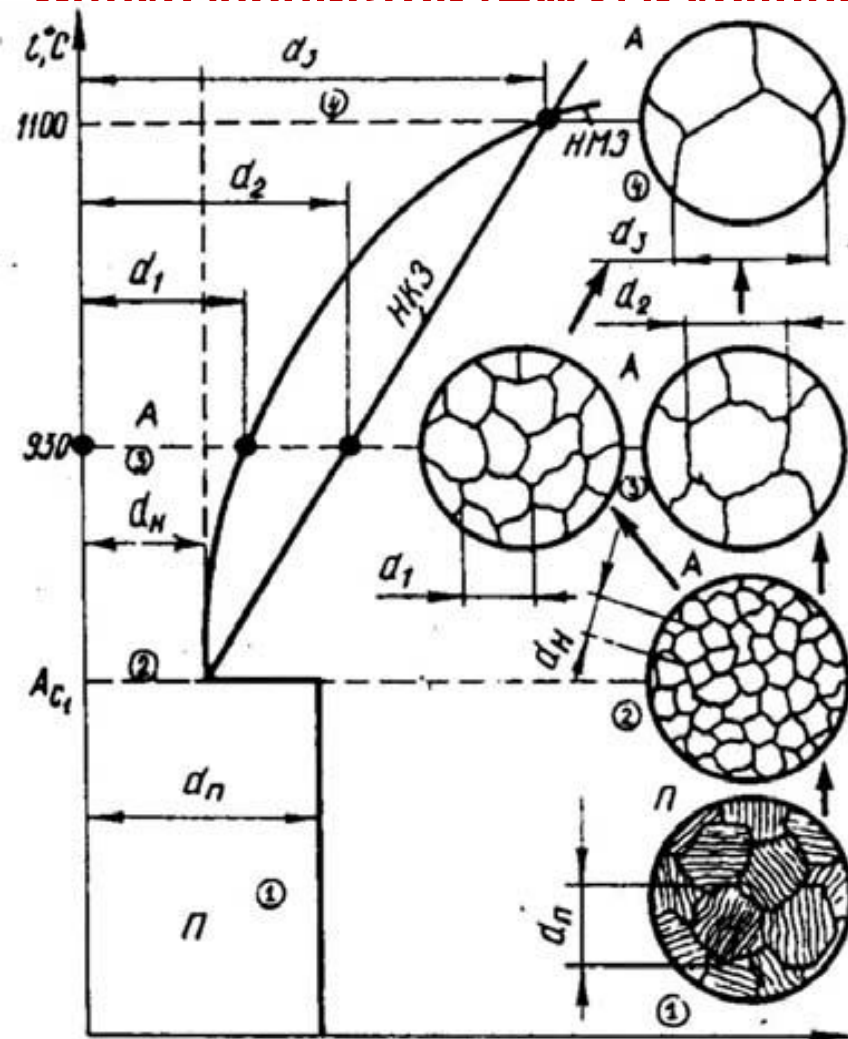


Изменение размера зерна при
фазовой перекристаллизации
доэвтектоидной стали.

При нагреве до высоких температур зерно крупное (1), после охлаждения размер его сохраняется (2). Повторный нагрев несколько выше $A_{с3}$ 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;

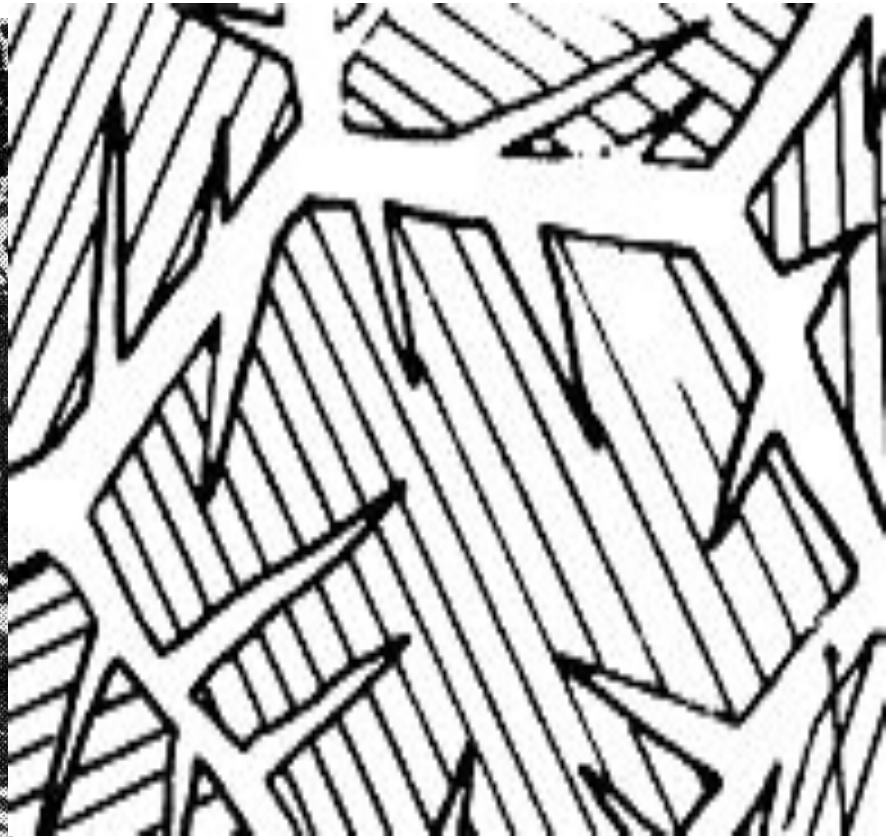
d_H – размер начальных зерен аустенита;

d_1, d_2, d_3 – размеры действительного зерна аустенита.

Фотография (а) и схема (б) микроструктуры Видманштетта



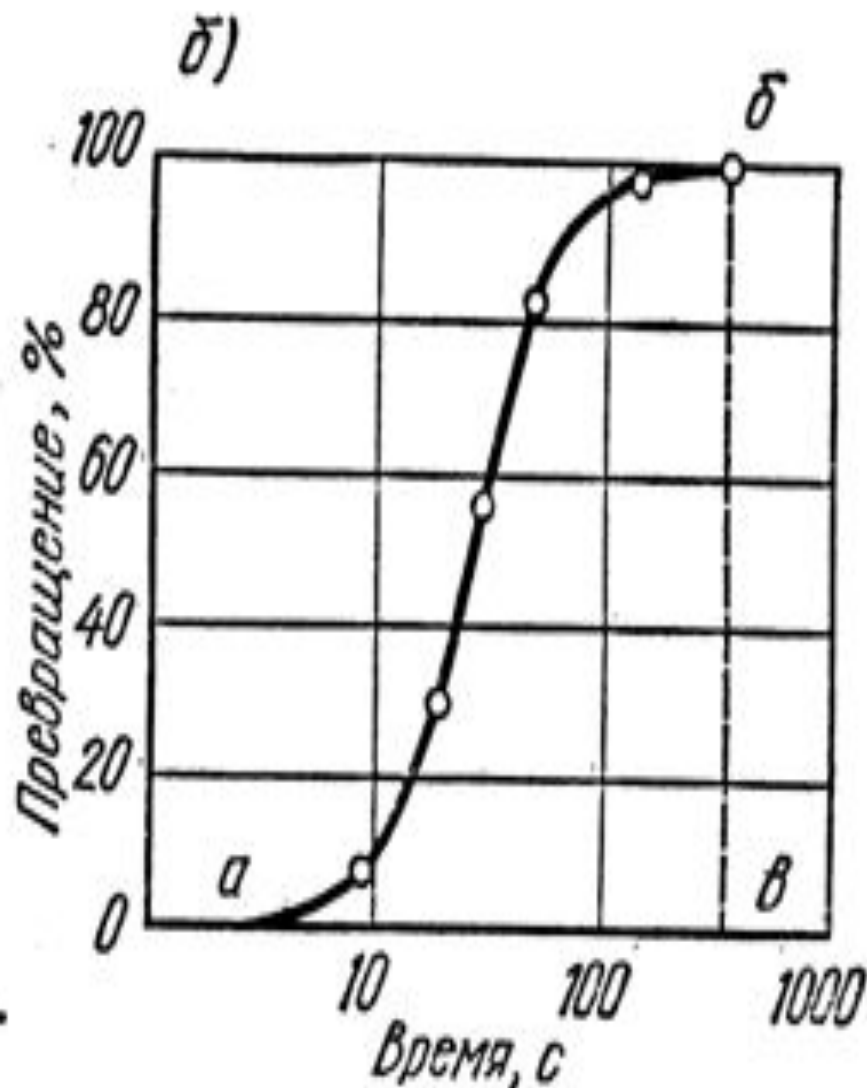
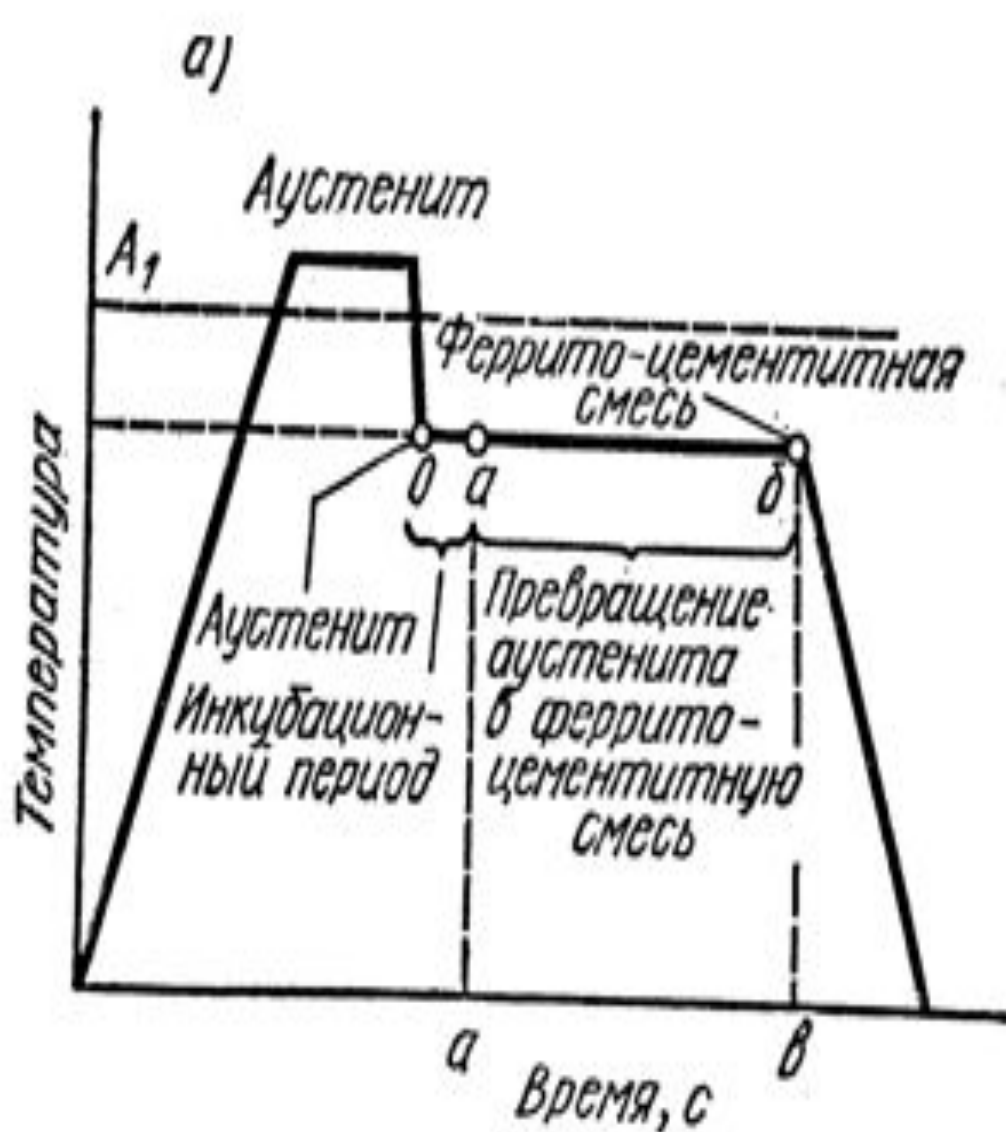
а)



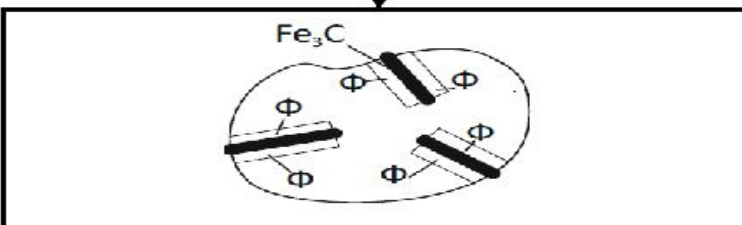
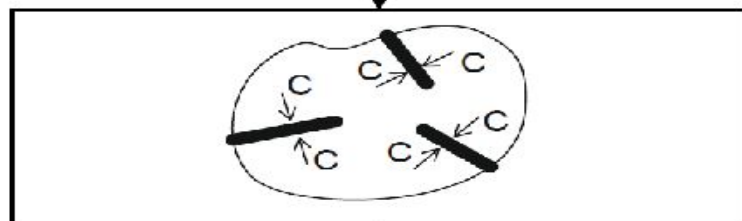
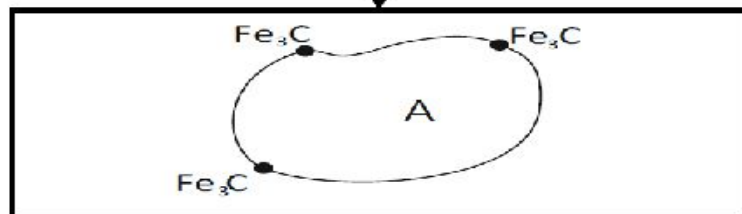
б)

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.

