

**ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова
Кафедра технологии материалов и
материаловедения**

Основы термической обработки и поверхностного упрочнения конструкционных материалов

**Составители: к.т.н., профессор, заведующий кафедрой ТМиМ
Кузьмин А.А., к.т.н., доцент кафедры ТМиМ Богданова Н.В.**

2014 г

Основы термической обработки

Термическая обработка. Определение

Под термической обработкой понимают технологические процессы, при которых путем теплового воздействия целенаправленно изменяют структуру и свойства металлов и сплавов.

Схема термической обработки



Основные параметры термической обработки:

- температура нагрева;
- длительность выдержки;
- скорость нагрева;
- скорость охлаждения.

Основные понятия

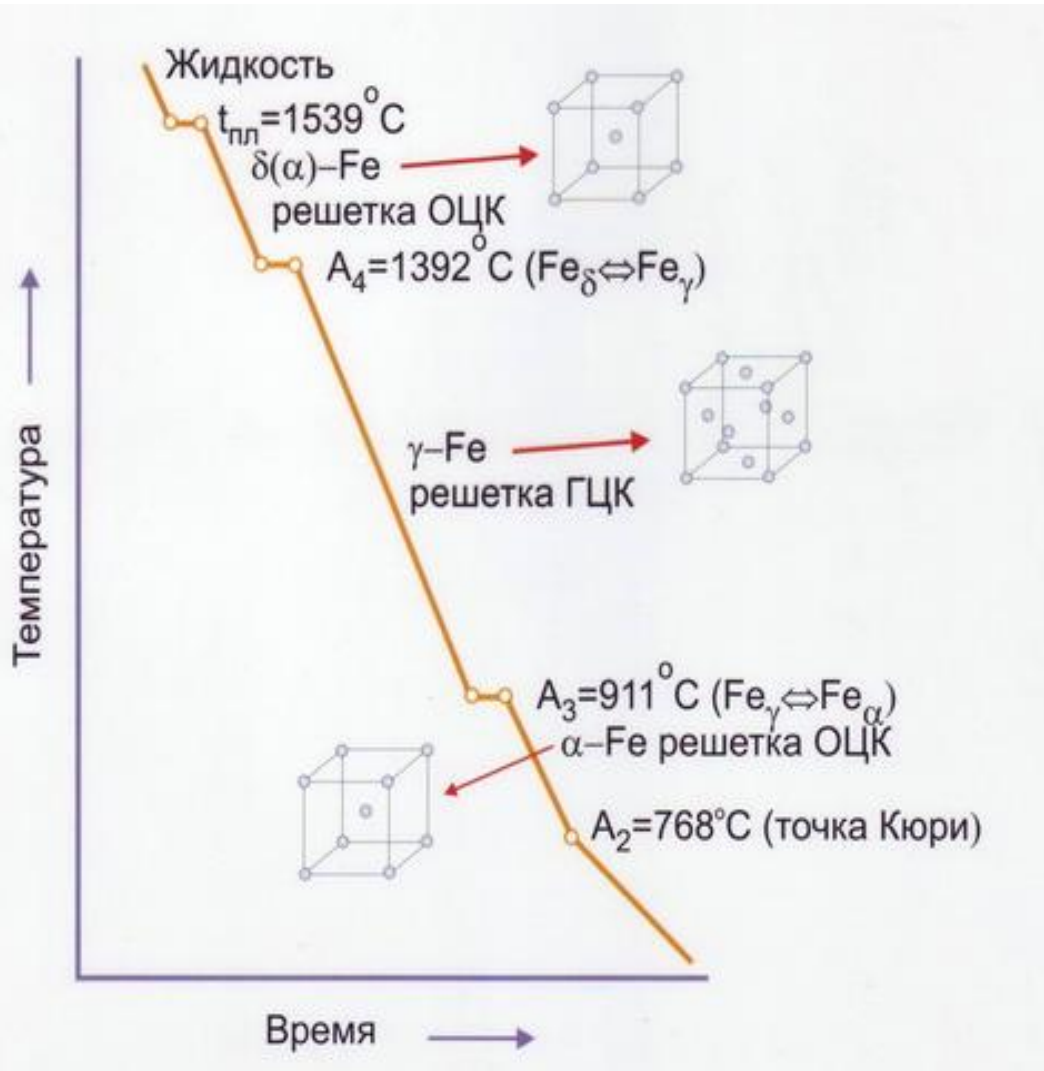
Термической обработкой называется технологический процесс, состоящий из совокупности операций нагрева, выдержки и охлаждения изделий из металлов и сплавов, целью которого является изменение их структуры и свойств в заданном направлении.

Термическая обработка рассматривает и объясняет изменение строения и свойств металлов и сплавов при тепловом воздействии, а также при тепловом воздействии в сочетании с химическим, деформационным, магнитным и другими воздействиями.

Термическая обработка является одним из наиболее распространенных в современной технике способов получения заданных свойств металлов и сплавов. Термическая обработка применяется в качестве промежуточной операции для улучшения обрабатываемости давлением, резанием и др., или как окончательная операция для придания металлу или сплаву такого комплекса механических, физических и химических свойств, который сможет обеспечить заданные эксплуатационные характеристики изделия. Чем ответственнее изделия (конструкция), тем, как правило, в ней больше термически обработанных деталей.

Аллотропия железа

В основу термической обработки положено явление аллотропии и распада аустенита на различные структурные составляющие в зависимости от скорости охлаждения.



Существуют следующие аллотропные модификации железа:

Альфа-железо: до 911°C , ОЦК решетка, до $0,025\%C$

Гамма-железо: от 911°C до 1492°C , ГЦК решетка, до $2,14\%C$

Дельта-железо: от 1392°C до 1539°C , ОЦК решетка

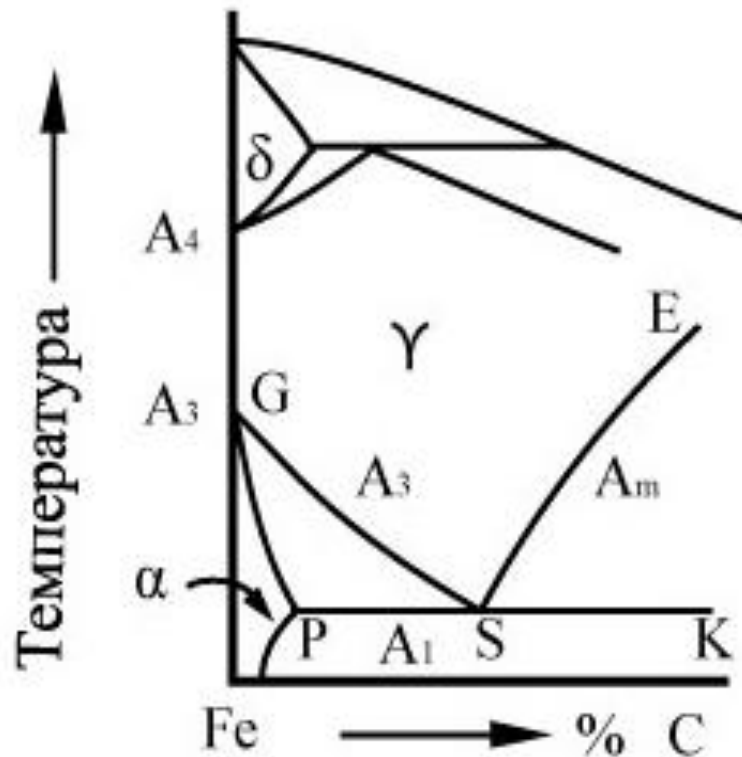
Поэтому для определения режимов ТО большое значение имеет диаграмма Fe-Fe₃C.

Критические точки железа и стали:

Железа

Точка A_3 – температура равновесия $Fe\alpha \leftrightarrow Fe\gamma$ ($911^\circ C$)

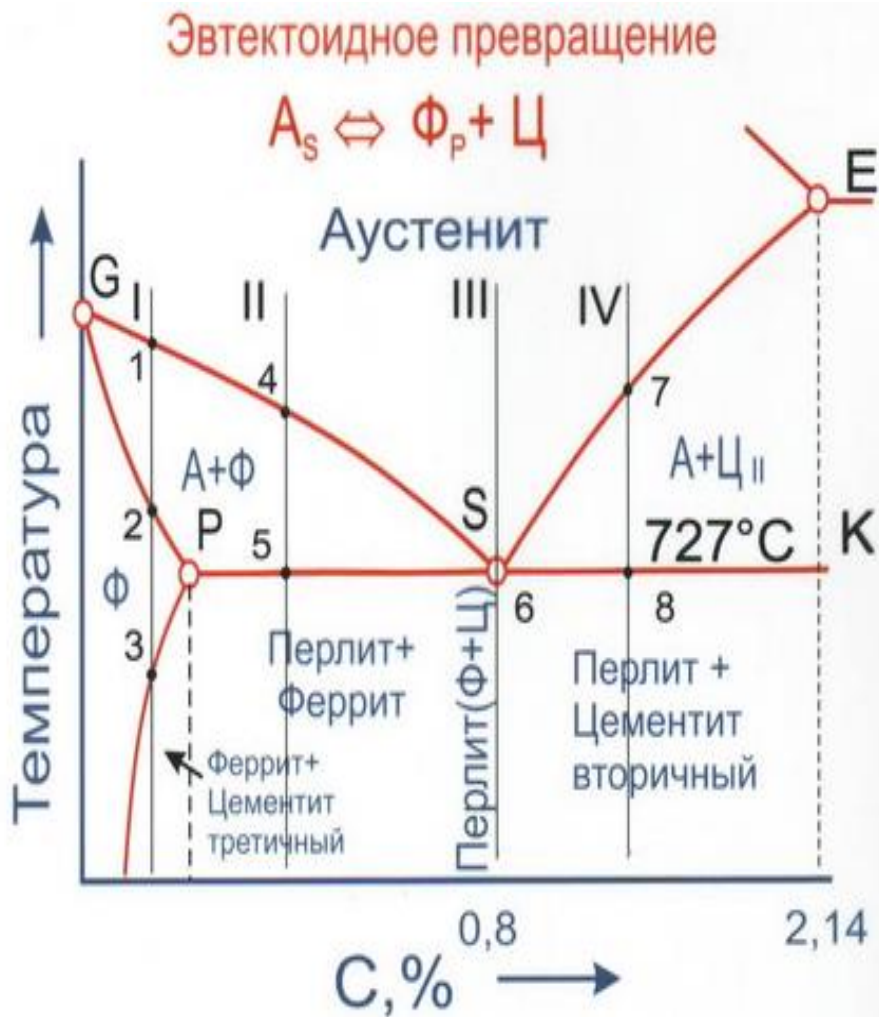
Точка A_4 – температура равновесия $Fe\gamma \leftrightarrow Fe\delta$ ($1392^\circ C$)



Стали

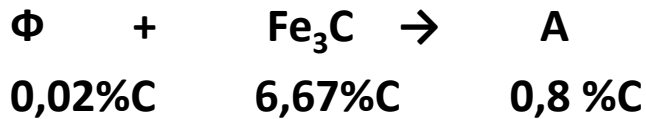
- **Точка A_1** (линия PSK) - температура эвтектоидного превращения: при медленном охлаждении аустенит состава S превращается в феррит состава P и цементит, при медленном нагреве реакция идет в обратном направлении
- **Точка A_3** - (линия GS) - начало выделения феррита из аустенита при медленном охлаждении или конец превращения феррита в аустенит при медленном нагреве.
- **Точка A_m** (линия SE) - начало выделения цементита из аустенита при медленном охлаждении или окончание растворения цементита в аустените при медленном нагреве.
- **Точка A_2** ($768^\circ C$) - температура перехода феррита из ферромагнитного в парамагнитное состояние при нагреве и в обратном направлении при охлаждении.
- **Критические точки** стали, определенные:
 - при нагреве – A_{C1} , A_{C3} , A_{CM} ,
 - при охлаждении – A_{R1} , A_{R3} , A_{RM}

Основные превращения в сталях при термической обработке



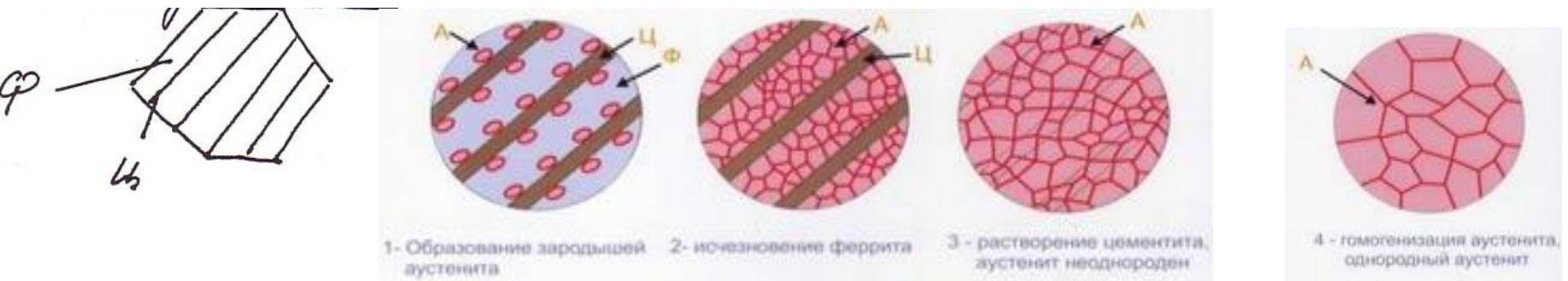
1. Образование аустенита при нагреве
2. Диффузионное (перлитное) превращение аустенита в феррито-цементитную смесь
3. Бездиффузионное (сдвиговое) мартенситное превращение аустенита
4. Промежуточное (бейнитное) превращение
5. Превращения мартенсита в феррито-цементитную смесь при нагреве

Образование аустенита при нагреве эвтектоидной стали



Зерно перлита (идеальное) при комнатной температуре имеет форму шестигранника.