График (а) и термокинетическая кривая (б) изотермического превращения аустенита



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

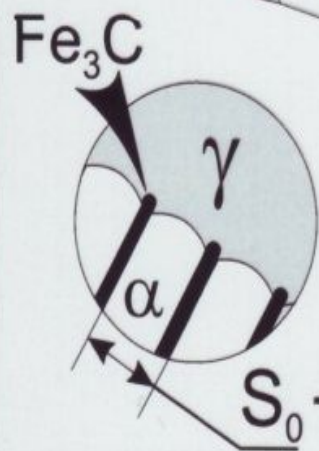
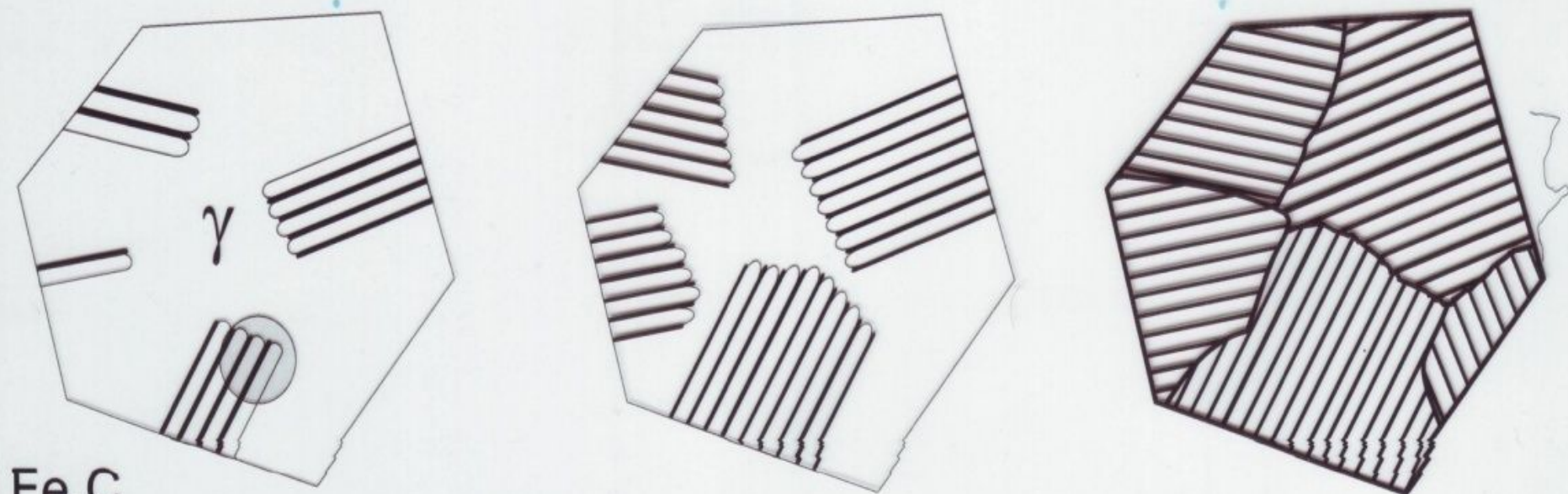
Полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение участков обедненного углеродом аустенита в феррит

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°С) $S_0=0,5-1,0$ мкм

- **сорбит** (650-600°С) $S_0=0,2-0,4$ мкм

- **троостит** (600-550°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_n ;*
- *мартенситное – бездиффузионное, происходит в температур-ном интервале $M_s - M_f$*

Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали

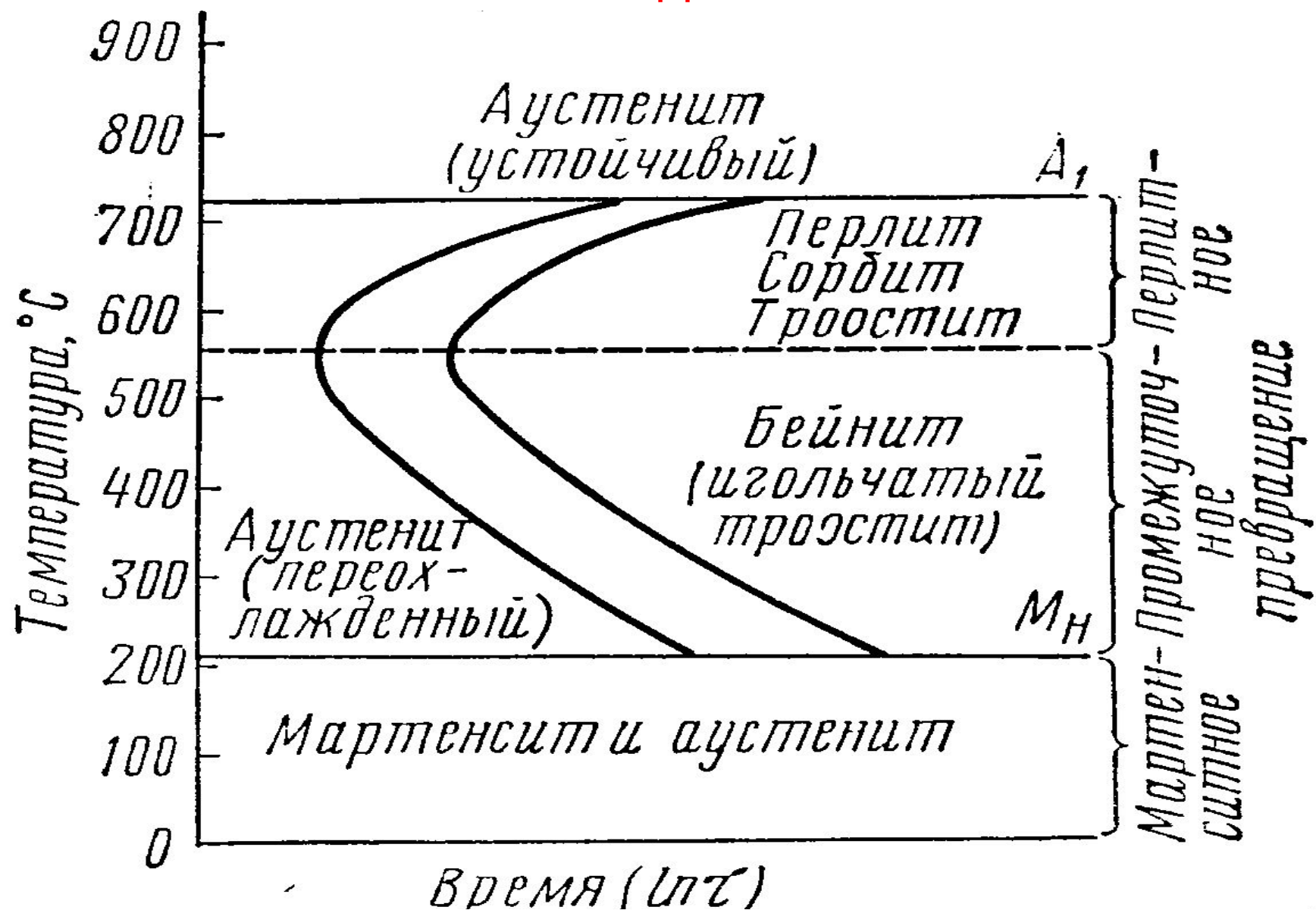
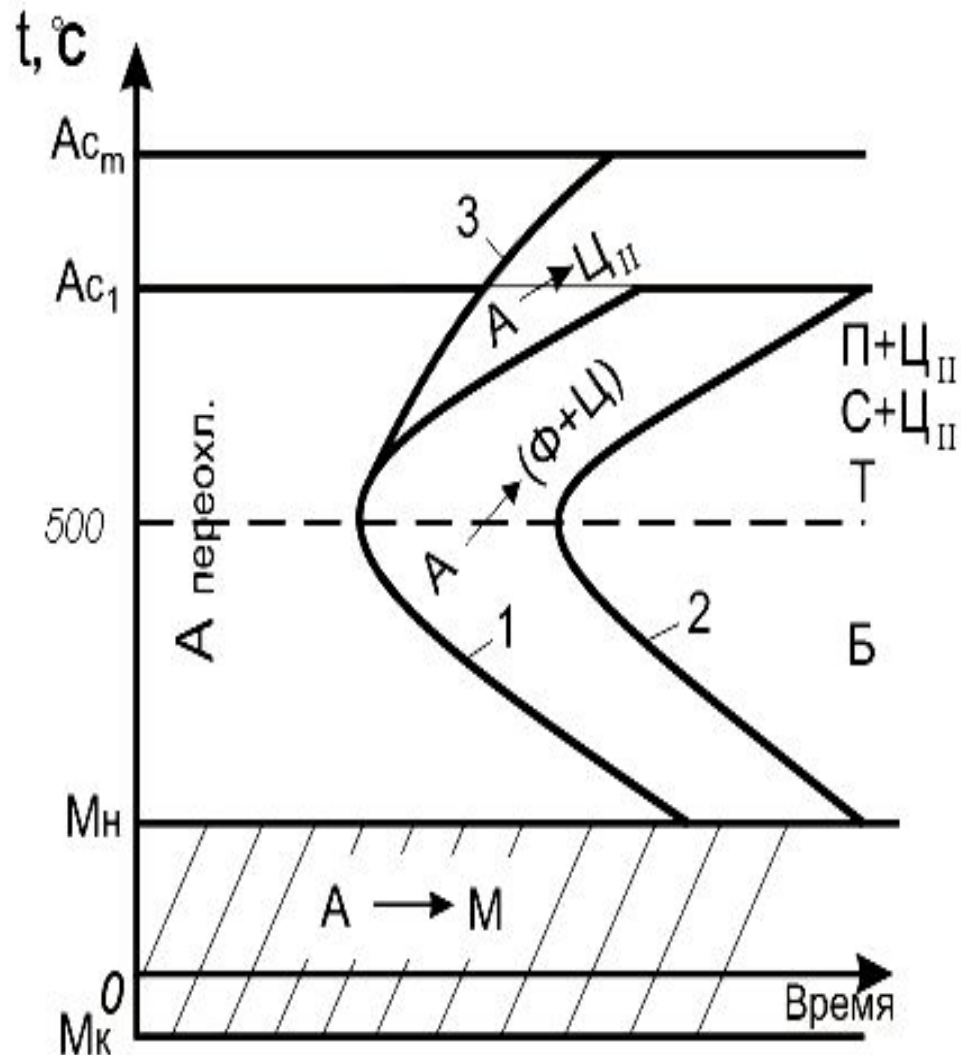
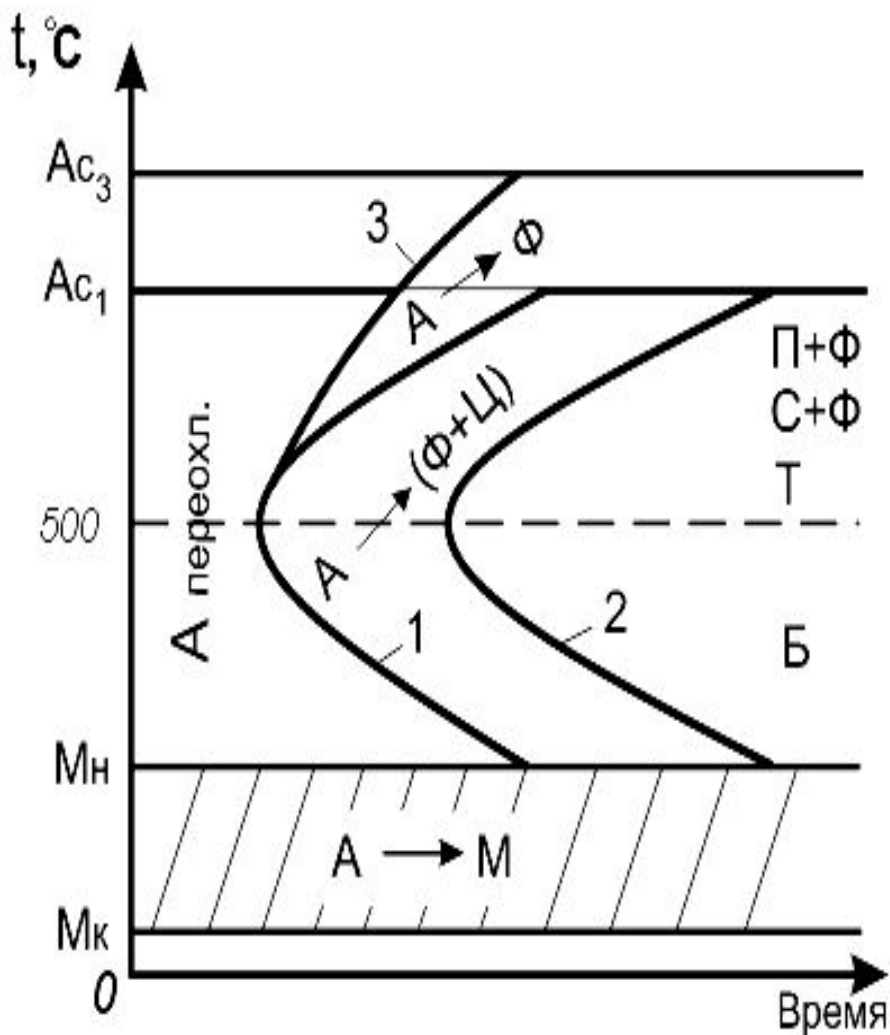


диаграмма изотермического превращения аустенита доэвтектоидной и заэвтектоидной сталей



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

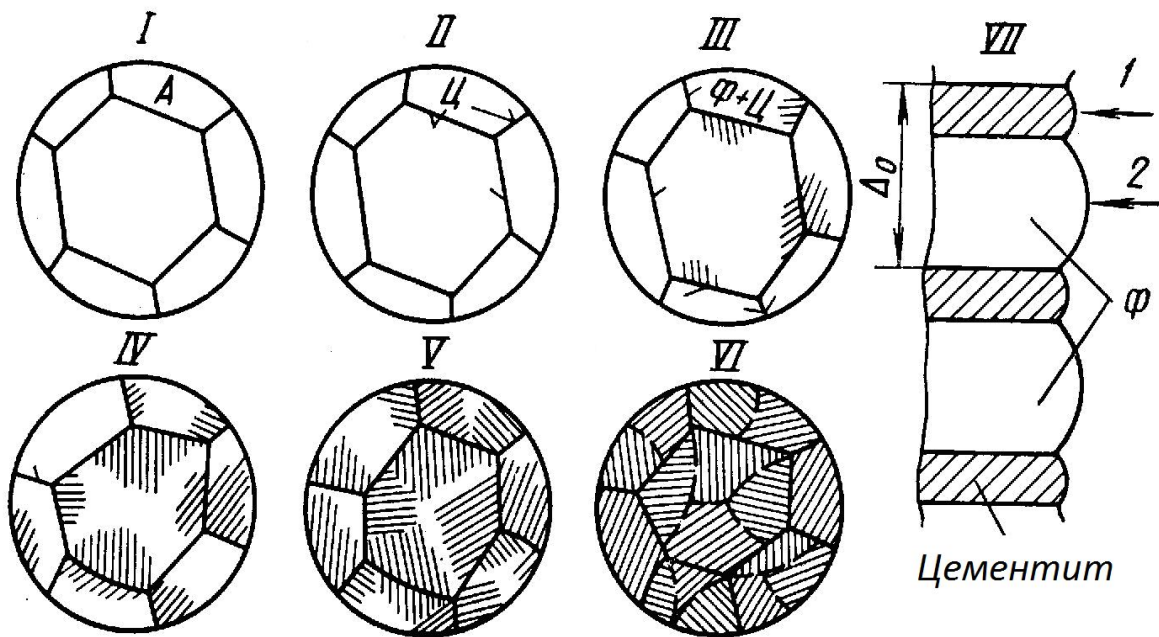
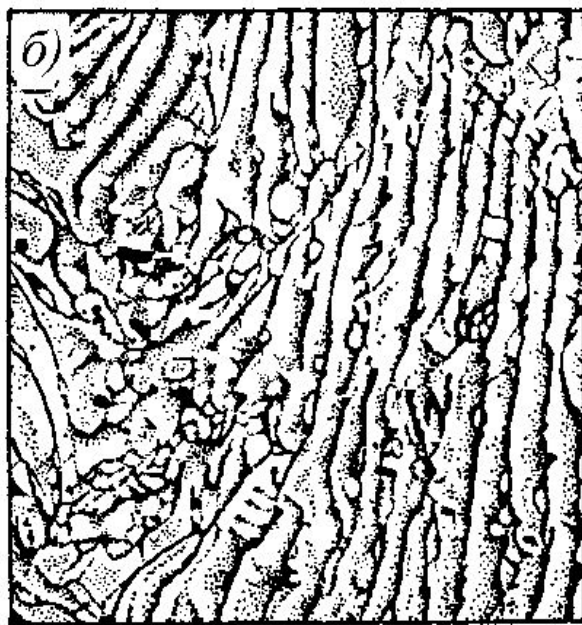
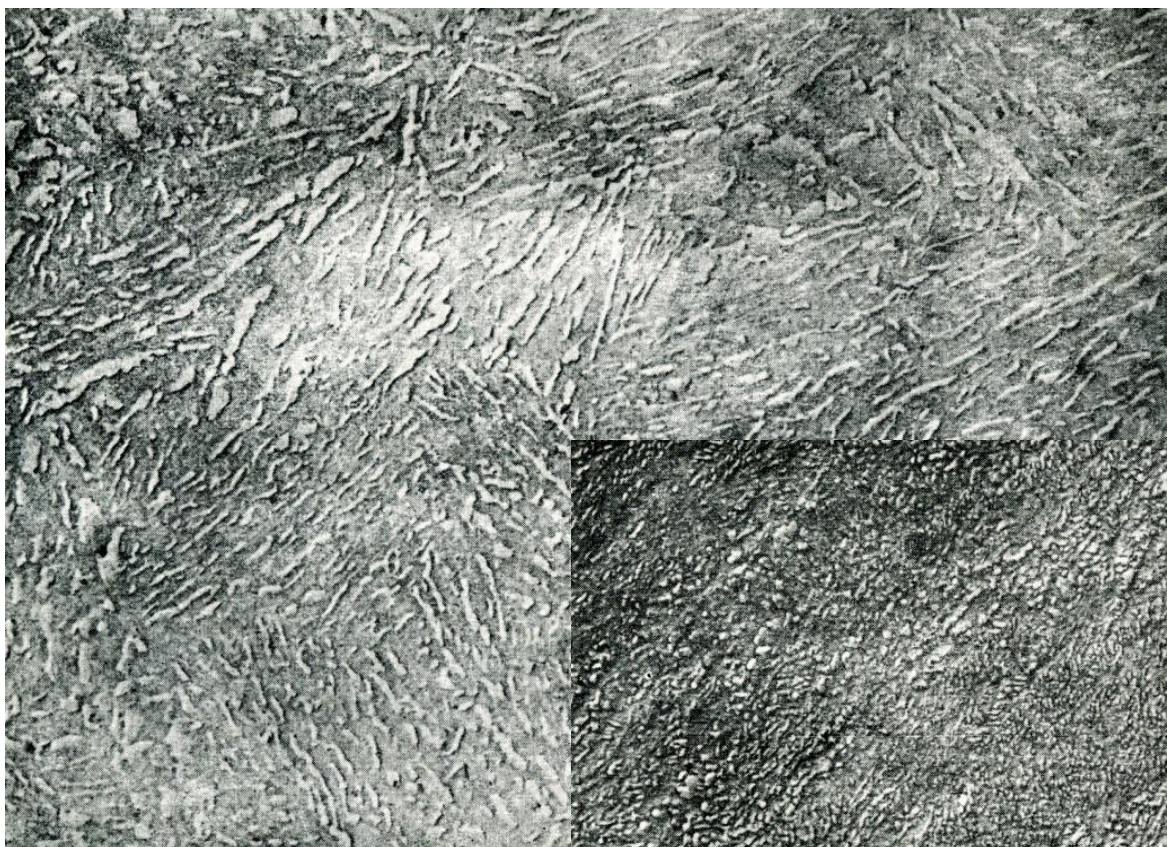


Схема образования
микроструктуры
пластинчатого
перлита



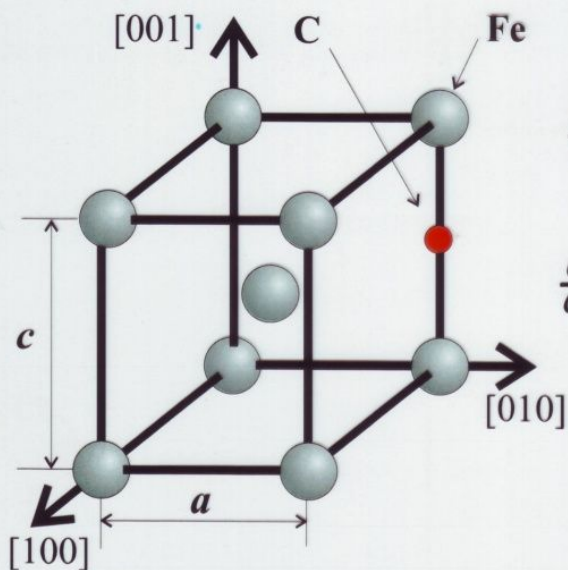
Структура перлита, сорбита и троостита



Электронные микроструктуры бейнита (x15000): а) верхнего, б) нижнего

МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

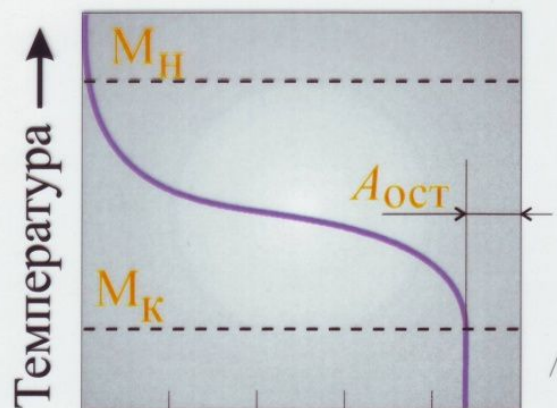
Мартенсит - пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α - железе



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

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

Кривая мартенситного
превращения

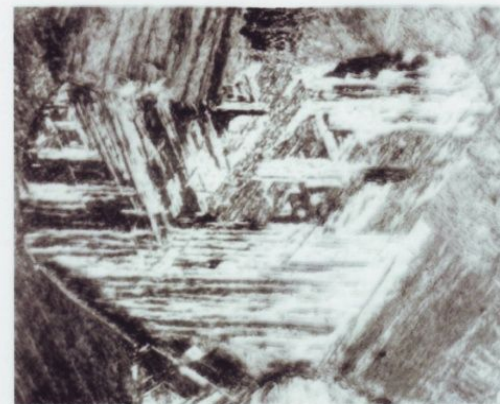


M_H и M_K - температуры
начала и конца мартенсит-
ного превращения

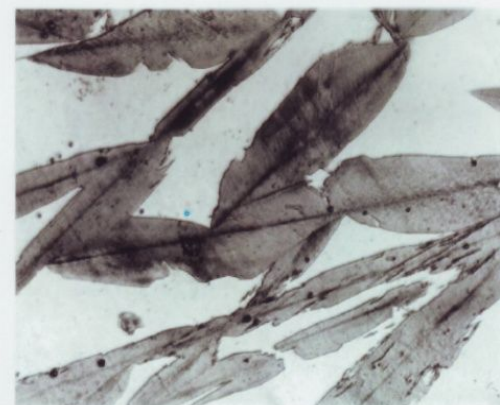
$A_{ост}$ - остаточный аустенит

Количество мартенсита, %

Структура мартенсита



Пакетный (реечный) мартенсит



Пластинчатый (двойникованный)
мартенсит

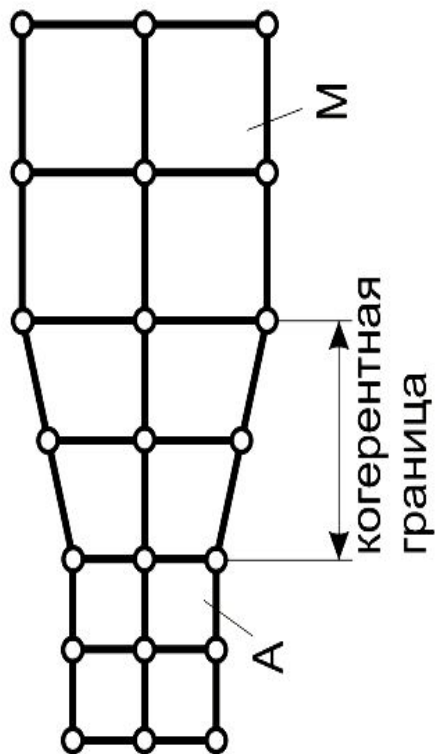
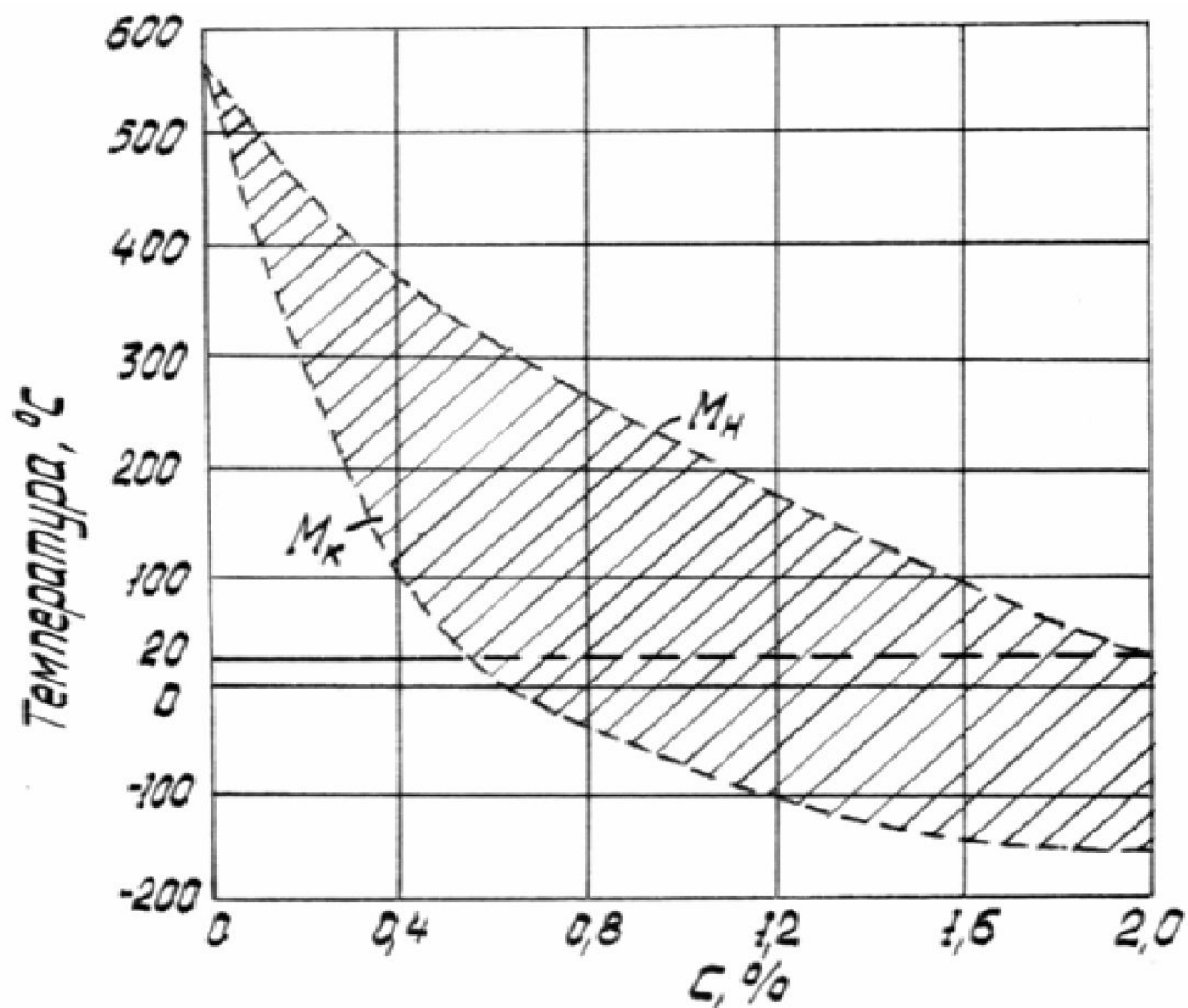