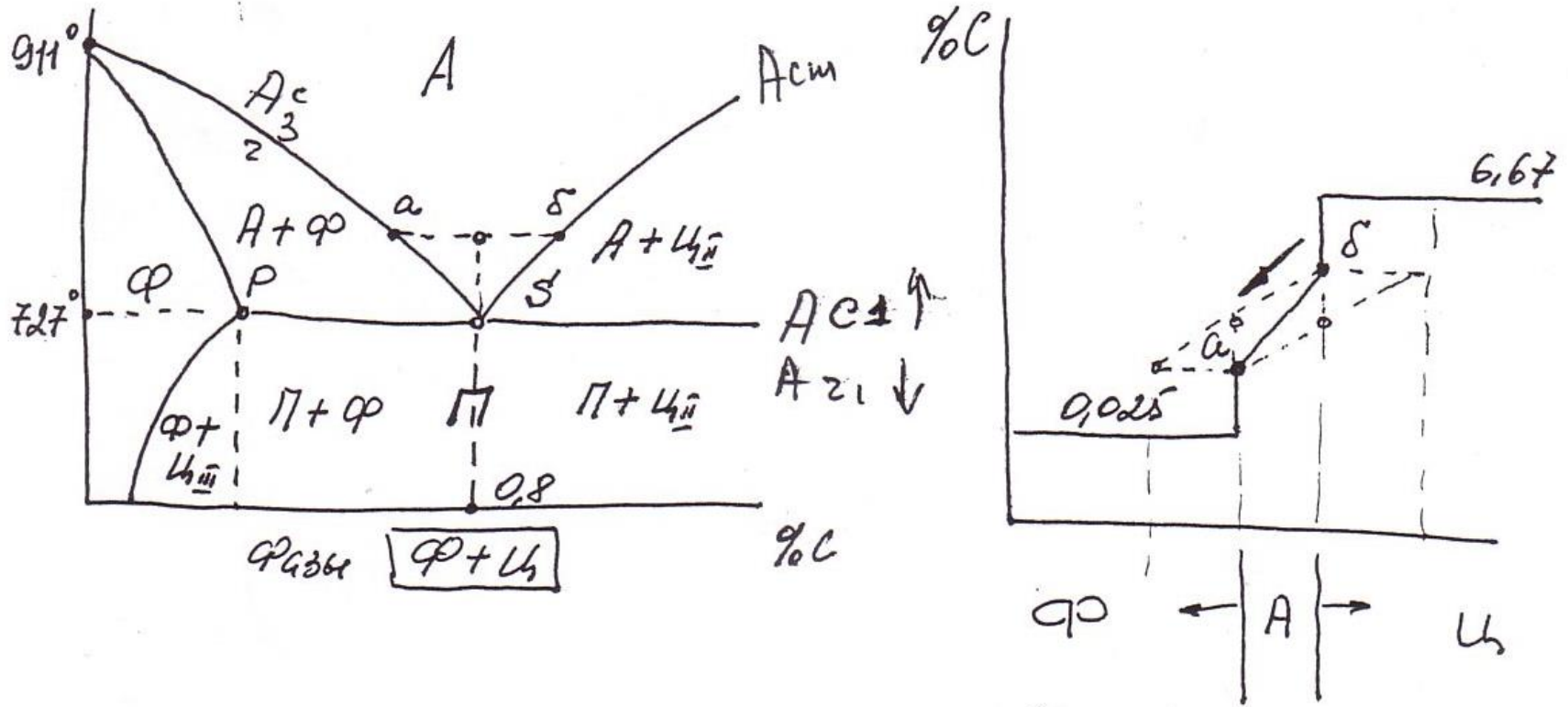
Пластины феррита в 7,6 раза толще пластин цементита



Этапы превращения

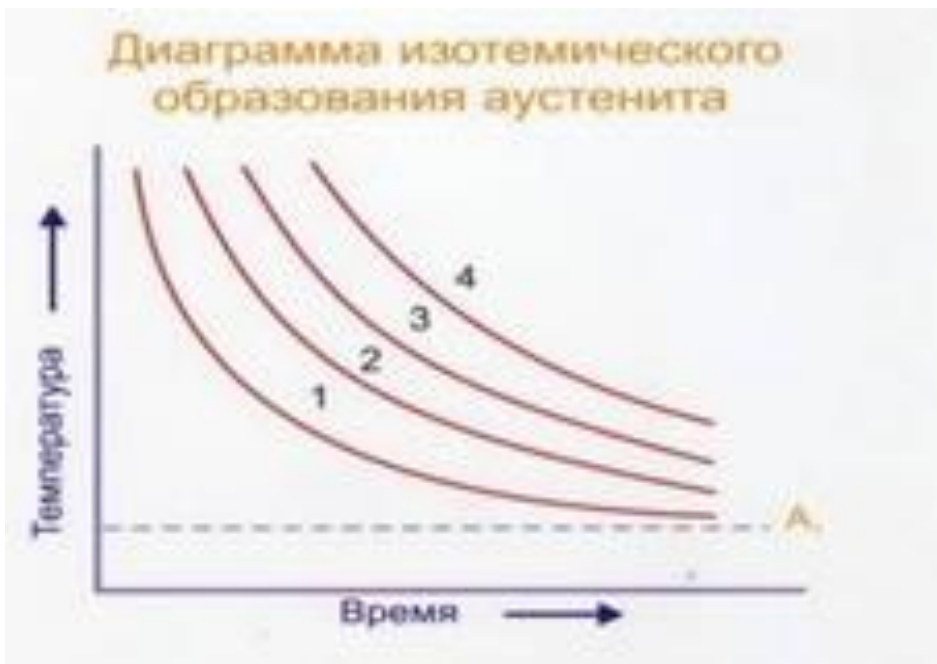
- 1-й этап – образование зародышей аустенита. (В одном зерне перлита образуется «n» зародышей аустенита, что приводит к измельчению зерна по сравнению с исходным.)
- 2-й этап. Исчезновение феррита.(Феррит раньше превращается в аустенит, тогда как цементит растворится еще не полностью)
- 3-й этап. Растворение цементита, аустенит неоднороден (через некоторое время остатки цементита растворяются и получается неоднородный аустенит).
- 4-й этап. Гомогенизация аустенита. Аустенит однороден.

Образование аустенита при нагреве эвтектоидной стали

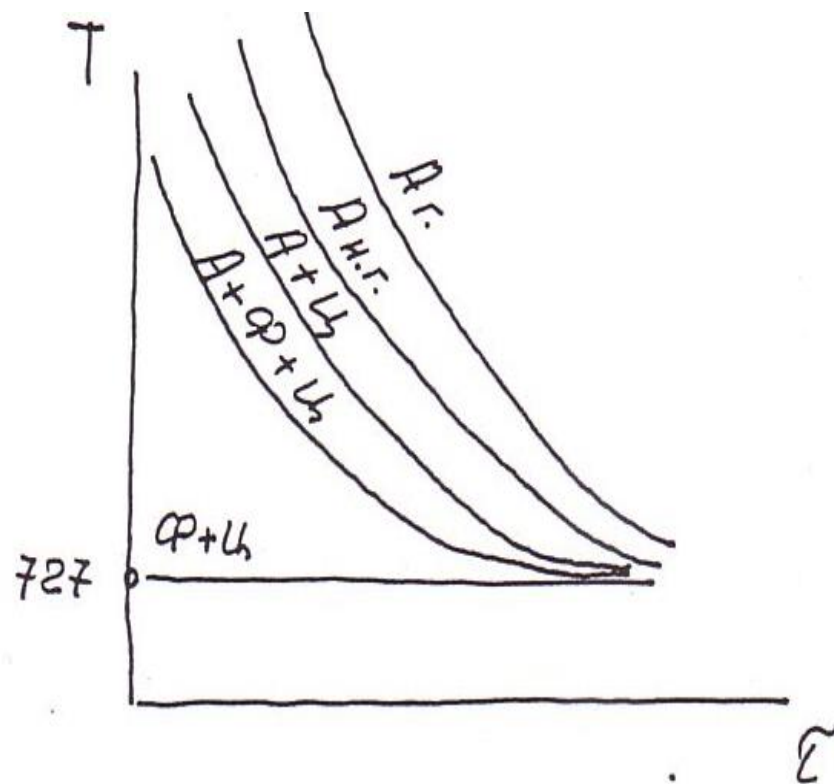


- Превращение состоит из двух одновременно протекающих процессов: альфа-гамма перехода и растворения в аустенита цементита. Процесс диффузионный. Движущая сила процесса – разность свободных энергий $Fe\alpha$ и $Fe\gamma$.
- Диффузия углерода в зерне аустенита от участка, соприкасающегося с цементитом к участку, соприкасающемуся с ферритом приводит к нарушению равновесия на границах А-Ц и Ф-А (флуктуации углерода).

Диаграмма изотермического образования аустенита



1 - начало образования А, 2- исчезновение Ф,
3-конец растворения Ц, 4-конец гомогенизации А



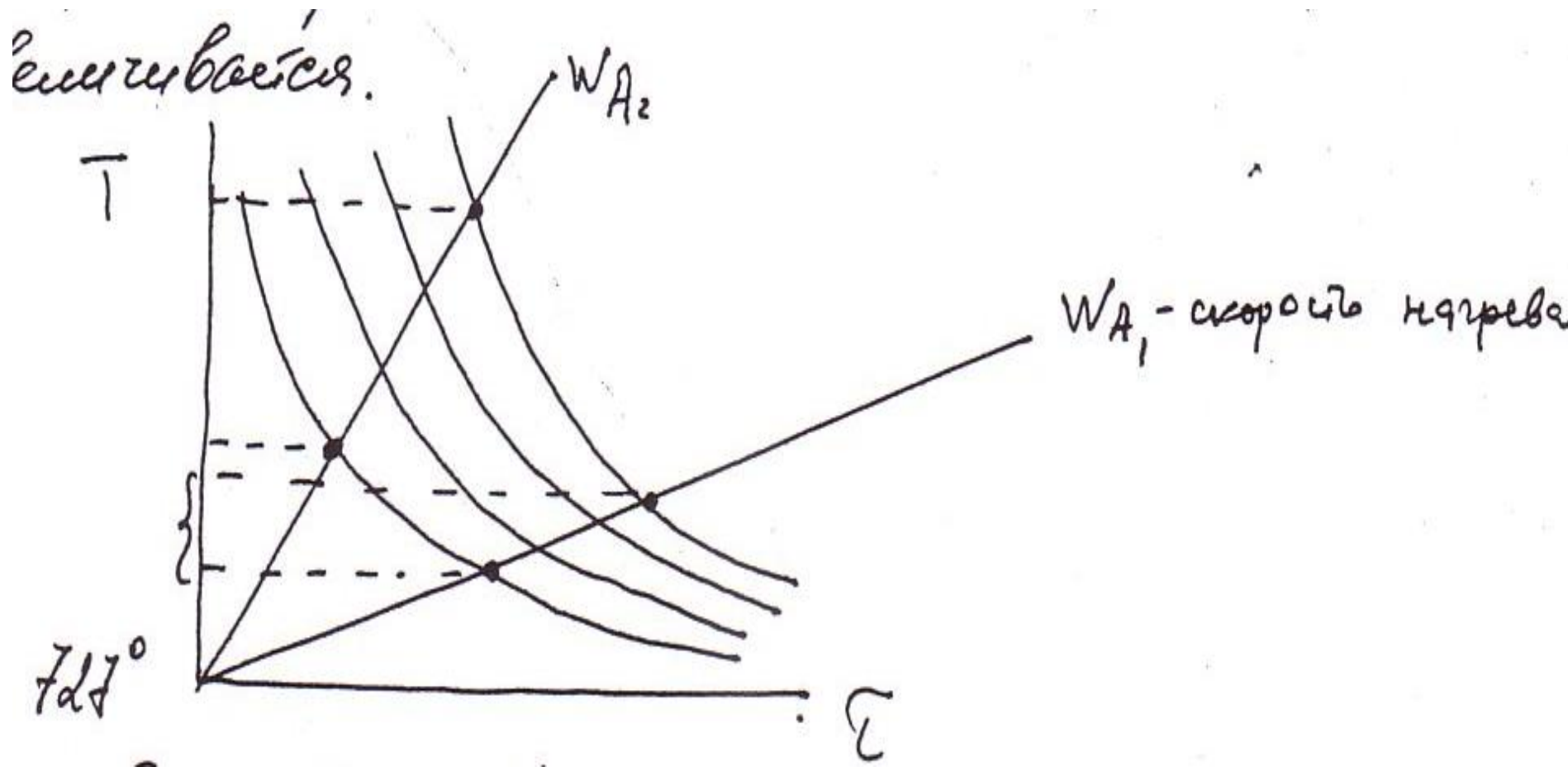
Зародыши аустенита образуются на границах Ф и Ц благодаря флуктуации углерода. Этому способствует наличие дефектов на границах фаз.

Скорость превращения $\Pi \rightarrow A$ зависит от:

- Температуры нагрева (перегрева)
- Дисперсности исходной структуры перлита
- Содержания углерода

Влияние скорости нагрева на положение критических точек

При непрерывном нагреве превращение $\text{П} \rightarrow \text{А}$ у эвтектоидной стали происходит в интервале температур, а у доэвтектоидной и заэвтектоидной сталей A_1 (PSK) A_3 (GS) и A_{cm} (SE) смещаются в область более высоких температур, при этом с увеличением скорости нагрева возрастает смещение точек, а интервал между ними увеличивается.