Схема
когерентного
роста
кристаллов
мартенсита



ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

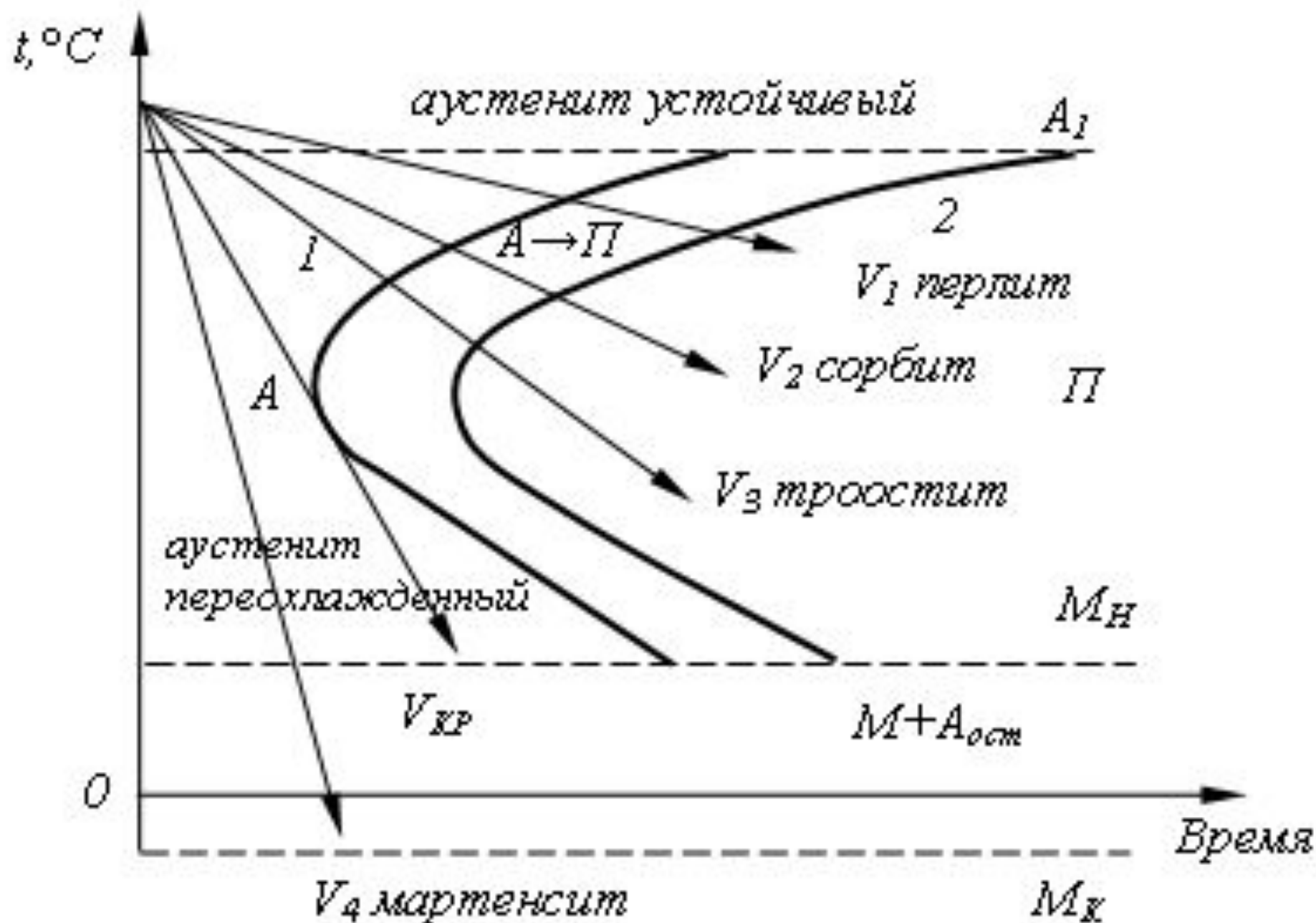
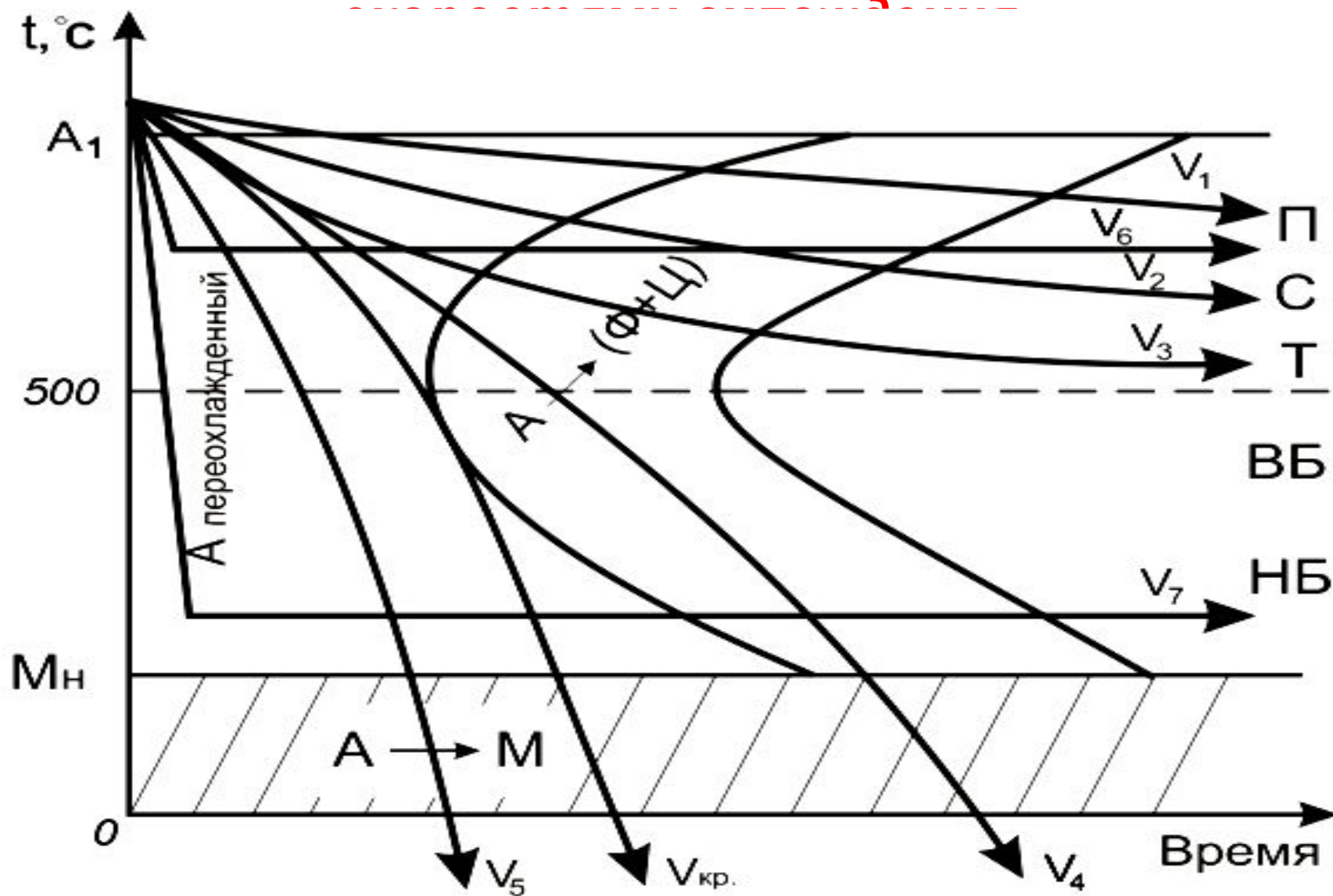
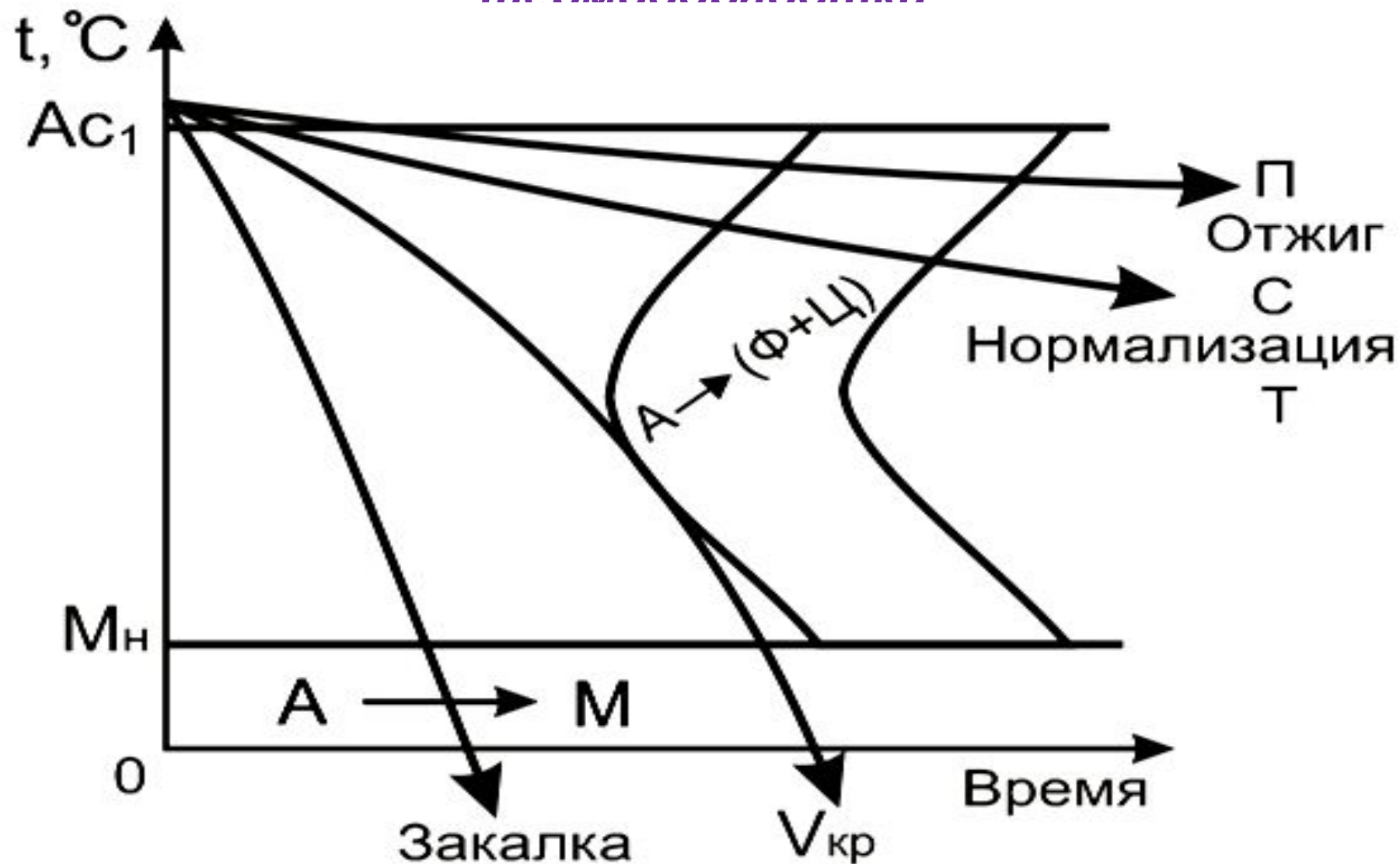