Влияние скорости нагрева на положение критических точек

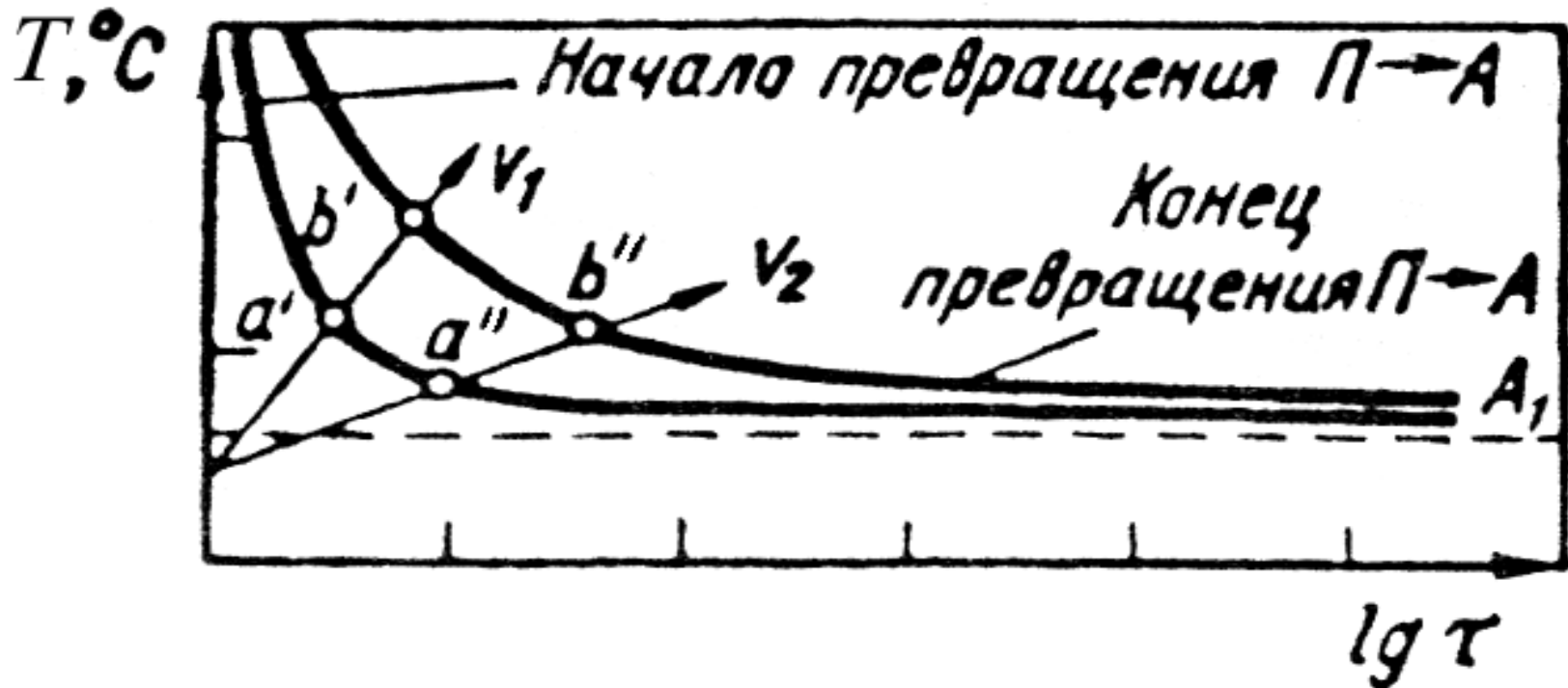
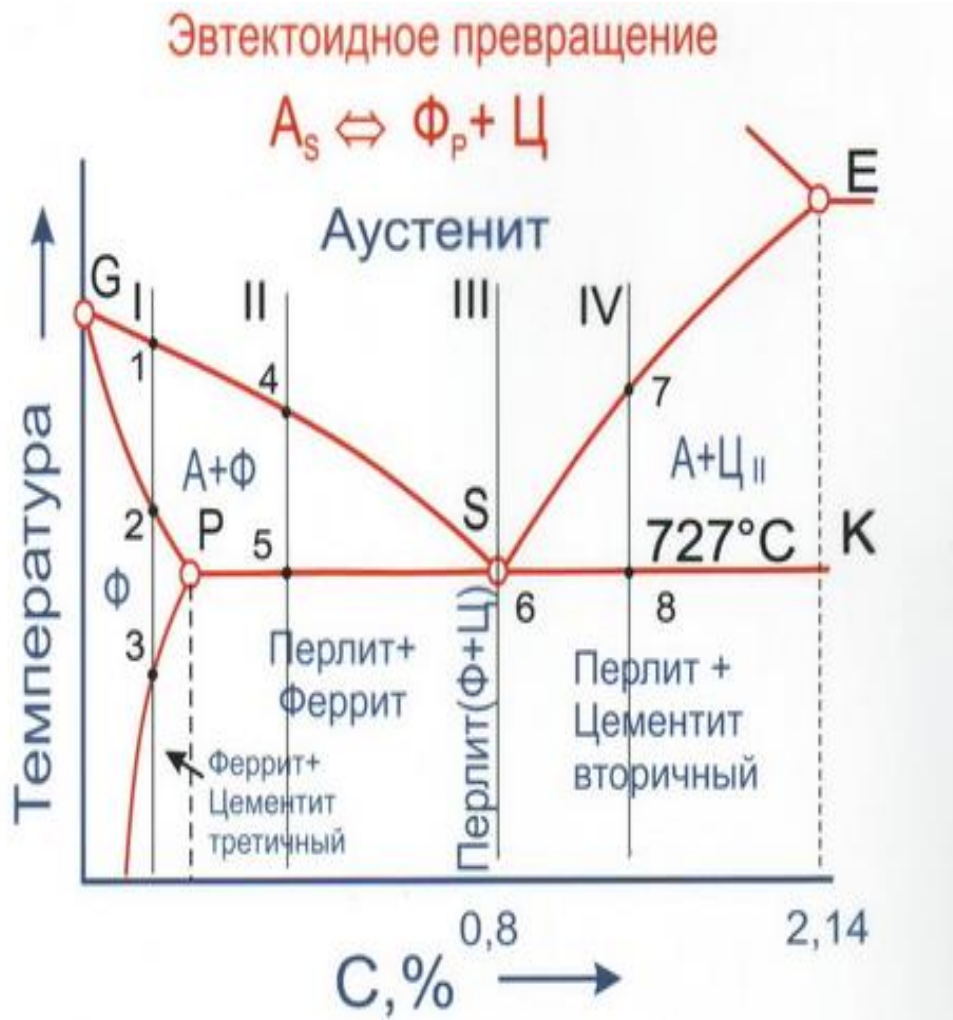


Диаграмма изотермического превращения перлита в аустенит эвтектоидной стали: a' , a'' — точки начала превращения со скоростями v_1 , v_2 ; b' , b'' — точки конца превращения со скоростями v_1 , v_2 ($v_1 > v_2$)

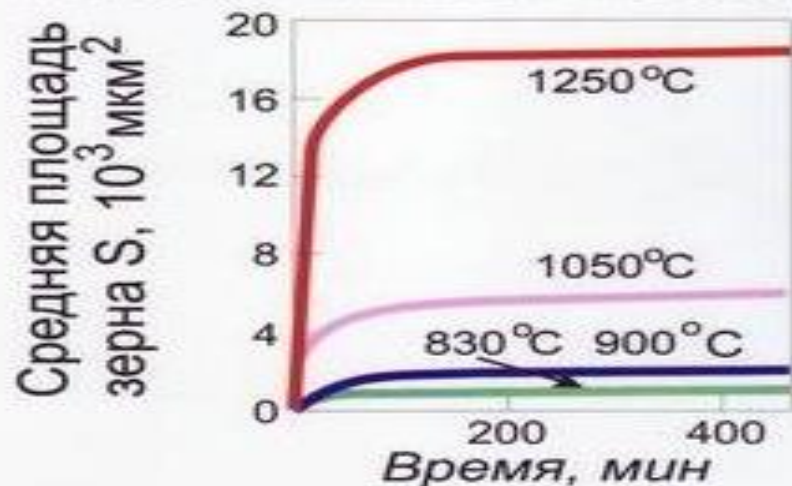
Образование аустенита при нагреве доэвтектоидной и заэвтектоидной сталей



- Б) При нагрева доэвтектоидной стали ($C < 0,8\%$) выше точки A_1 после превращения перлита в аустенит образуется двухфазная структура, состоящая из аустенита и феррита ($A+\Phi$).
- При дальнейшем нагреве в интервале температур $A_1 \dots A_3$ феррит постепенно растворяется в аустените: содержание углерода в аустените при этом уменьшается в соответствии с линией GS.
- В) при нагреве заэвтектоидной стали ($C > 0,8\%$) перлит превращается в аустенит, содержащий 0,8%С. В интервале температур $A_1 \dots A_{cm}$ протекает растворение избыточного цементита. Выше температуры A_{cm} будет только аустенит, содержание углерода в котором будет соответствовать его содержанию в стали.

Рост аустенитного зерна при нагреве

Изменение размера аустенитного зерна при нагреве эвтектоидной стали



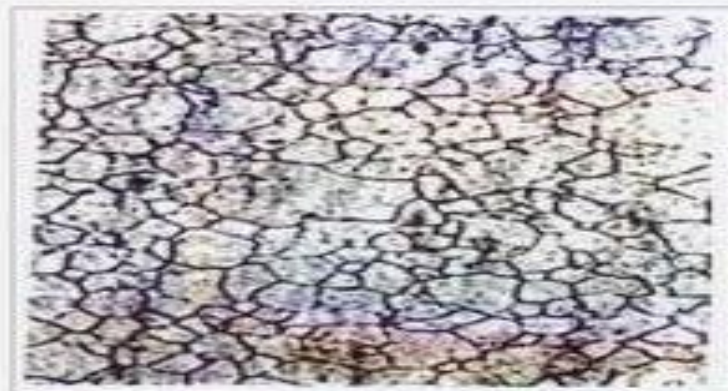
Наследственно мелкозернистые и крупнозернистые стали



Нагрев 900 °C

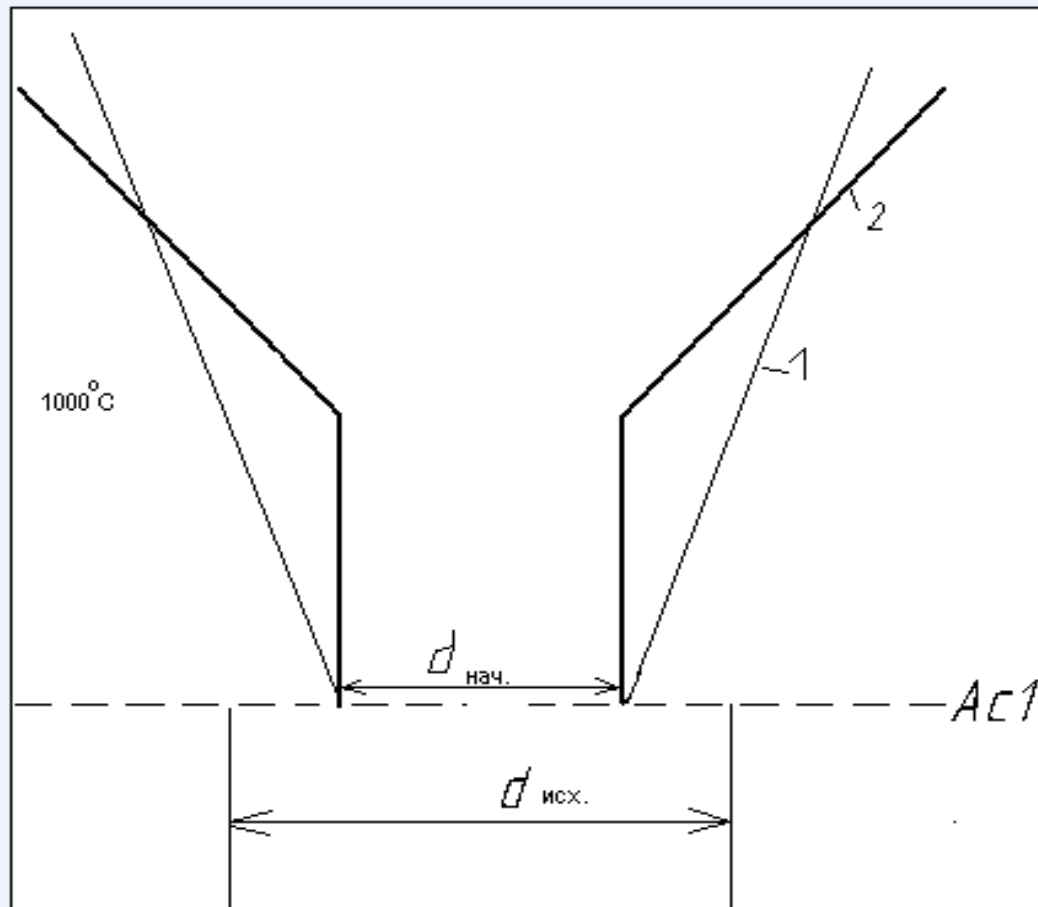


Сталь с малым содержанием Al



Сталь, раскисленная Al

Схема роста аустенитного зерна при нагреве наследственно-крупнозернистых (1) и наследственно-мелкозернистых (2) сталей.

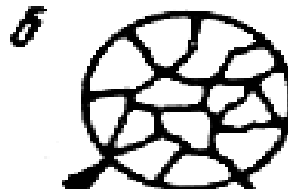
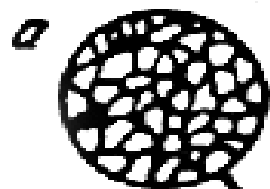


По склонности к росту зерна аустенита при нагреве различают :

- **наследственно-мелкозернистые** стали даже при значительном перегреве (1000С) сохраняют относительно мелкое зерно;
- **наследственно-крупнозернистые** стали начинают быстро увеличивать размер зерен даже при небольшом перегреве выше AC1 (AC3, Acм)

Схема изменения размера зерна в зависимости от температуры нагрева стали

Наследственно мелкозернистые стали Наследственно крупнозернистые стали



930°

Нагрев

Охлаждение

Охлаждение

A_{c1}
(A_{c3})

Начальное зерно

Крупные зерна

Мелкие зерна

Крупные зерна

П

П

П

Размер аустенитного зерна

Размер аустенитного зерна – важнейшая структурная характеристика нагретой стали.

От размера зерна аустенита зависит поведение стали в различных процессах термомеханической обработки и механические свойства изделия.

Влияние величины зерна на свойства стали. Выбор температуры нагрева

- Действительное зерно - зерно (размеры зерна), полученные при данной температуре. Влияние на прочностные, пластические свойства и твердость незначительно.
- Рост зерна значительно снижает ударную вязкость, работу распространения трещины, повышает порог хладноломкости.
- **Перегрев** – продолжительный нагрев стали, значительно превышающий A_{C3} или A_{CM} , приводящий к образованию крупнозернистой структуры. Излом – крупнокристаллический. Исправление – повторный нагрев выше A_{C1} или A_{C3} на 30-50°C
- **Пережог** - нагрев, выше температуры перегрева и сопровождающийся образованием по границам зерен окислов железа. Излом – камневидный. Дефект – неисправимый.
- Температура нагрева выбирается с учетом марки стали и ее критических точек ($A_{C1}+30-50^\circ\text{C}$; $A_{C3}+30-50^\circ\text{C}$)

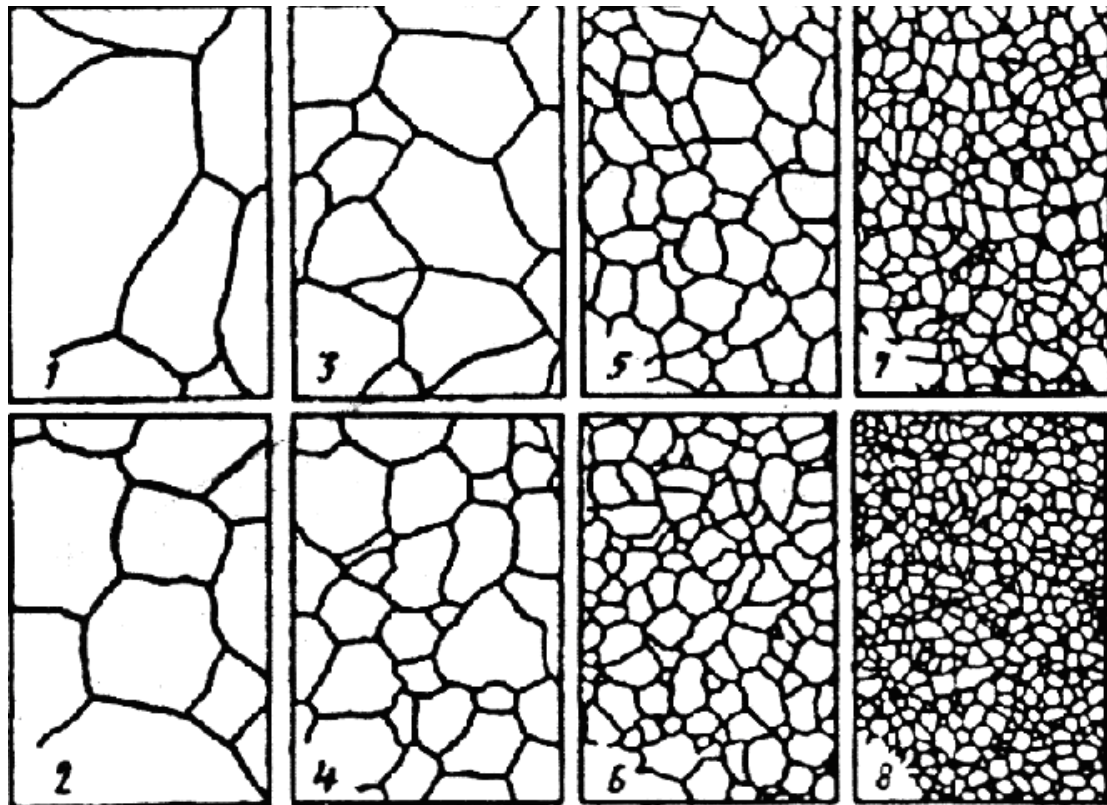
Склонность к росту зерна стали зависит:

-от ее металлургического качества, технологии ее производства и режима раскисления, так как они определяют наличие в стали разного количества мельчайших примесей карбидов, оксидов, сульфидов и нитридов, также затрудняющих рост зерна. К наследственно-мелкозернистым сталям относятся спокойные стали, дополнительно раскисленные алюминием.

-от содержания в ней легирующих элементов — почти все легирующие элементы (за исключением марганца) тормозят рост аустенитного зерна. Наиболее сильно тормозят рост аустенитного зерна V, Ti, Al и Zn. Хорошо тормозят рост зерна аустенита W, Mo и Cr. Основной причиной такого действия легирующих элементов считается образование труднорастворимых в аустените карбидов, которые являются барьерами для растущего зерна.

Размер действительного зерна — величина зерна при комнатной температуре, полученной в результате всех предшествующих обработок.

Величину зерна определяют по ГОСТ 5639–82 сравнением микроструктуры стали при увеличении в 100 раз с эталонными шкалами



Балл зерна прямо пропорционален числу зерен, помещающихся на 1 мм^2 шлифа, и обратно пропорционален среднему диаметру зерна.

Условно принято считать, что стали с зерном от 1 до 5 балла относятся к крупнозернистым сталям, а с более высоким баллом зерна (№ 6–15) — к мелкозернистым.

Эталонная шкала баллов для оценки размера зерна стали

Изотермический распад аустенита (превращение переохлажденного аустенита)

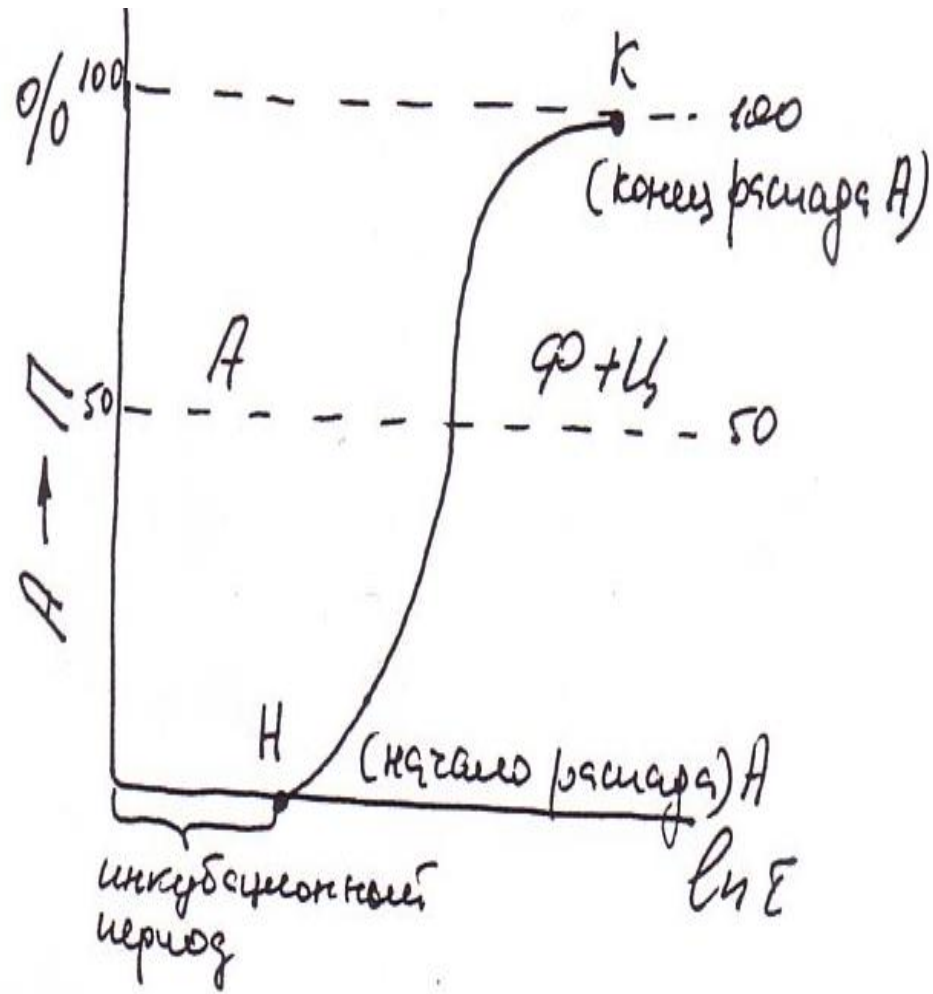


Диаграмма распада

- Для изучения изотермического превращения аустенита небольшие стальные образцы нагревают до температур, соответствующих существованию стабильного аустенита (выше 727°C), а затем быстро охлаждают (переохлаждают аустенит) до температур ниже A_1 , например, до 700, 600, 500, 400, 300°C и т.д. и выдерживают при этих температурах до полного распада аустенита.
- Кривая показывает количество распавшегося аустенита в зависимости от времени, прошедшего с начала распада.

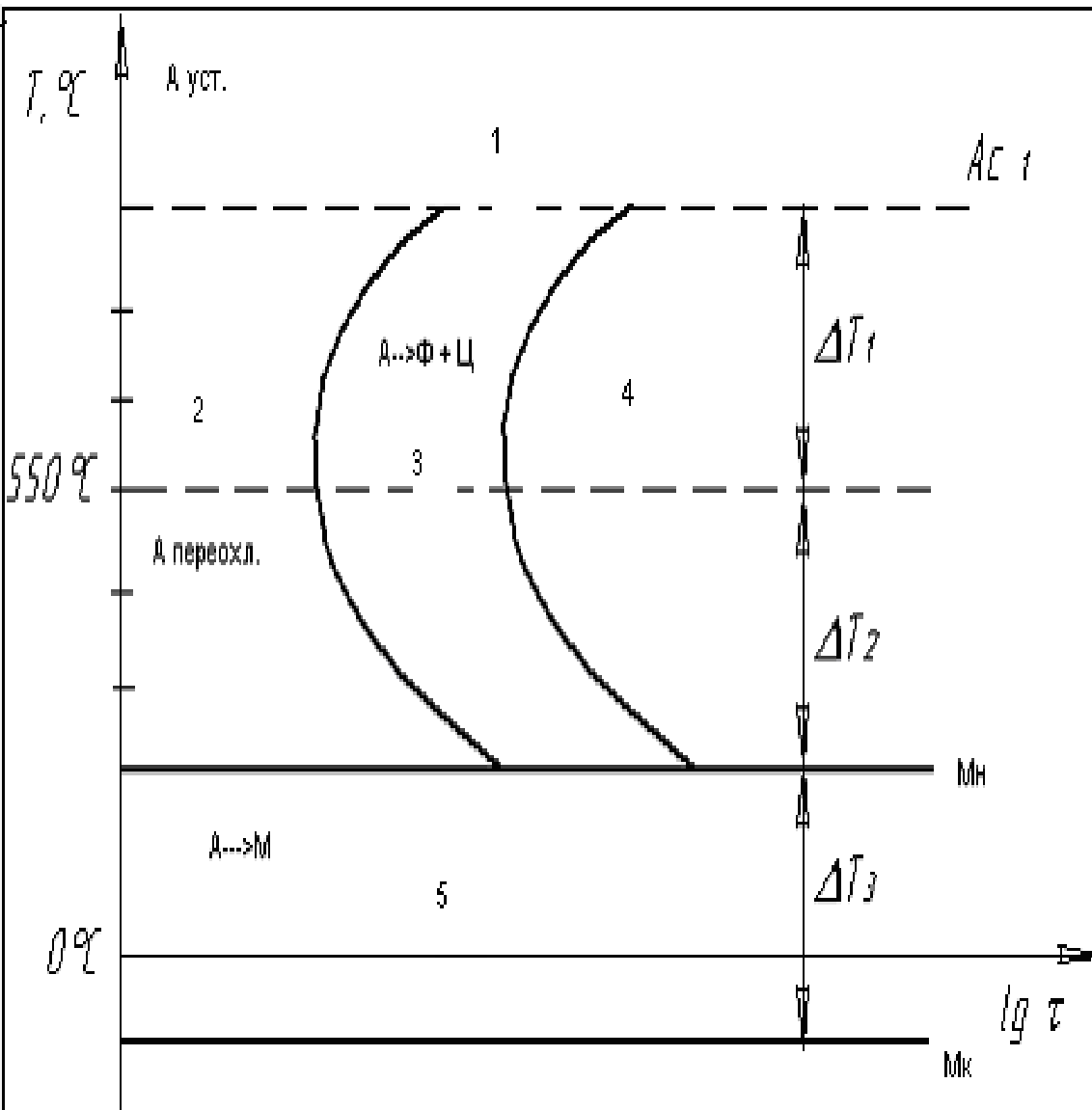
Диаграмма изотермического распада аустенита



В зависимости от степени переохлаждения аустенита различают три температурные области превращения:

- Область перлитного превращения,
- Область промежуточного (бейнитного) превращения и
- Область мартенситного превращения.

Температурные области распада аустенита эвтектоидной стали



На диаграмме можно выделить следующие области:

- 1) область существования устойчивого аустенита (для стали, содержащей 0,8 % С, выше АС1);
- 2) область переохлажденного аустенита;
- 3) область распада аустенита на феррито-цементитную смесь (область между С-образными кривыми);
- 4) область существования продуктов распада. ;
- 5) область мартенситного превращения (между Мн–Мк).

В зависимости от степени переохлаждения аустенита различают три температурные области превращения:

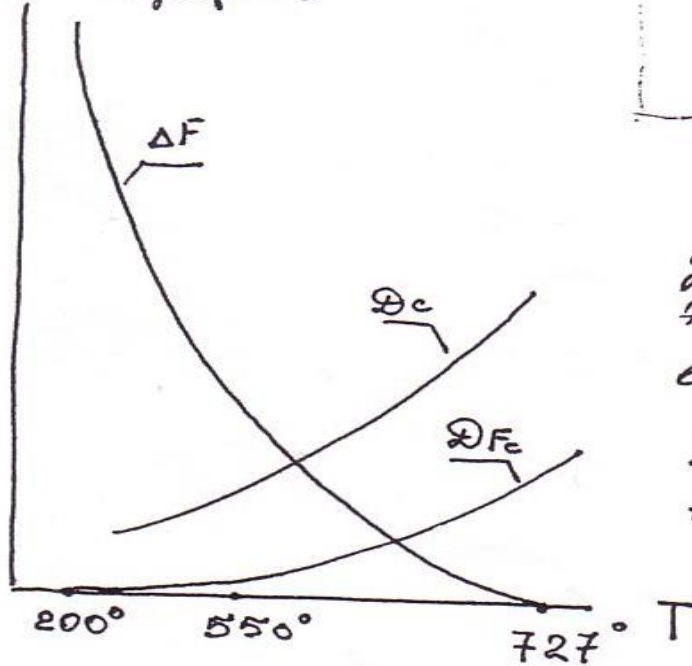
ΔT_1 - область перлитного (диффузионного) превращения (переохлаждение до 550 °C),

ΔT_2 - область промежуточного (бейнитного) превращения (переохлаждение для эвтектоидной стали в интервале от 550 до 240 °C),

ΔT_3 - область мартенситного (бездиффузионного) превращения (переохлаждение ниже Мн — для эвтектоидной стали ниже температуры 240 °C) .

Перлитное превращение. Движущая сила

ΔF - разность св. эн. F_{γ} и F_{α}
 D_C - ск. дифф. C
 D_{Fe} - ск. дифф. Fe



Перлитное превращение имеет кристаллизационный характер и диффузионный механизм



- Ведущей фазой является цементит, зародыши которого образуются на границах зерен аустенита. В результате роста зародышей цементита прилегающий к ним объем аустенита обедняется по углероду, снижает свою устойчивость и испытывает полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение.
- Кристаллы феррита зарождаются на границе с цементитом в зонах обедненных углеродом. Образование цементита и феррита происходит попеременно, так как каждая фаза, возникая, создает условия для образования другой.

Продукты превращения имеют пластинчатое строение. С увеличением степени переохлаждения получающаяся структура становится тоньше.

Смесь феррита и цементита по степени дисперсности подразделяется на три вида структур, которые называются перлит (П), сорбит (С) и троостит (Т).

Диффузионное (перлитное) превращение переохлажденного аустенита

Схема образования перлита в зерне аустенита

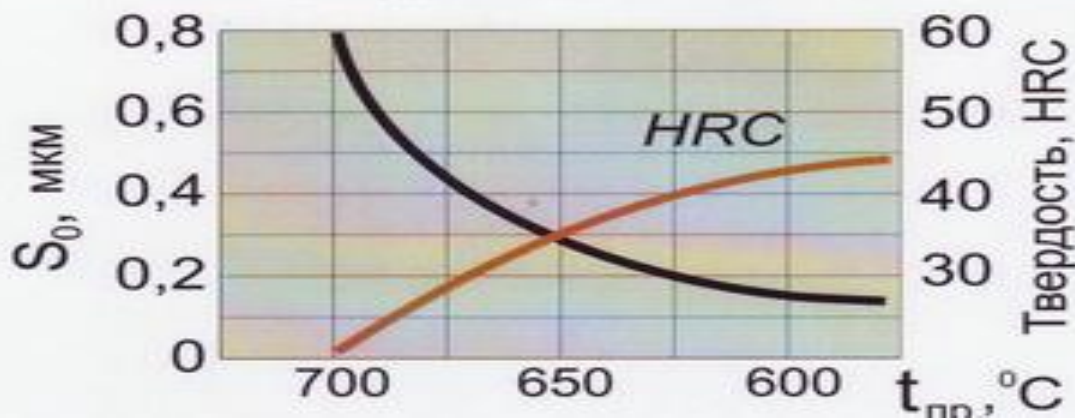


S_0 - межпластинчатое расстояние

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

Зависимость твердости и межпластинчатого расстояния от температуры перлитного превращения



Структуры, образующиеся при диффузионном превращении аустенита.