Диаграмма изотермического распада аустенита с нанесенными на нее

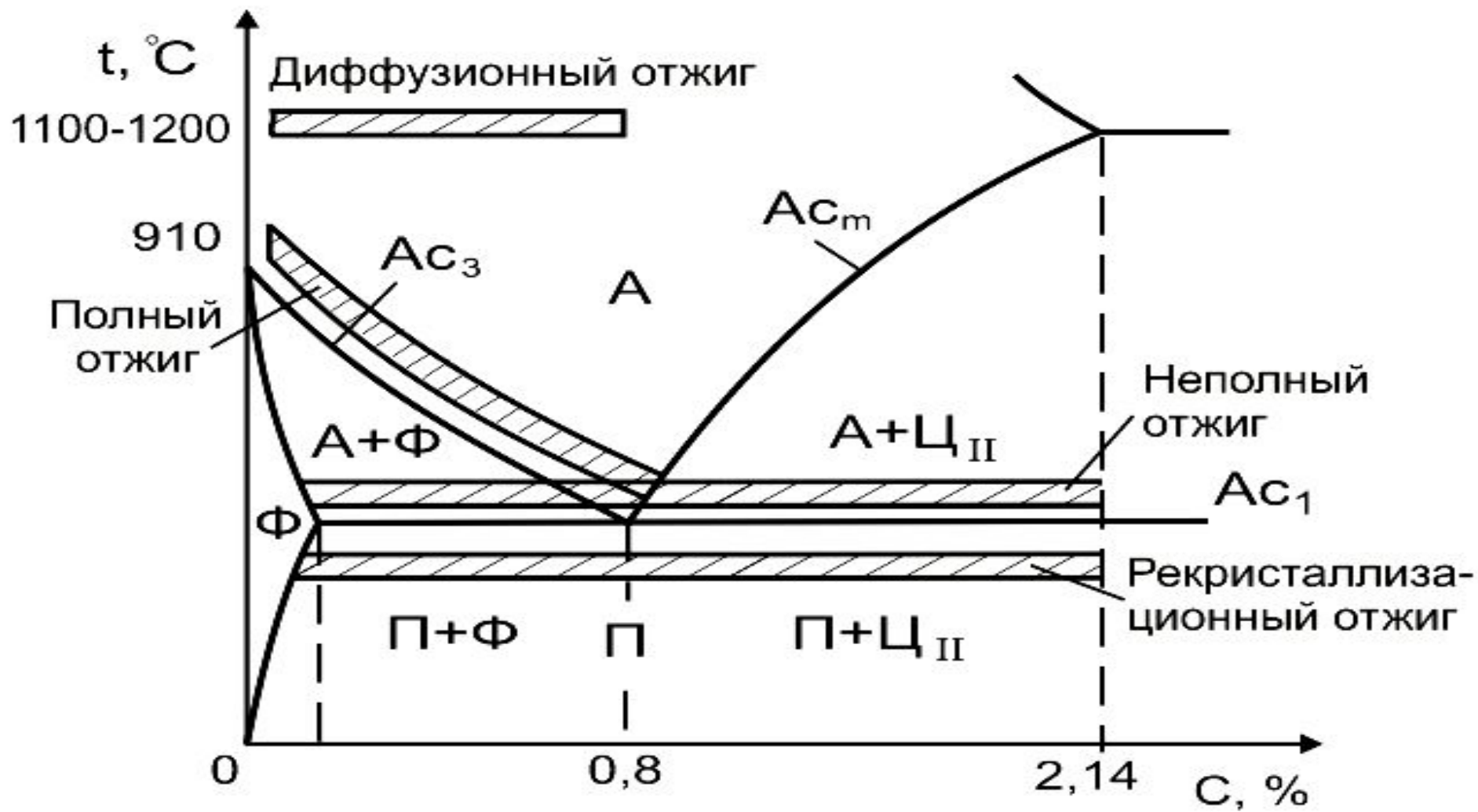


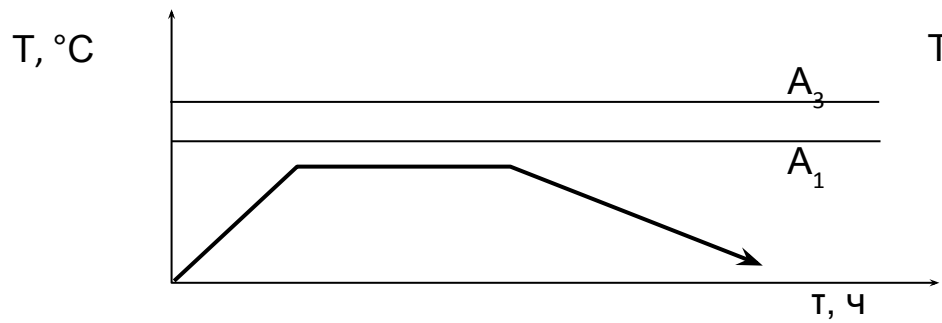
*Диаграмма изотермического распада аустенита для
эвтектоидной стали с нанесенными на нее
скоростями охлаждения при различных видах
термообработки*



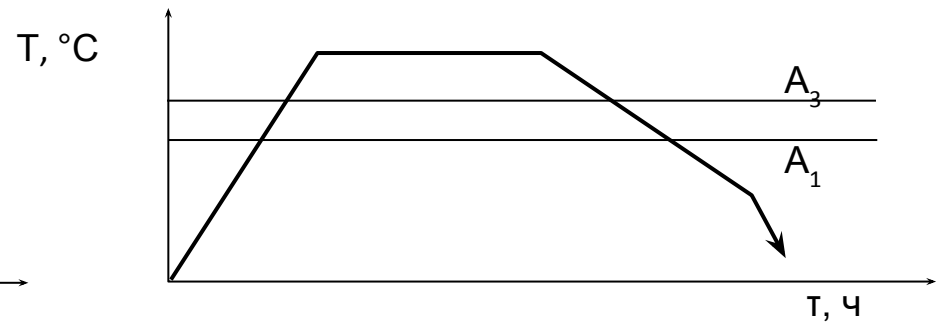
ОТЖИГ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

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

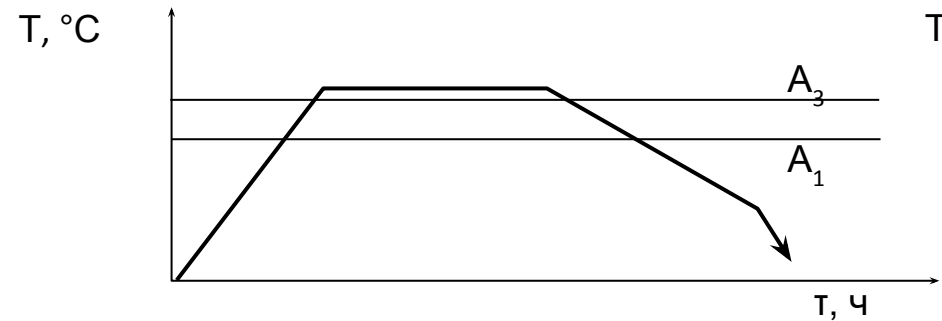




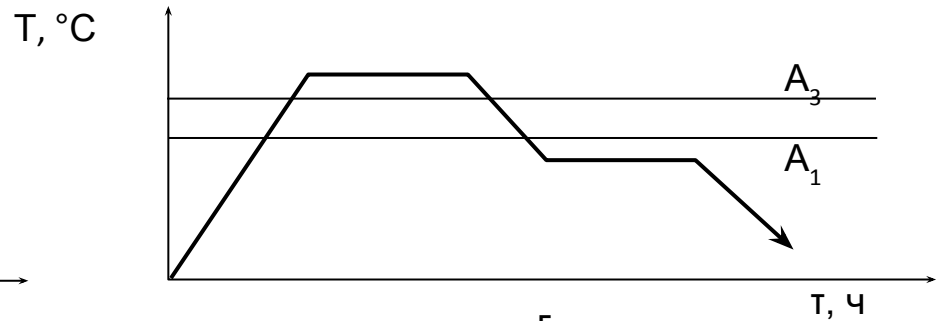
а



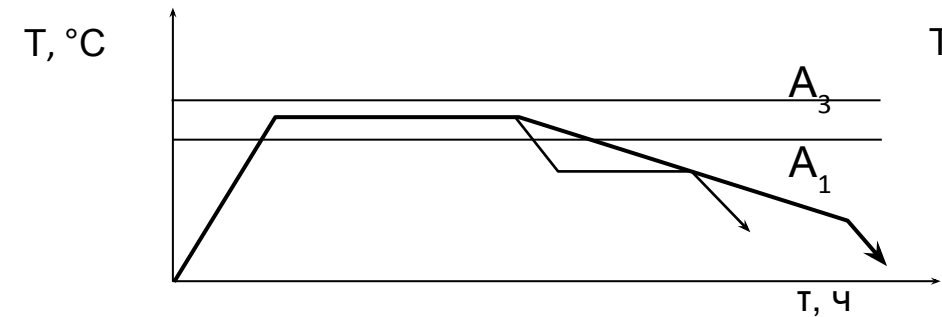
б



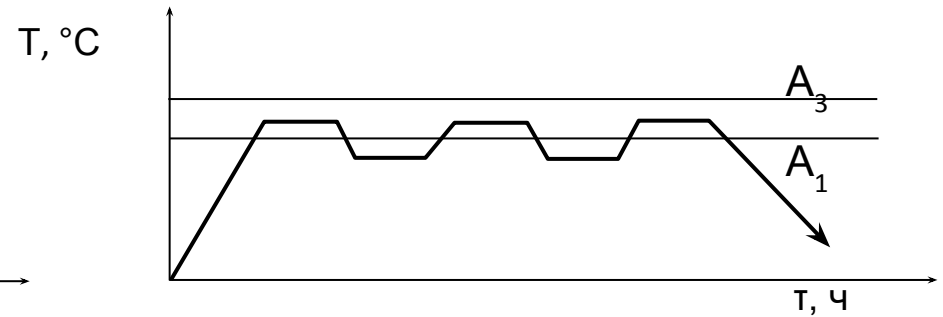
в



г



д

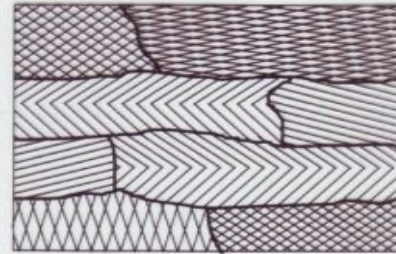
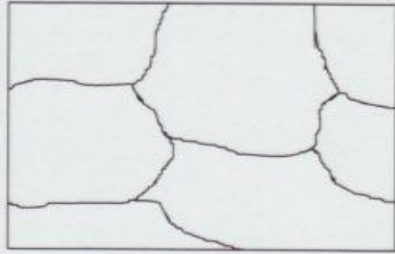


е

Виды отжига стали: а – рекристаллизационный и низкотемпературный;

- б – диффузионный; в – полный;
- г – изотермический; д – неполный; е – циклический

Изменение микроструктуры при пластической деформации

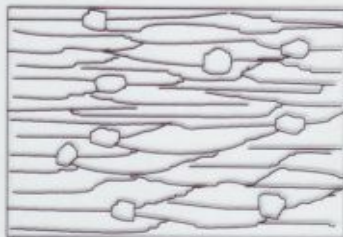


Исходная структура

Увеличение степени деформации

Изменение микроструктуры деформированного металла при нагреве

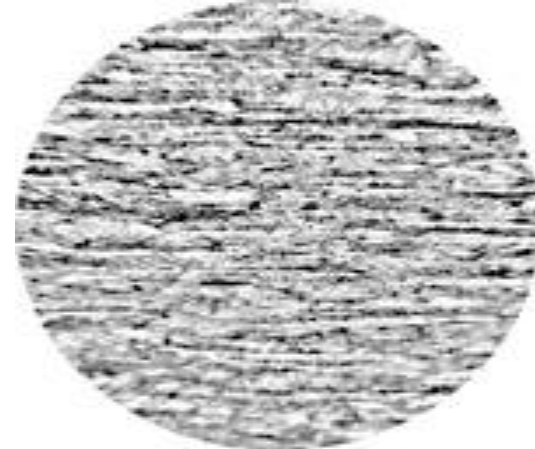
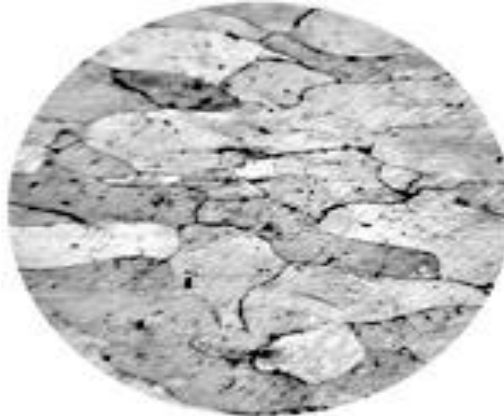
Температура нагрева



После деформации

Первичная рекристаллизация

Собирательная рекристаллизация



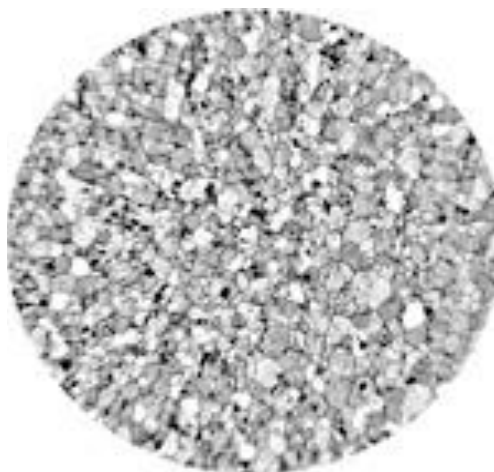
Марка сталь 05
Тип сплава: Деформированные и рекристаллизованные сплавы
Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте
Обработка: обжатие 5%
Твердость (НВ, ГПа): 1.12
Описание: Следы деформации - полосы (линии) сдвига в отдельных зернах, в которых плоскости легчайшего сдвига ближе к направлению максимальных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

обжатие 30%

Твердость (НВ, ГПа): 1.36

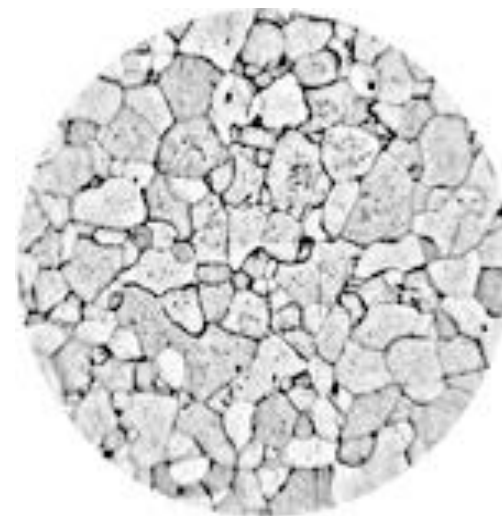
обжатие 80%

Твердость (НВ, ГПа): 2,1



обжатие 80%,
Отжиг при 600°C

Твердость (НВ, ГПа): 1.06

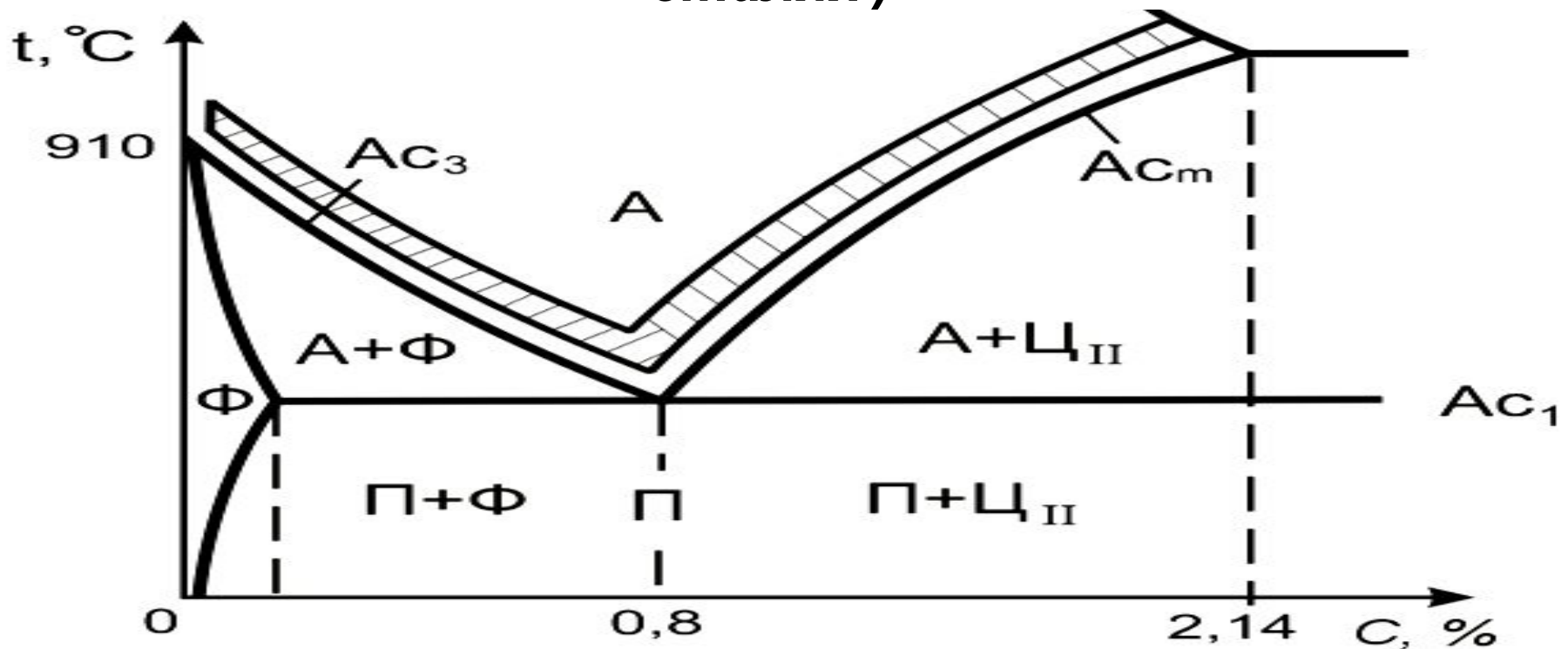


обжатие 80%,
Отжиг при 700°C

Твердость (НВ, ГПа): 1.04

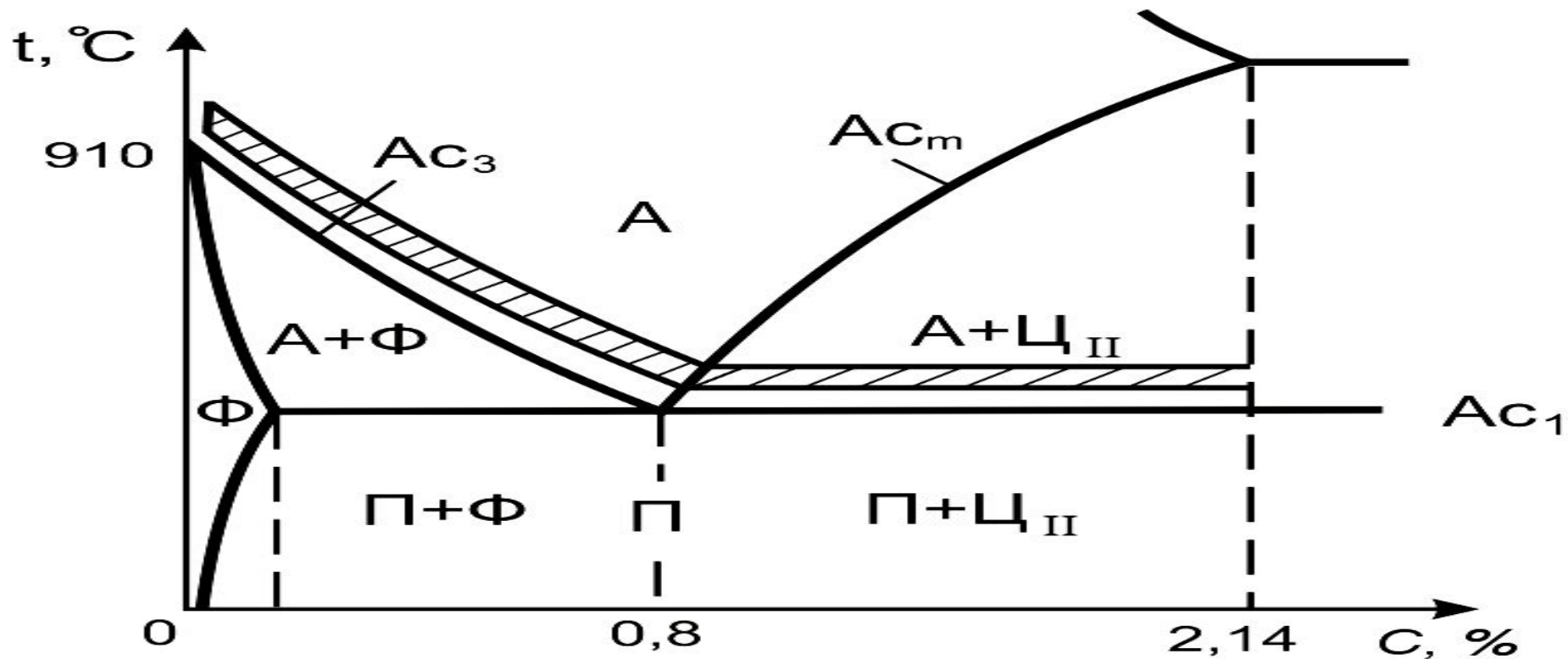
связанная с нагревом стали до аустенитного состояния, выдержки при температуре нагрева и последующего **ускоренного охлаждения на воздухе** (получаются следующие структуры:

сорбит+феррит в доэвтектоидных сталях (С+Ф);
сорбит в эвтектоидных сталях (С);
сорбит+вторичный цементит в заэвтектоидных сталях)



Температурный интервал нагрева стали под

ЗАКАЛКА - операция ГО, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше критической (доэвтектоидных сталей на 30 - 50°C выше A_{c3} (полная), заэвтектоидных на 30 - 50°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)



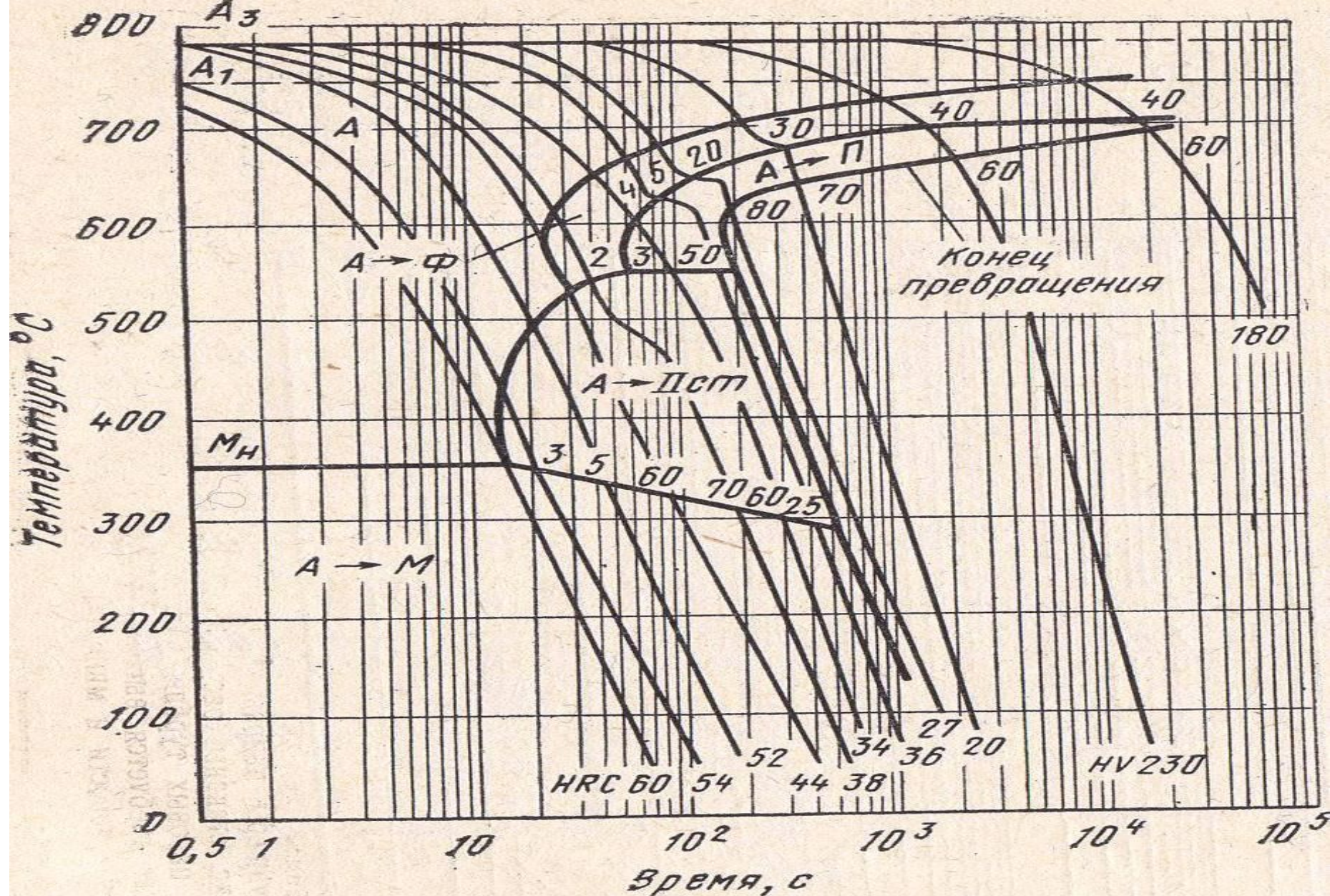
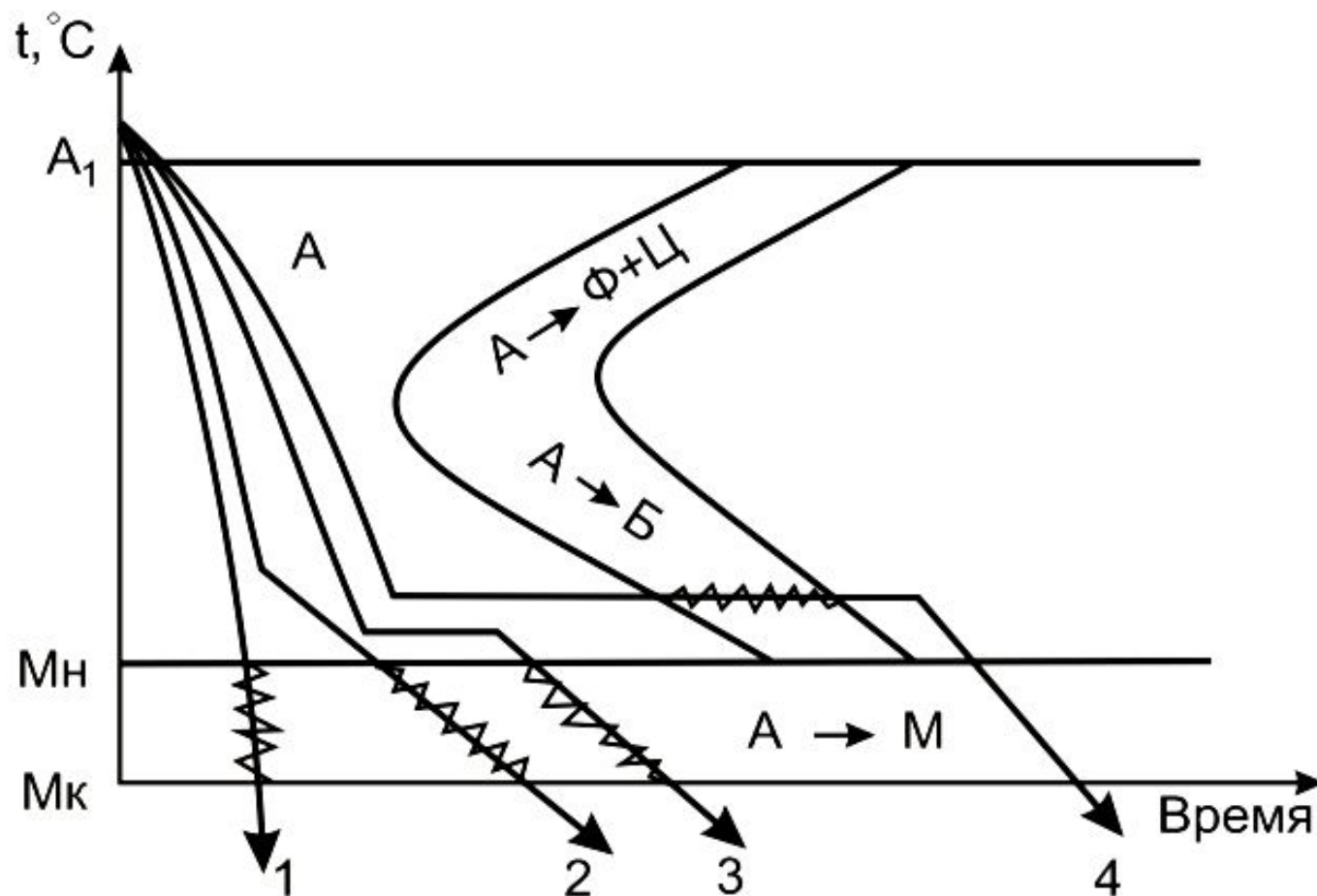