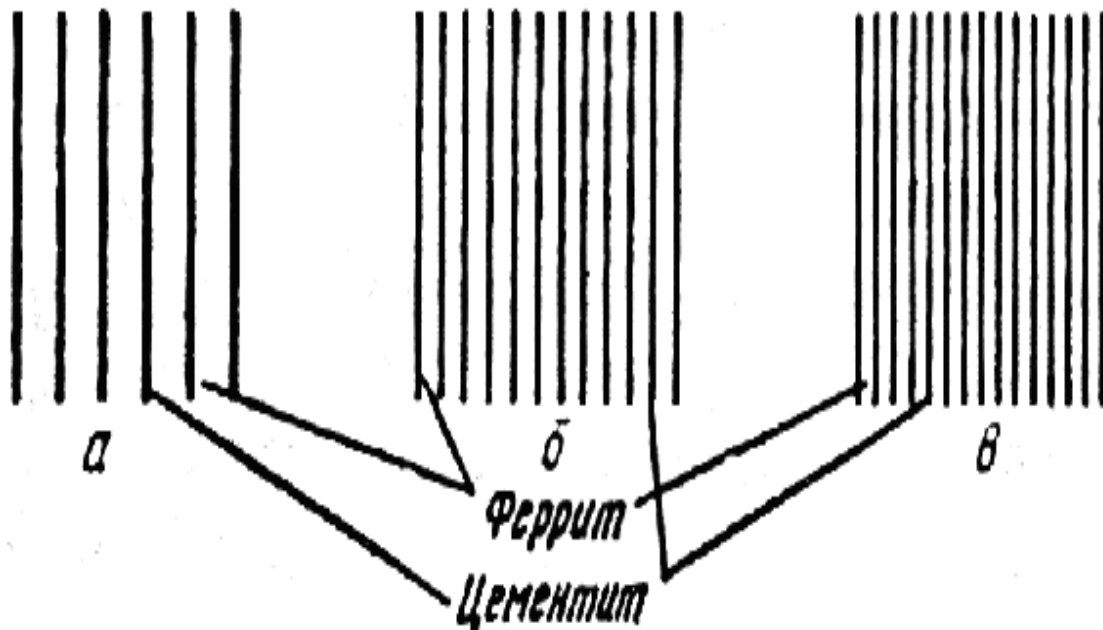
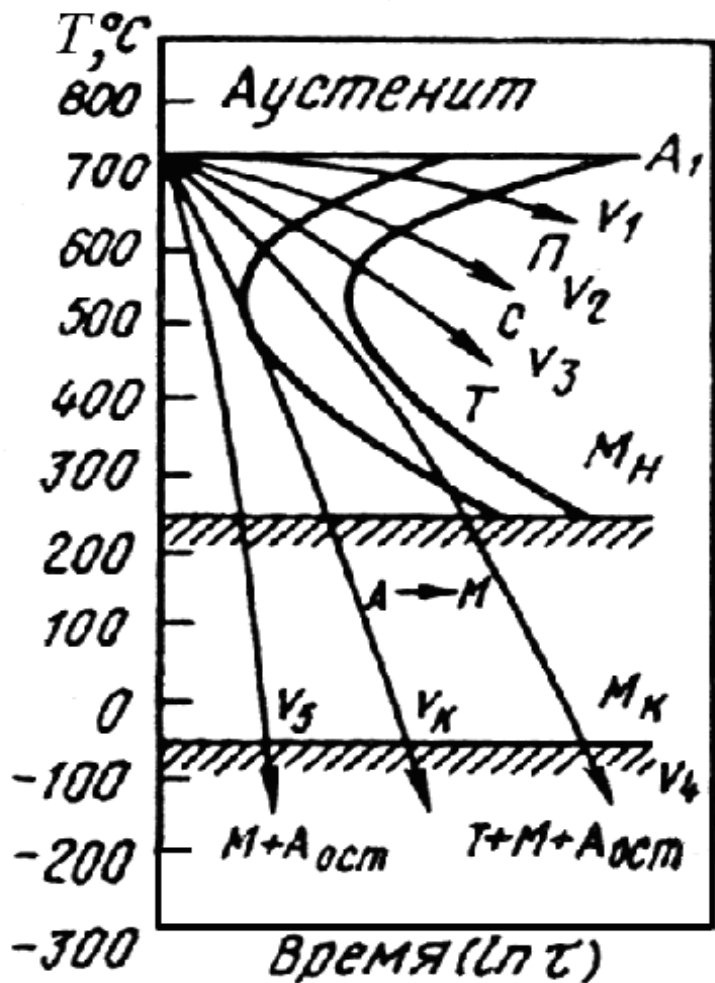
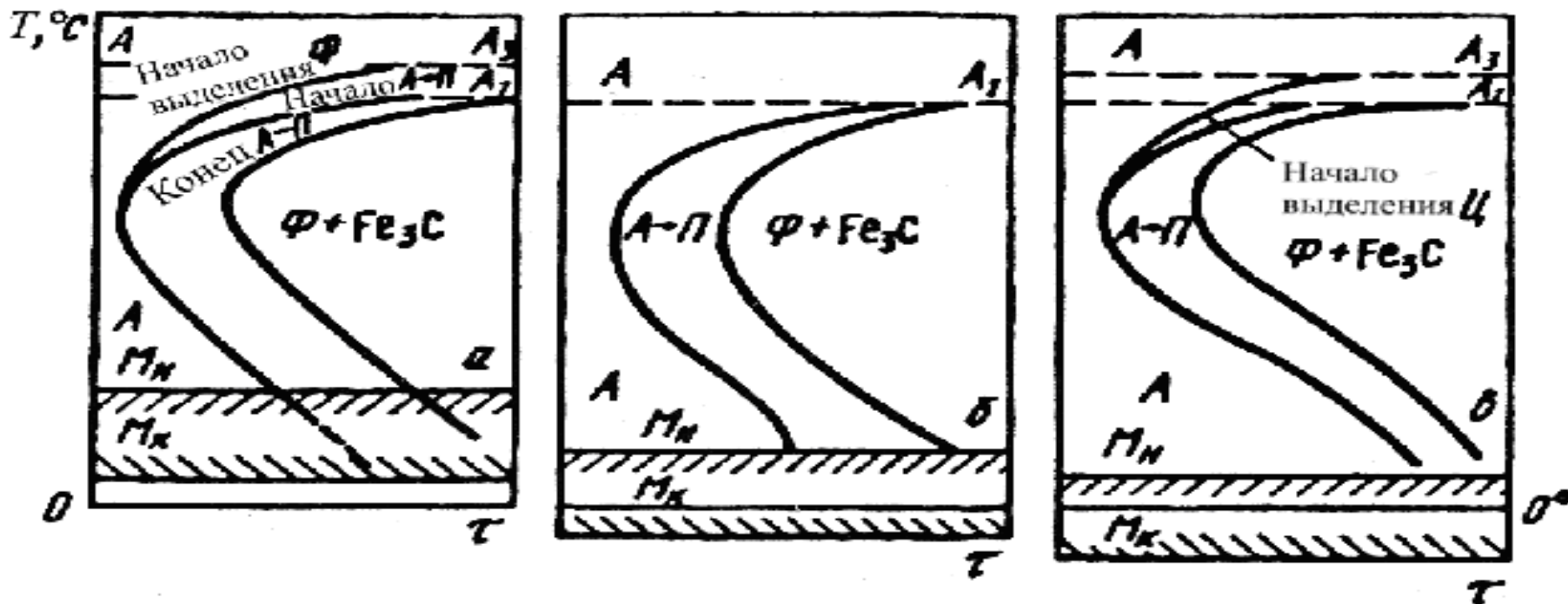


Схема феррито-цементитных структур:
а) перлит; б) сорбит; в) троостит

Диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита доэвтектоидной (а), эвтектоидной (б) и заэвтектоидной (в) сталей



а)

б)

в)

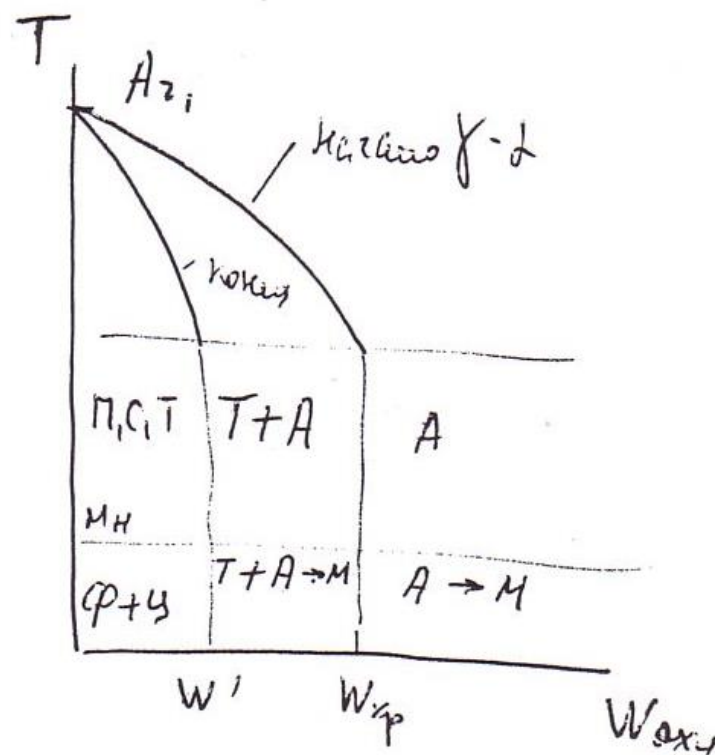
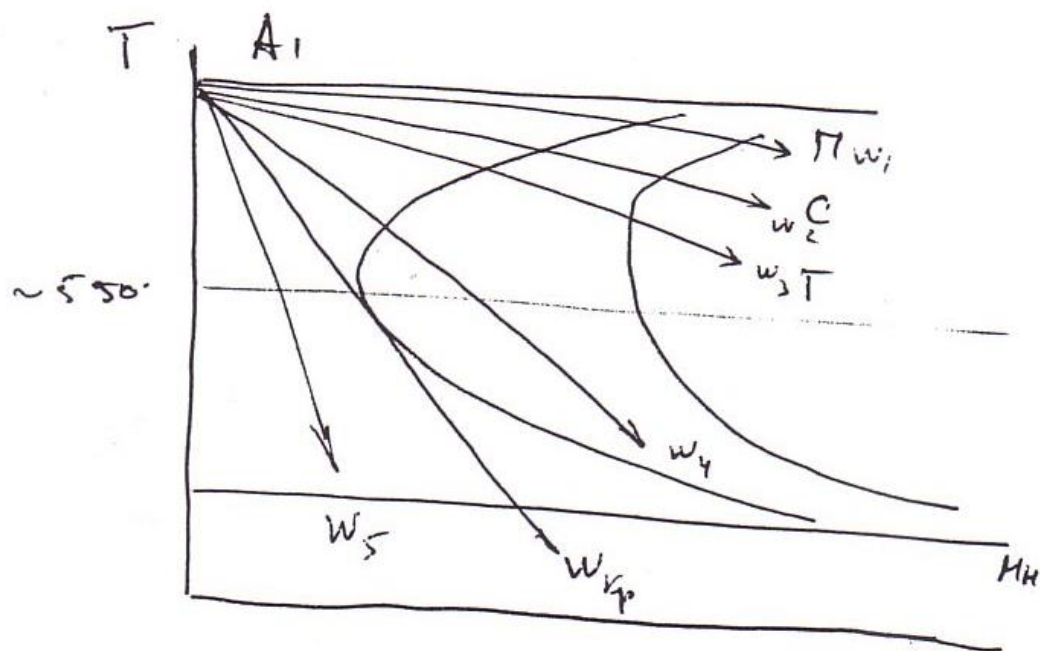
В этих сталях в отличие от эвтектоидной стали в верхнем интервале температур сначала выделяются избыточные фазы: феррит (в доэвтектоидной стали) или избыточный цементит (в заэвтектоидной стали).

Количестве выделившегося избыточного феррита (или цементита) уменьшается с понижением температуры и, при некоторой степени переохлаждения, распад начинается непосредственно с образования зародышей квазиэвтектоида - сорбита, троостита.

Преобразование аустенита при непрерывном охлаждении.

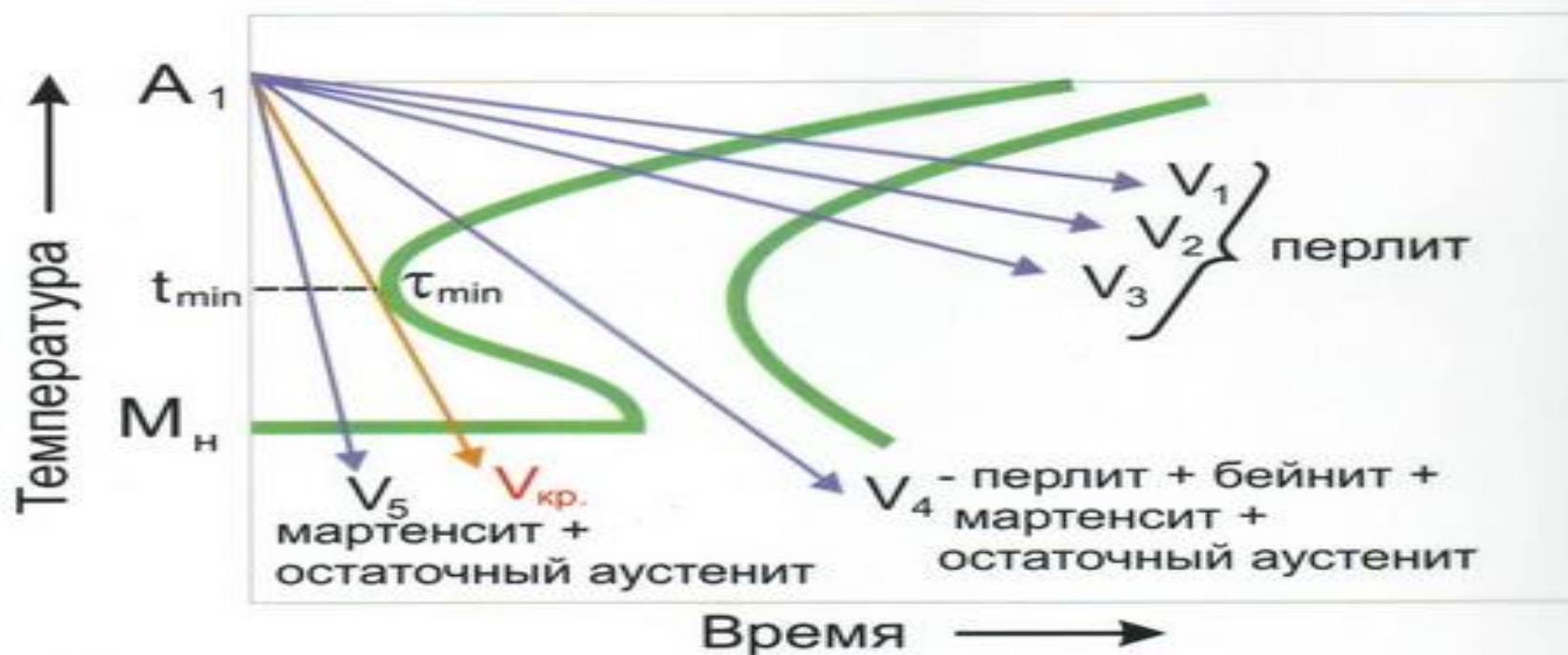
Критическая скорость закалки

Для точного определения температурного интервала фазовых превращения при непрерывном охлаждении и получающихся при этом структурных составляющих и твердости в координатах T - $\ln t$ строят термокинетическую диаграмму распада переохлажденного аустенита.



Критическая скорость закалки ($W_{кр}$) - минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до начала мартенситного превращения. $W_{кр}$ зависит от состава стали, величины и однородности зерна аустенита.

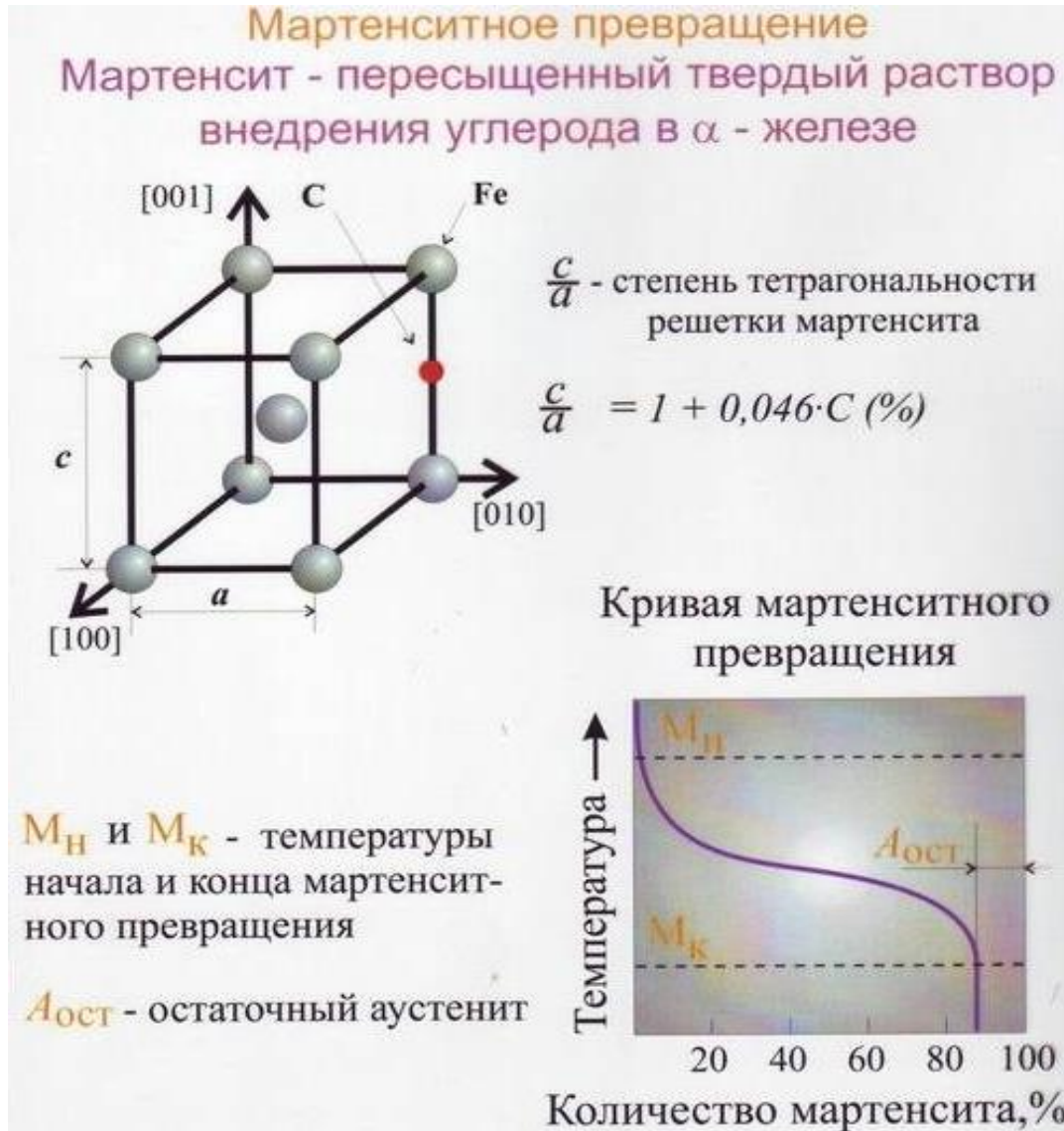
Превращение аустенита при непрерывном охлаждении



$V_{кр.}$ - *критическая скорость закалки* - минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит будет переохлажден до мартенситного интервала

$$V_{кр.} = \frac{A_1 - t_{min}}{1,5 \tau_{min}}$$

Мартенситное превращение (бездиффузионное, сдвиговое превращение аустенита)



Максимальное содержание углерода в мартенсите – 2,14%.

Решетка – объемноцентрированная тетрагональная (ОЦТ).

Увеличение содержания углерода ведет к увеличению степени тетрагональности (c/a).

Мартенситное превращение осуществляется путем сдвига и не сопровождается изменением состава твердого раствора.

$\gamma \rightarrow \alpha$, ГЦК \rightarrow ОЦК (ОЦТ)

Структура мартенсита

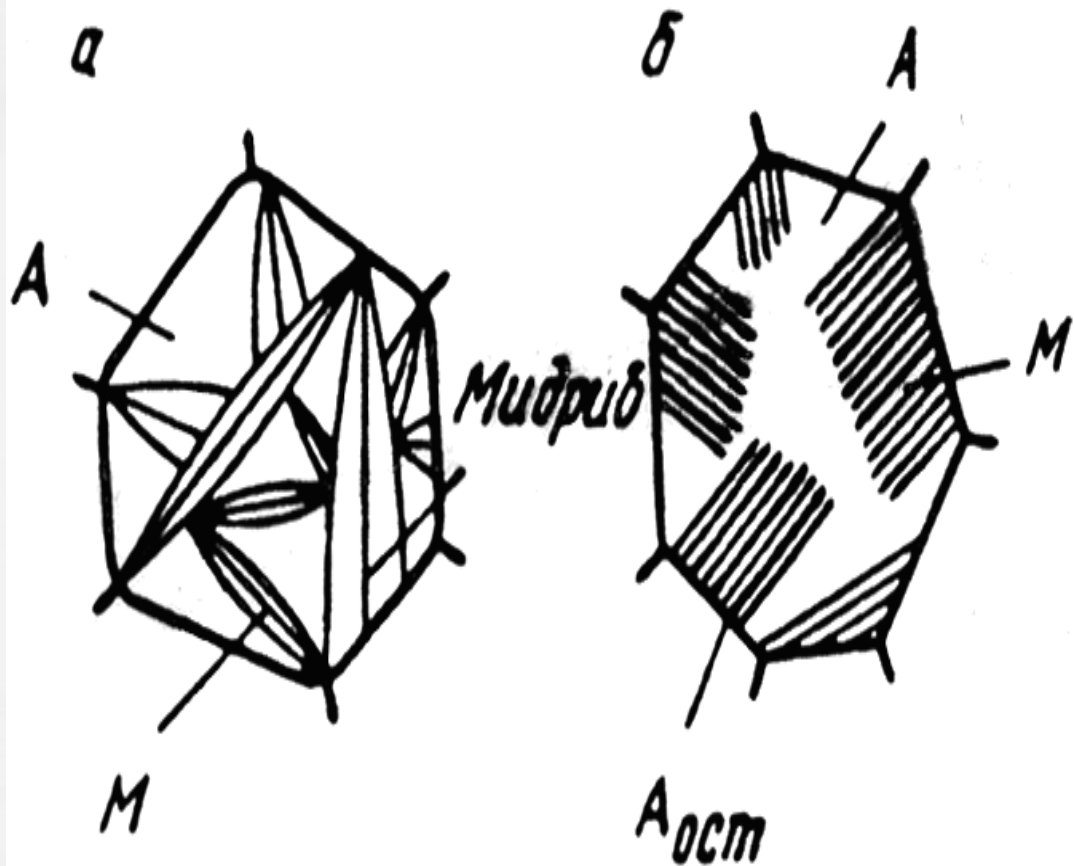


Пакетный (речный) мартенсит

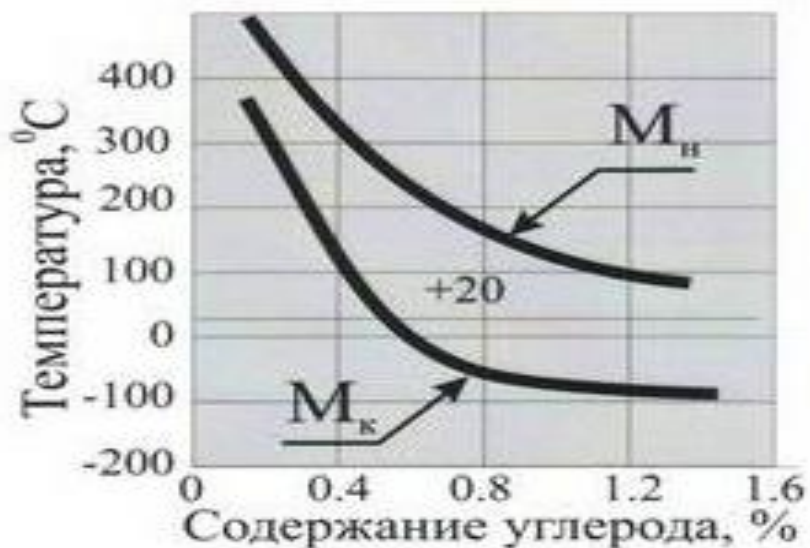


Пластинчатый (двойникованный) мартенсит

Схема образования пластинчатого (игольчатого) (а) и пакетного (речного) (б) мартенсита



Влияние углерода на положение критических точек

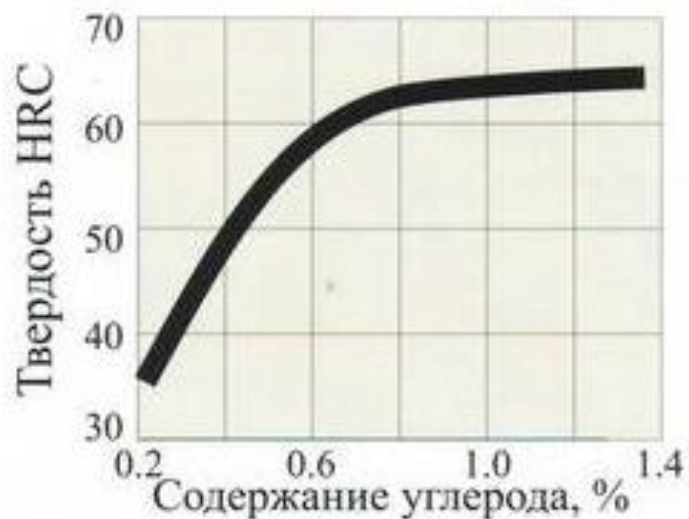


Положение точек температур начала (M_n) и конца (M_k) мартенситного превращения обусловлено химическим составом аустенита.

Увеличение содержания углерода смещает точки M_n и M_k в область более низких температур.

Все легирующие элементы (кроме Co и Al) снижают температуры M_n и M_k .

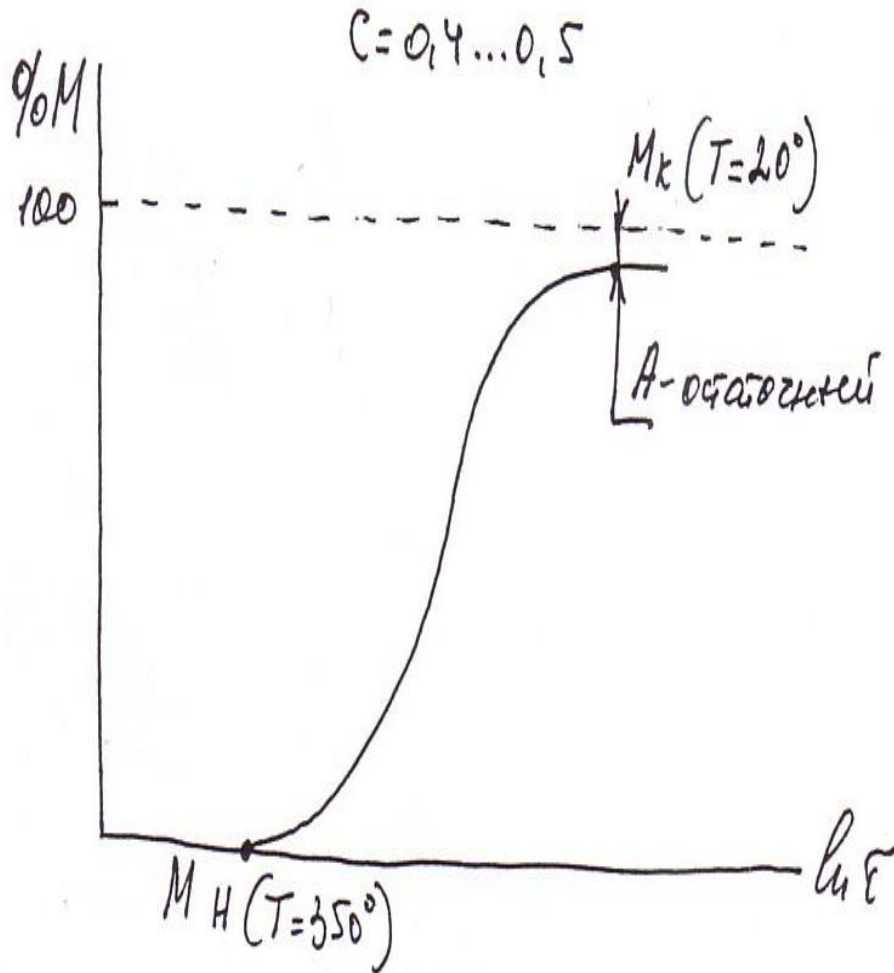
Зависимость твердости мартенсита от содержания углерода



Мартенсит отличается высокой твердостью и прочностью, а также и высокой хрупкостью

$HRC65$ ($HV960$) $\approx 6H$ феррита
 $\sigma_{0,2}$ ($C=0,015\%$) = 100 кгс/мм²
 $\sigma_{0,2}$ ($C=0,6...0,8\%$) = 270 кгс/мм²

Стабилизация аустенита



- В сталях, в которых точка M_f расположена ниже 20°C (при содержании углерода выше $0,4 \dots 0,5\%$) присутствует остаточный аустенит (Аост)
- **Стабилизация аустенита** - это повышение устойчивости аустенита при изотермической выдержке в интервале температур $M_s \dots M_f$, приводящая к меньшей степени распада мартенсита по сравнению с непрерывным охлаждением при каждой конкретной температуре.