Рис. V.37. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 45X (0,44% C; 0,22% Si; 0,8% Mn; 1,04% Cr; 0,26% Ni; $A_1=745^\circ\text{C}$; $A_3=790^\circ\text{C}$; $M_H=350^\circ\text{C}$; $t_{\text{ауст}}=840^\circ\text{C}$)

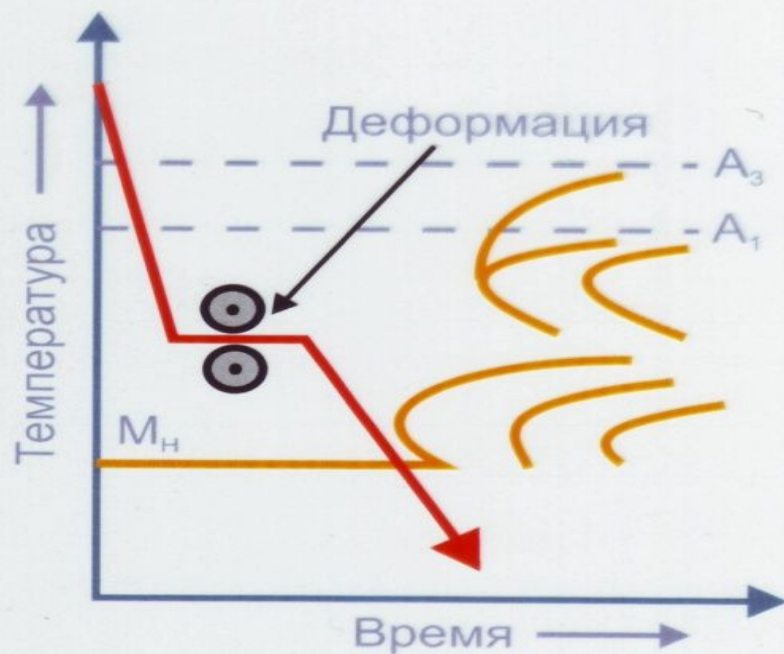


Способы охлаждения при закалке сталей:

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

Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО)

НТМО заключается в совмещении интенсивной пластической деформации переохлажденного аустенита в температурном интервале его высокой устойчивости, с последующей закалкой на мартенсит и отпуском.



Деформацию прокаткой, экструзией или волочением проводят при 600-400°С с обжатиями 70-95%.

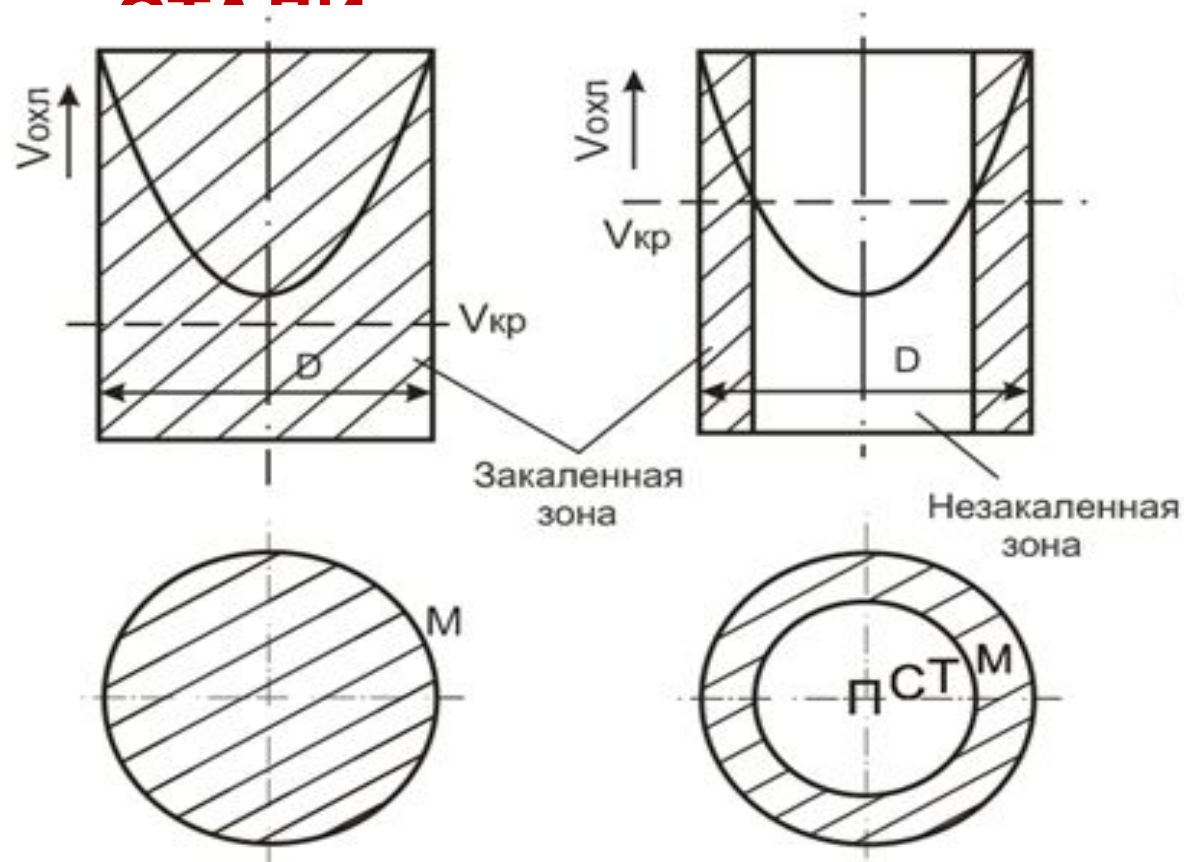
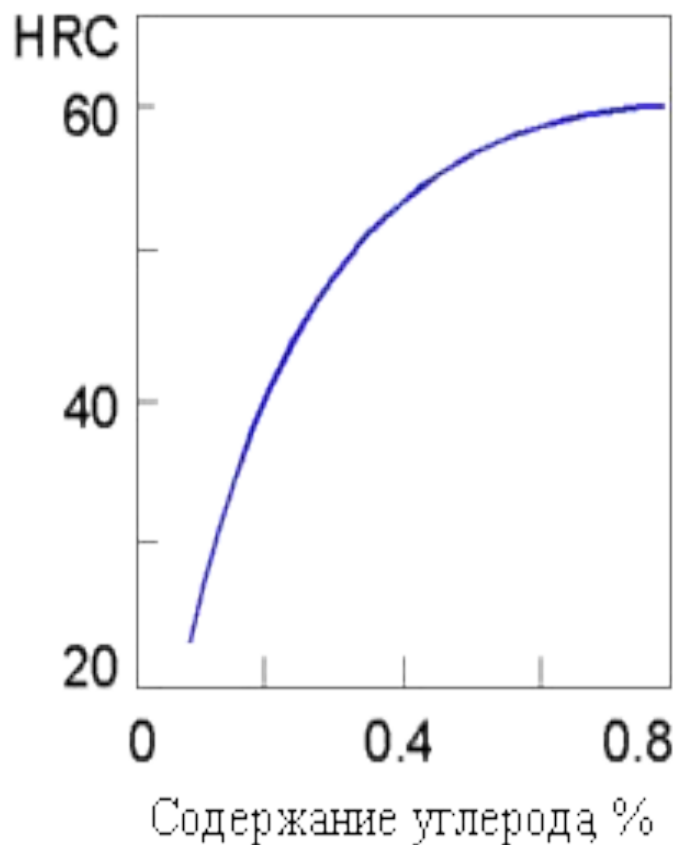
Для легированных сталей НТМО позволяет получить высокий уровень прочностных свойств.

Свойства сталей после отпуска при 220°С

Марка стали	Обработка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
37ХН3А	Обычная термообработка	1300	1900	6
	НТМО с деформацией при 525°С на 70% прокаткой	2600	2800	5

ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ И ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ

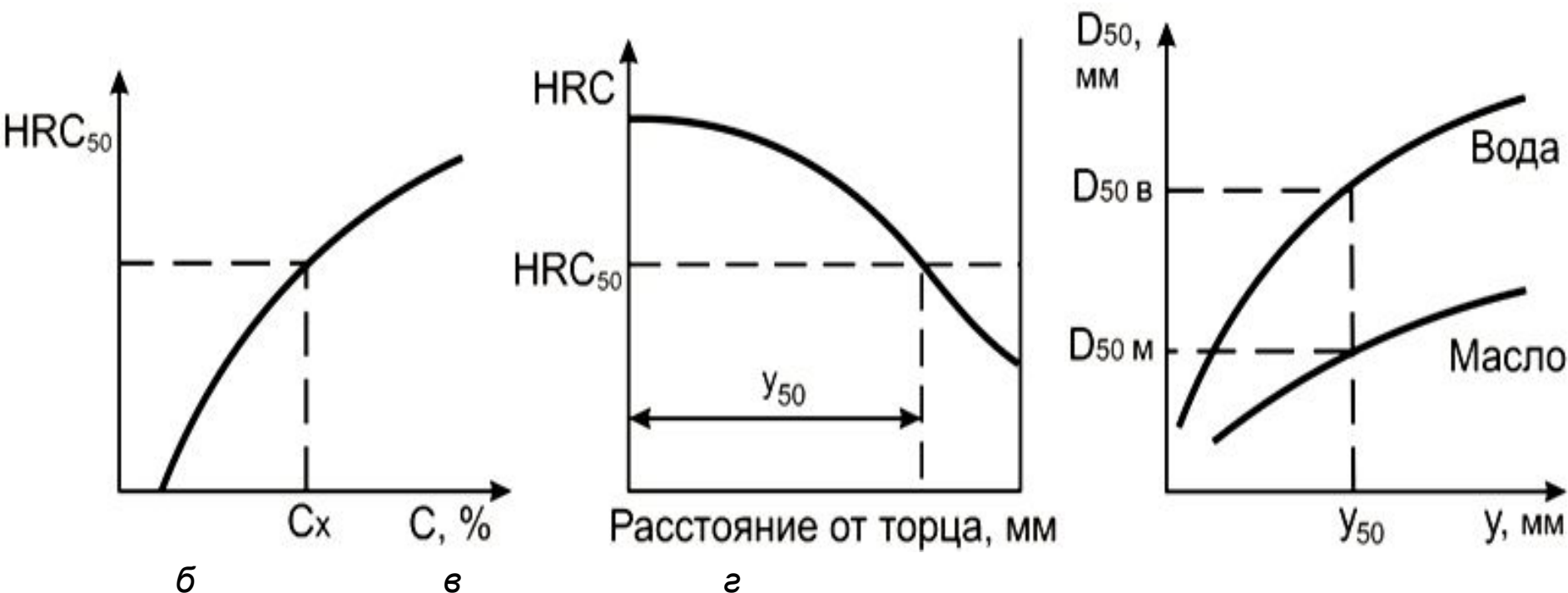
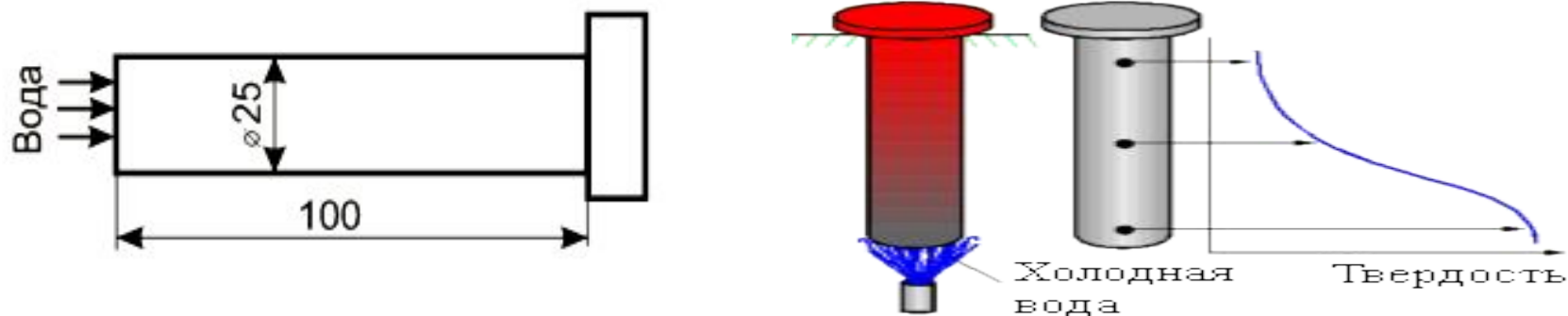
СТАЛИ



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

Прокаливаемость – это способность стали получать закаленные слои на определенную глубину. Под закаленным слоем понимают слои со структурой мартенсита или троосто-мартенсита, обладающие высокой

ТОРЦЕВОЙ ЗАКАЛКИ



а – схема охлаждения стандартного образца; **б** – зависимость твердости полумартенситной зоны HRC_{50} от содержания углерода в стали; **в** – изменение твердости по длине образца; **г** – диаграмма определения **$D_{кр}$**

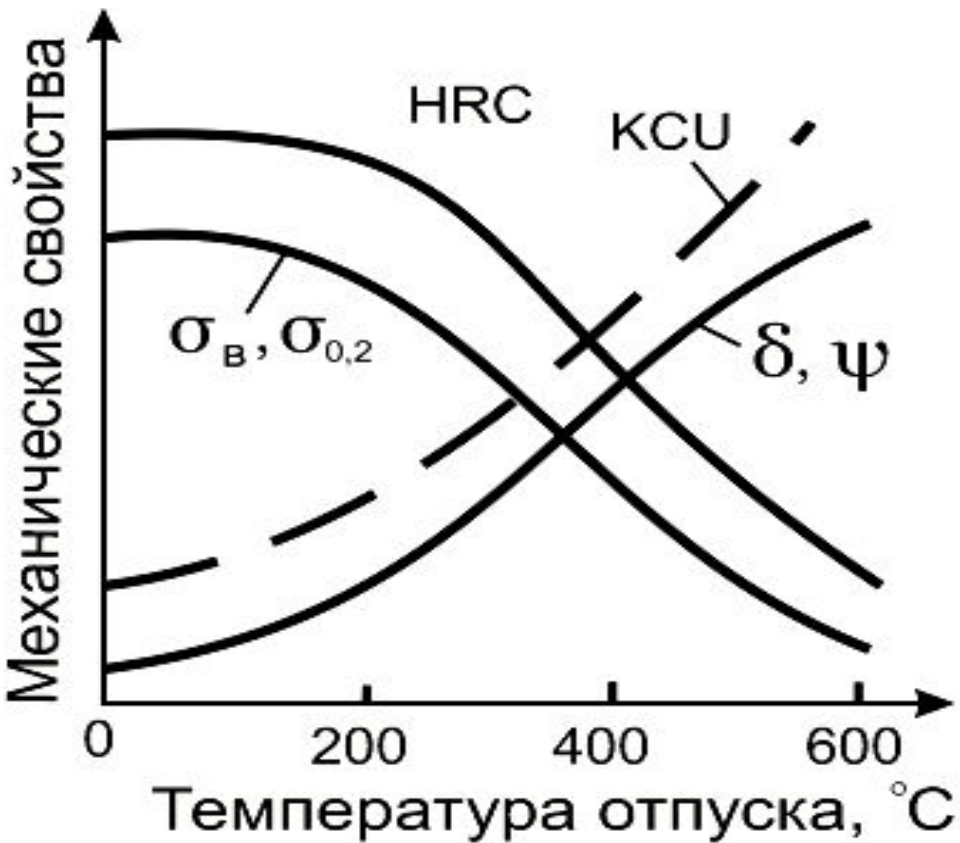
стали до температуры ниже A_{c1} , выдержке и последующем охлаждении с определенной скоростью. Он является окончательной операцией термической обработки, т.к. обеспечивает требуемые механические свойства стали и полностью или частично устраняет внутренние напряжения (температурные и структурные), возникающие 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).

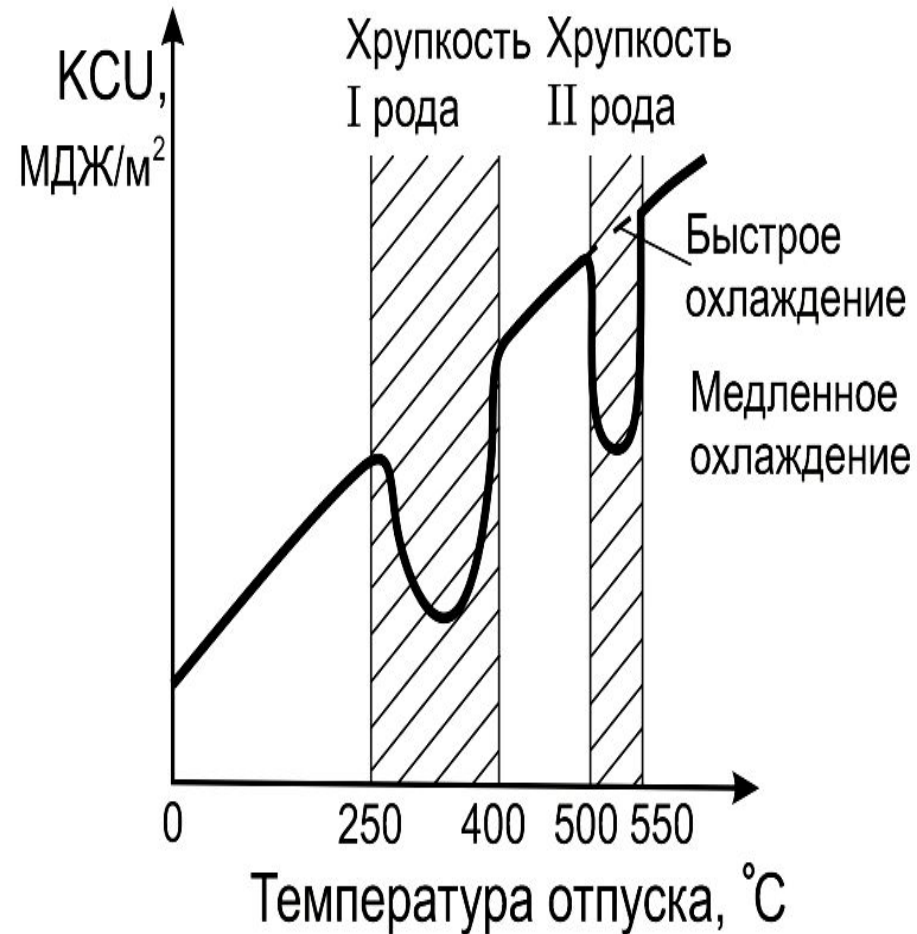
2) **Средний отпуск.** Нагрев – 350 – 500°C), выдержка – 1 – 8 ч. мартенсит закалки переходит в троостит отпуска – 40 – 45 HRC. Обеспечивается наилучшее сочетание предела упругости с пределом выносливости.

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

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°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

закалке и последующему отпуску используются 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 $T_H = A_{c3} + (30 - 50)^\circ\text{C} = 820 + (30 - 50) = 850 - 870^\circ\text{C}$. (температура критической точки A_{c3} определяется по линии GS диаграммы железо – цементит).

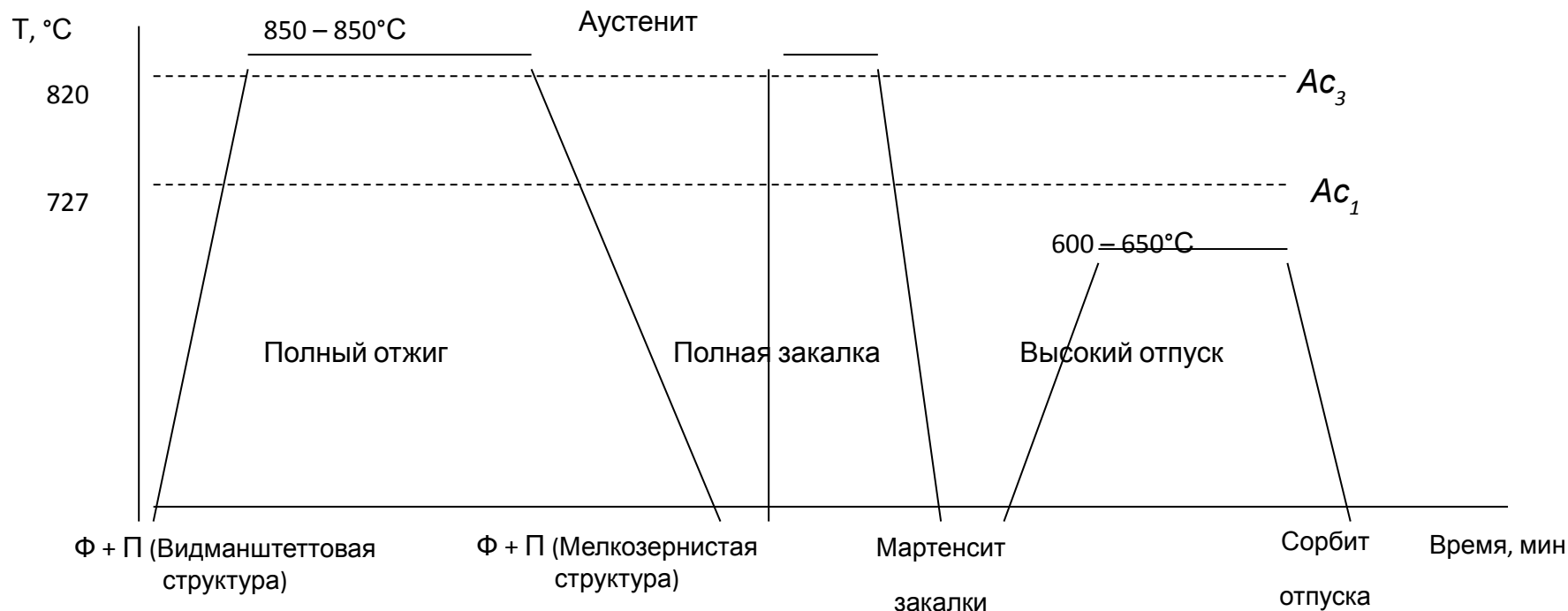
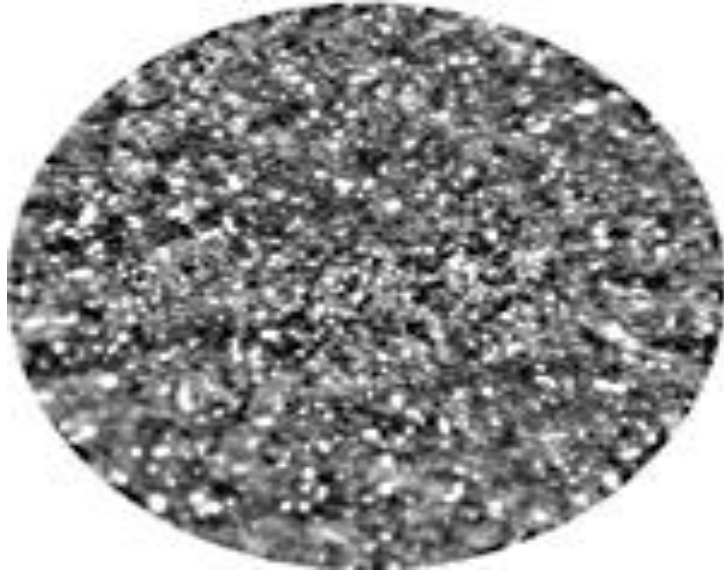


График термической обработки кронштейна из стали 25Л



Марка сталь У12

Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте

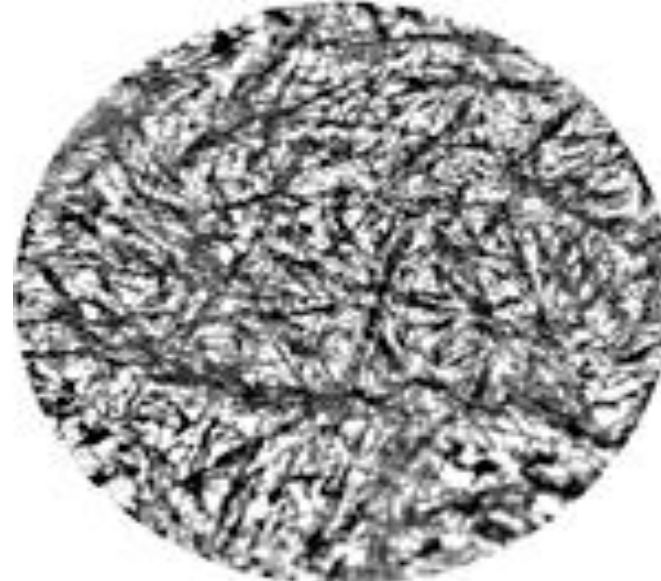
Обработка: закалка с 750°C в воду (не полная)

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

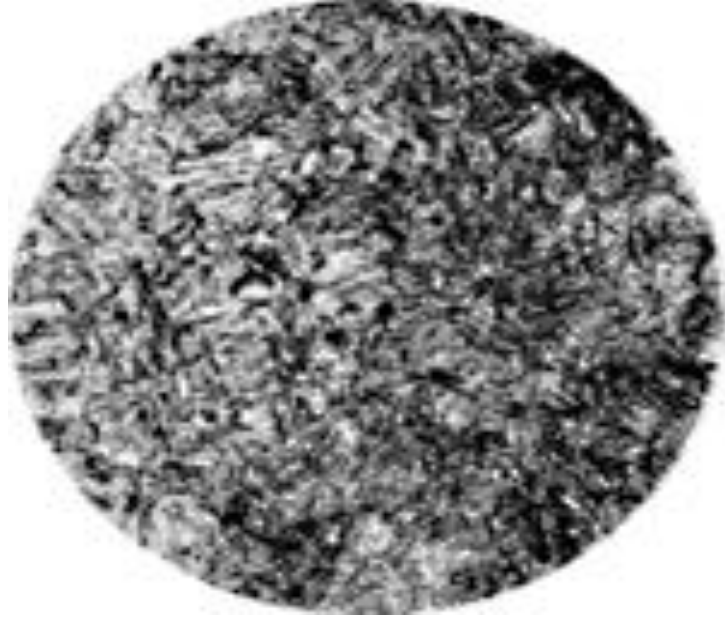
Компоненты: С (1.2 масс%)

Структурные составляющие: мартенсит , аустенит остаточный

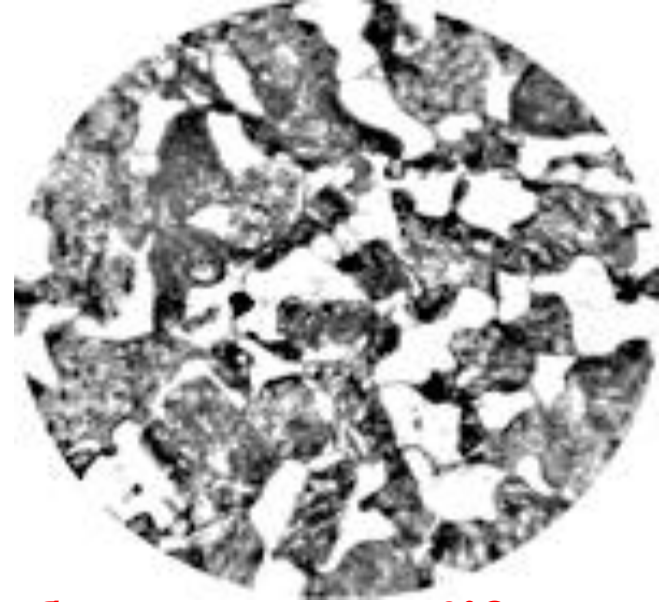
Субструктура: Однородная светлая (нет субструктуры)

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:	C (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.