Промежуточное (бейнитное) превращение

- В интервале $550^{\circ}\text{C} > T > M_n$ скорость диффузии углерода еще высока, а самодиффузия железа (и легирующих элементов) уже практически не возможна.
- Благодаря диффузии углерода происходит образование объемов с повышенным и пониженным содержанием углерода. В последних происходит мартенситное превращение, так как M_n возрастает с понижением содержания углерода.
- В объемах с повышенным содержанием углерода в процессе изотермической выдержки происходит образование цементита. Это ведет к обезуглероживанию соседних областей и образованию в них мартенсита.
- Ведущей фазой превращения является мартенсит. Структура бейнита – мартенсит и цементит.
- В интервале $550^{\circ}\text{C} > T > 450^{\circ}\text{C}$ (верхний бейнит) цементит выделяется из аустенита в виде довольно больших частиц и располагается по границам зерен. Это приводит к снижению пластичности, а иногда и прочности.
- В интервале $450^{\circ}\text{C} > T > M_n$ (нижний бейнит) углерод выделяется в виде дисперсных частиц, включенных в мартенсит. Это ведет к повышению прочности, твердости и пластичности.
- Бейнитное превращение часто не проходит до конца.

Промежуточное (бейнитное) превращение

Кинетика промежуточного превращения

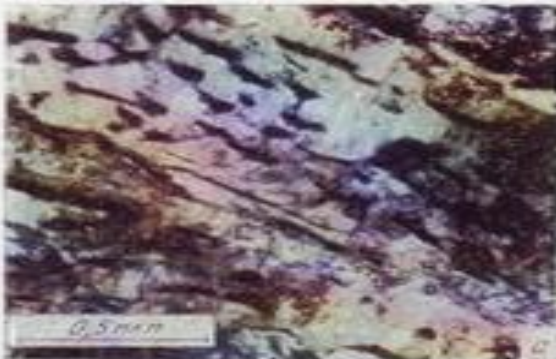


↑
Температура

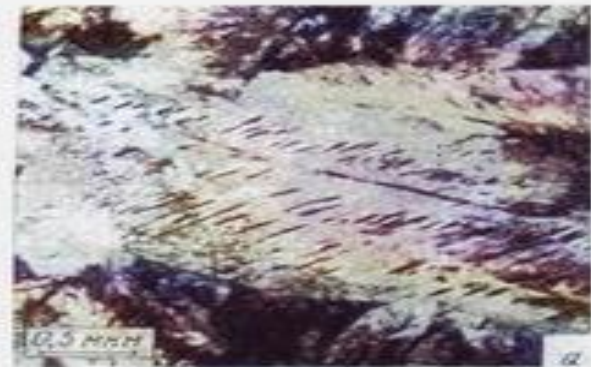


Бейнитная структура

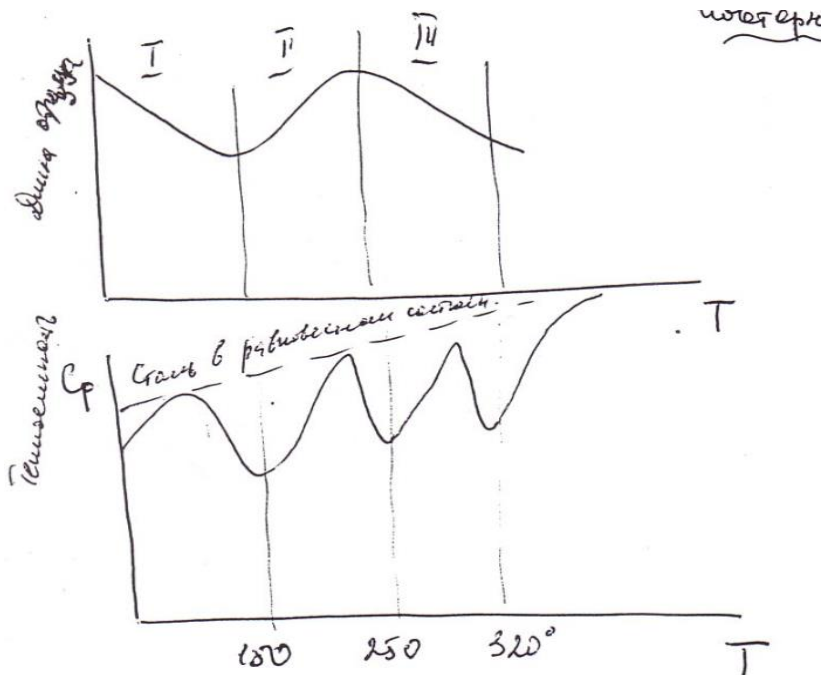
Верхний бейнит



Нижний бейнит



Преобразования при повторном нагреве мартенсита



- Мартенсит закалки (Мзак) и остаточный аустенит (Аост) являются неравновесными фазами, поэтому при повышении температуры они распадаются
- Скорость распада и образования новой фазы зависит от температуры нагрева.
- **При нагреве до $T \leq 150^\circ\text{C}$** увеличивается подвижность атомов углерода, которые устремляются к дислокациям и границам зерна
- В кристаллах мартенсита образуются мельчайшие частицы ϵ -карбида ($\approx \text{Fe}_2\text{C}$), которые имеют гексагональную решетку, когерентно связанную с решеткой мартенсита (в месте соединения обе решетки \approx равны по параметрам (одна чуть сожмется, другая чуть расширится).

- Поскольку на образование ϵ -карбида углерод расходуется из близлежащих участков мартенсита, а скорость диффузии еще мала, то состав пластинки по углероду не выравнивается, а частицы ϵ -карбида не растут, а лишь со временем в других местах образуются новые.
- Степень тетрагональности мартенсита уменьшается, так как растет упорядоченность расположения атомов. Это приводит к уменьшению объема, снижению твердости и повышению пластичности.
- Получившаяся структура - Мотп + А ост + ϵ -карбид

Превращения при повторном нагреве мартенсита

- При дальнейшем нагреве до $200...300^{\circ}\text{C}$ происходит распад Ауст по пути бейнитного превращения (бейнит = М + Ц). Из мартенсита продолжает выделяться ϵ -карбид и его частицы уже растут, так как увеличивается скорость диффузии углерода и состав мартенсита успевает выравниваться.
- Структура - Мотп + ϵ -карбид. Содержание углерода в Мотп зависит от исходного состава стали и продолжительности нагрева. При достижении $T=350...400^{\circ}\text{C}$ происходит карбидное превращение. Оно состоит из нескольких этапов.
- Завершение выделения углерода из мартенсита. Мартенсит отпуска переходит в феррит (Мотп \rightarrow Ф).
- Нарушение когерентности решетки Ф и карбида
- Карбидное превращение: ϵ -карбид \rightarrow Fe_3C (цементит). Этапы 2 и 3 проходят одновременно
- Полигонизация феррита, релаксация (снижение) микронапряжений, возникших при мартенситном превращении
- Структура - троостит отпуска (Тотп)
- Мотп \rightarrow Ф, ϵ -карбид \rightarrow Fe_3C (Ц), $\text{Ф} + \text{Ц} = \text{Тотп}$

- При нагреве до $T=500...600^{\circ}\text{C}$ происходит коагуляция и сфероидизация карбидов. Размер частиц увеличивается от 3-х до 10-ти раз за счет растворения мелких и роста крупных частиц.
- Структура – сорбит отпуска (Сотп) или зернистый перлит (при нагреве ближе к A_1). Цементит в них входит в виде округлых зерен, а не пластин, как это было при перлитном превращении переохлажденного аустенита.

Преобразования при отпуске (кратко)

- **Нагрев до 200С:** начало диффузии углерода из пересыщенной решетки мартенсита, образование по границам мартенситных кристаллов ϵ – карбидов (Fe_3C). Снижение степени тетрагональности решетки мартенсита и остаточных напряжений. Такая структура называется **мартенситом отпуска**.
- **Нагрев до 350С:** ускорение диффузии углерода, ϵ – карбид присоединяет недостающий углерод и превращается в цементит (Fe_3C). Одновременно происходит превращение аустенита остаточного в мартенсит отпуска. Начало распада мартенсита отпуска на феррито-цементитную смесь.
- **Нагрев до 450С:** сфероидизация цементита и завершение диффузии избыточного углерода. Формируется структура, состоящая из феррита и мелкодисперсного цементита, называемая **трооститом отпуска**.
- **Нагрев выше 450С (до 650С):** Сфероидизация и коагуляция цементных включений. Движущая сила этих процессов - уменьшение свободной энергии системы за счет уменьшения поверхностной энергии. Образование структуры **сорбит отпуска**.

Технология термической обработки



- Термическая обработка – это процесс обработки изделий из металлов и сплавов путем теплового воздействия для целенаправленного изменения структуры и свойств (эксплуатационных, технологических).
- Любая термообработка состоит из трех стадий:
 - 1) нагрева изделия до заданной температуры;
 - 2) выдержки при этой температуре для выравнивания химического состава металла;
 - 3) охлаждения с той или иной скоростью.

- Время нагрева и выдержки можно приблизительно определить из расчета: 1 минута на мм диаметра (сечения) детали.
- Температура нагрева, как правило, до аустенитного состояния ($T_{кр} + 30...50^{\circ}\text{C}$).
- В зависимости от сочетания нагрева и охлаждения различают 1) отжиг (охлаждение с печью); 2) нормализация (охлаждение в масле, воде); 3) отпуск (нагрев после закалки).
- В основе термической обработки стали и чугуна лежат структурные превращения, вызванные наличием у железа двух кристаллических форм: альфа и гамма.

Классификация видов термической обработки

Термическая обработка

Собственно термическая обработка

Отжиг I рода

Отжиг II рода

Закалка без полиморфного превращения

Закалка с полиморфным превращением

Старение

Отпуск

Химико-термическая обработка

Цементация

Азотирование

Нитроцементация

Борирование

Диффузионная металлизация

Термомеханическая обработка

ВТМО

НТМО

Отжиг. Отжиг первого и второго рода

Отжиг первого рода

При таком отжиге не используются фазовые превращения

- **Гомогенизационный (диффузионный) отжиг.**
Цель - уменьшение дендритной (внутрикристаллической) ликвации. Температура нагрева 1100-1200°C

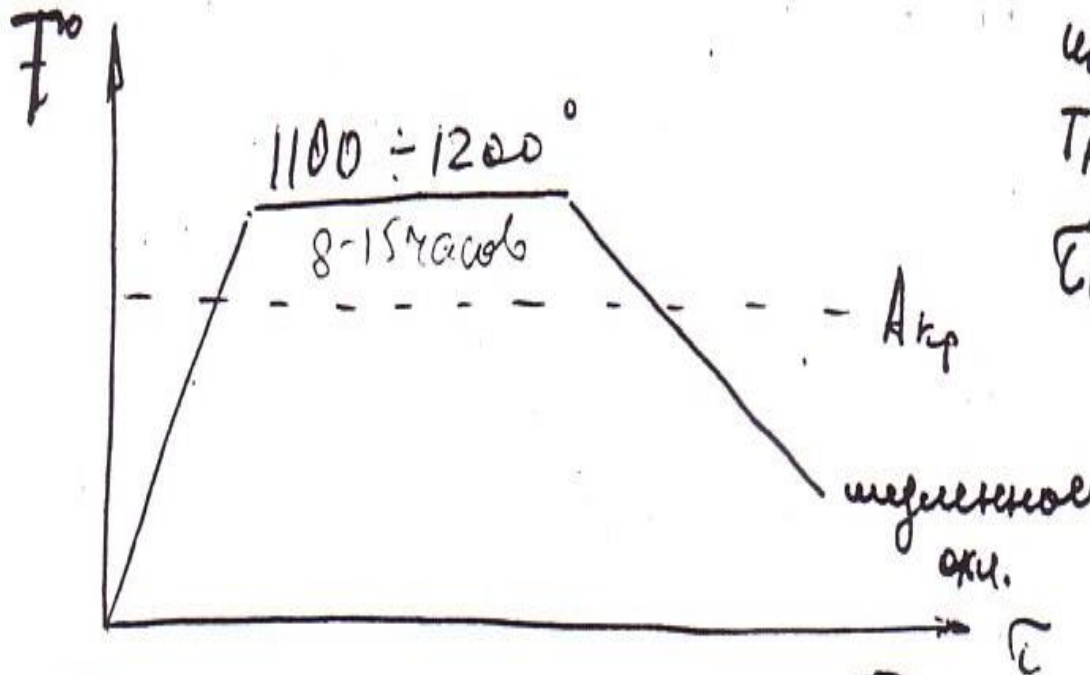
- **Рекристаллизационный отжиг**
Цель - устранение наклепа, созданного холодной пластической деформацией. Нагрев производится выше температурного порога рекристаллизации (чаще всего до 600-720°C)

- **Отжиг для уменьшения внутренних напряжений**
Нагрев до 450 - 650° С.

Отжиг I рода

- **Отжиг I рода** – совокупность термических обработок, при которых процессы, приводящие сплав в состояние близкое к равновесному проходят независимо от протекания фазовых превращений.
- Цель - устранение отклонений от равновесного состояния (химическая или физическая неоднородность), возникших в металле при предшествующих технологических операциях (литье, обработка давлением и т.д.)
- Отжиг 1-го рода - процесс самопроизвольный и необратимый, так как приводит систему в состояние с минимумом свободной энергии. Происходит независимо от наличия или отсутствия фазовых превращений. Нагрев необходим лишь для ускорения процесса.
- Основные параметры - это температура нагрева и время выдержки. Скорость нагрева и охлаждения имеют подчиненное значение.
- К отжигу 1-го рода относятся: диффузионный (гомогенизация), рекристаллизационный и отжиг для снятия остаточных напряжений.

Диффузионный отжиг (гомогенизация),



Гомогенизация (диффузионный отжиг) предназначен для устранения дендритной ликвации (химической неоднородности) в слитках, снижающей пластические свойства, особенно у легированных сталей.

Режим диффузионного отжига:

- Температура нагрева $1000 \dots 1100^\circ\text{C}$, выбирается из соотношения $T_n = (0,9 \dots 0,95)T_{пл}$, иногда $T_n = (0,8 \dots 0,9)T_{пл}$.
- Время выдержки - $8 \dots 20$ часов.
- Медленное охлаждение.
- Общая продолжительность процесса достигает $50 \dots 100$ часов

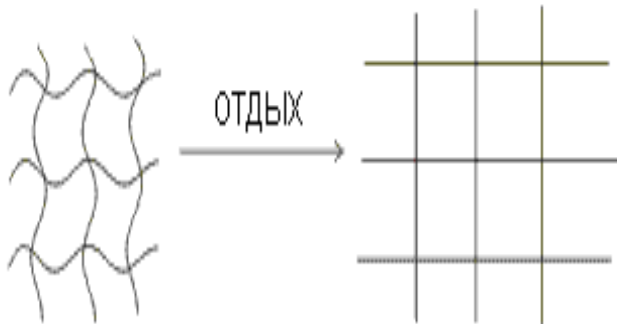


После отжига химический состав выравнивается, зерно увеличивается. Недостаток – крупное зерно, для измельчения которого проводится полный отжиг или нормализация.

Рекристаллизационный отжиг

Рекристаллизационный отжиг – нагрев холоднодеформированного металла выше температуры рекристаллизации.

- $T_{\text{рекр}} = a \cdot T_{\text{пл}}$, для низкоуглеродистой стали $a=0,4$ и $T_{\text{рекр}} = 650 \dots 700^\circ\text{C}$
- **Цель** – снятие наклепа. Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклепа и возвращения пластичности сплаву после операций холодного деформирования.
- Нагрев осуществляется на $80\text{-}120^\circ\text{C}$ выше температуры рекристаллизации сплава.
- Состояние наклепанного материала **термодинамически неустойчиво** (остаточные напряжения, повышенная плотность несовершенств строения).

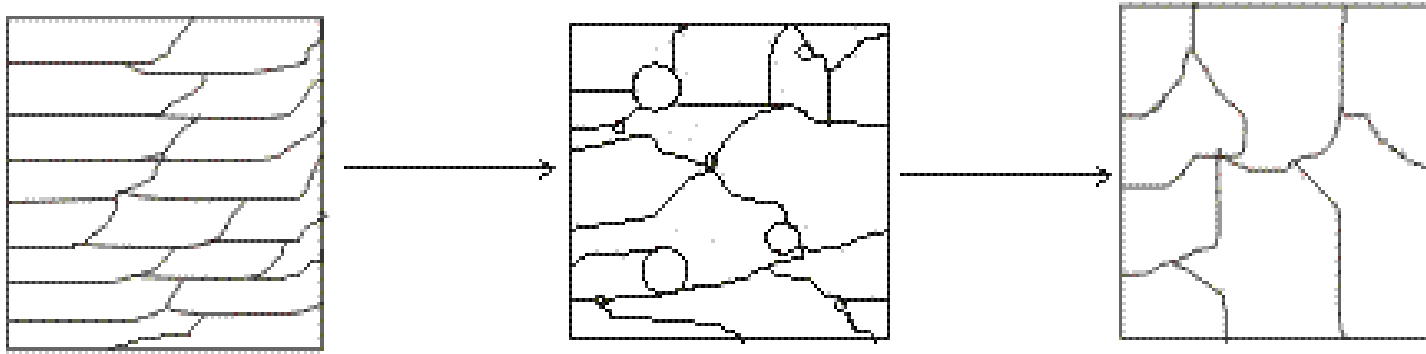


Рекристаллизационный отжиг протекает в несколько стадий:

А) Отдых ($T_{\text{н}}=0,2T_{\text{пл}}$) сопровождается уменьшением количества точечных дефектов (вакансий), снятием остаточных напряжений и искажений, перераспределением и частичной аннигиляцией дислокаций. Напряжения III рода снимаются почти полностью (до 90%). Твёрдость и прочность уменьшаются на 10 - 15%, а пластичность повышается.

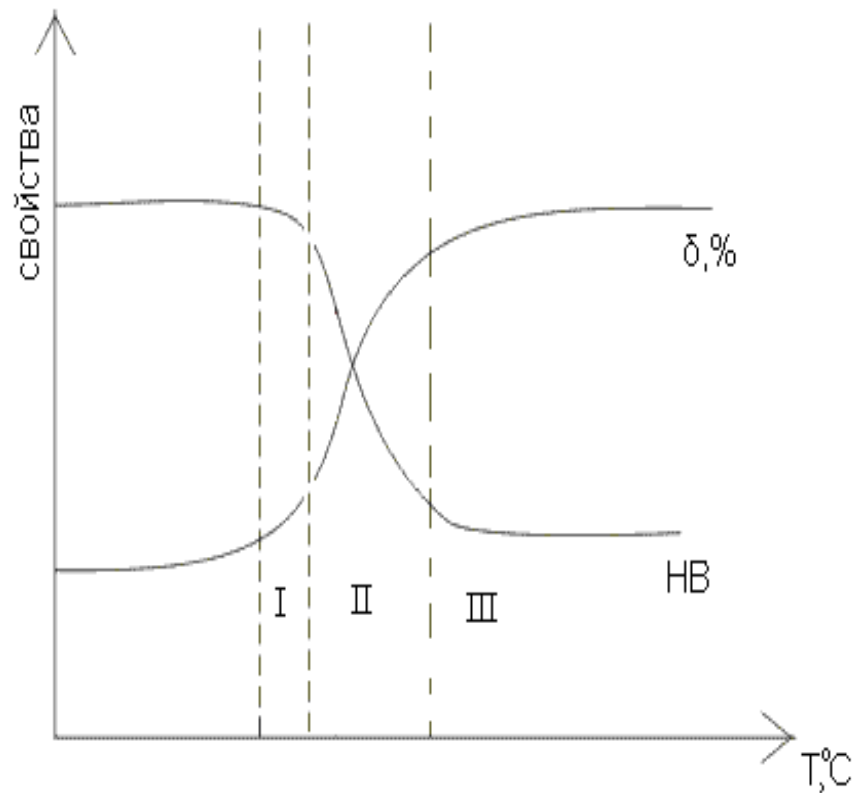
Б) Полигонизация ($T=0,3 T_{\text{пл}}$). Дислокации одного знака в результате самодиффузии выстраиваются в дислокационные стенки, которые разбивают зерно на субзерна (полигоны), свободные от дислокаций.

Рекристаллизационный отжиг.

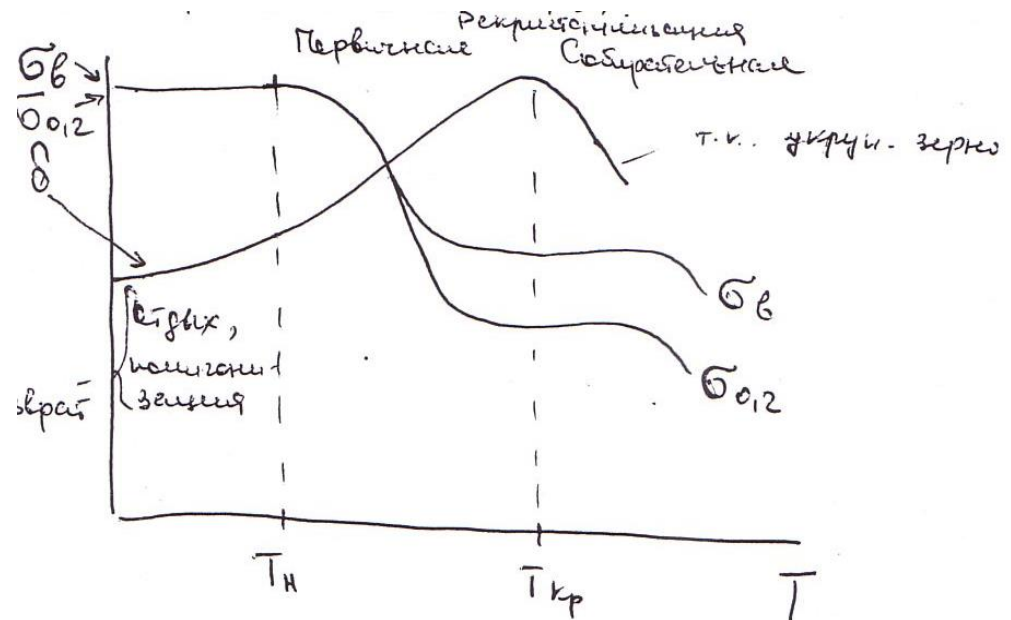


- Полигонизация - это процесс формирования субзёрен, разделённых малоугловыми границами. При этом механические свойства изменяются мало, а структурные изменения в оптический микроскоп не просматриваются.
- **В) Первичная рекристаллизация** ($T=0,4 T_{пл}$) - Процесс первичной рекристаллизации заключается в зарождении и росте в местах наибольшей концентрации дефектов новых равноосных зёрен с минимальной плотностью дефектов ρ_c более совершенной кристаллической решеткой). Процесс сопровождается полным замещением объёма металла на равновесную структуру.
- Движущая сила первичной рекристаллизации - разница свободных энергий деформированного металла и металла в равновесном состоянии.
- Число новых зерен увеличивается с ростом температуры. Результат – равноосная и равновесная мелкозернистая структура
- При первичной рекристаллизации: 1) Снижается плотность дислокаций; 2) снижаются искажения

Рекристаллизационный отжиг



- I – возврат;
- II – первичная рекристаллизация;
- III – собирательная рекристаллизация.



Если после прохождения первичной рекристаллизации продолжить выдержку материала или повысить температуру, то начнётся самопроизвольный процесс укрупнения зёрен, который называется собирательной рекристаллизацией

Движущей силой собирательной рекристаллизации является выигрыш в энергии за счёт уменьшения суммарной поверхности границ зёрен.

Рекристаллизационный отжиг

Величина зерна после рекристаллизационного отжига зависит от:

- температуры нагрева,
- продолжительности нагрева,
- размера исходного зерна,
- степени холодной деформации и
- химического состава сплава.

Отжиг для снятия остаточных напряжений

- Может быть проведен после любой технологической операции (литье, сварка, обработка давлением, обработка резанием, правка). Снятие напряжений происходит за счет расхода энергии на остаточную пластическую деформацию. Температура нагрева 350-600оС. Время выдержки устанавливается опытным путем.
- Предназначен для изделий, в которых возникают остаточные напряжения в результате предшествующих обработок (после сварки, обработки резаньем, правки).

Отжиг II рода

Отжиг II рода- совокупность термических обработок, при которых процессы, приводящие сплав в состояние близкое к равновесному обеспечиваются прямым и обратным фазовыми превращениями ($\alpha \leftrightarrow \gamma$). К отжигу 2-го рода относятся:

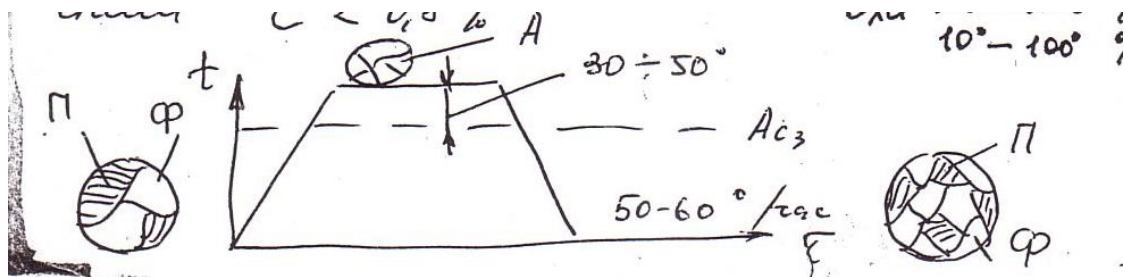
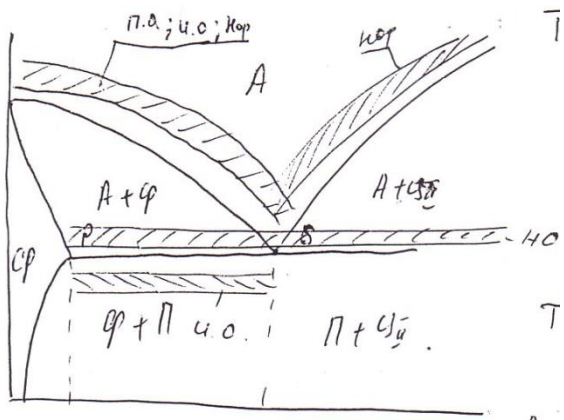
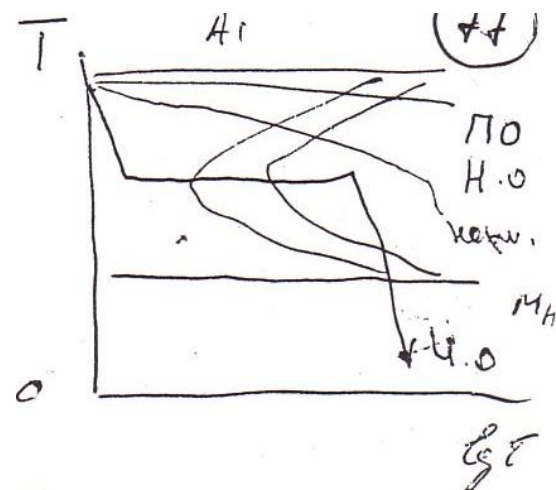
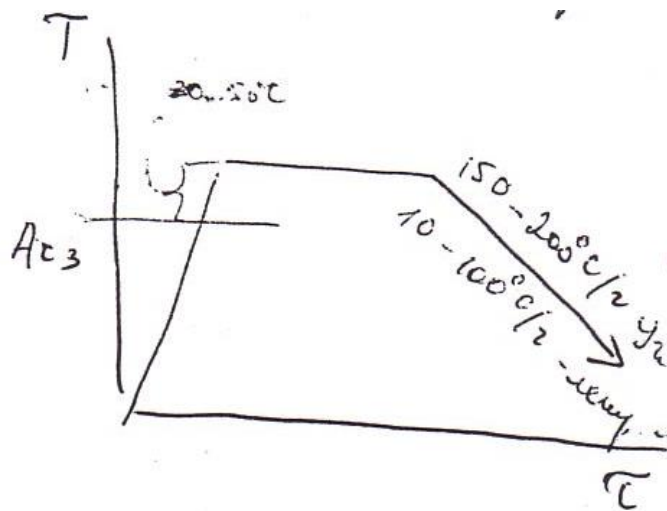
- Используется: Для установления равновесного состояния, для измельчения зерна, устранения последствий перегрева, улучшения обрабатываемости, получения высокой пластичности, исправления дефектных структур.
- Устраняется перегрев путем фазовой перекристаллизации, измельчается зерно, достигаются высокие пластические свойства и хорошая обрабатываемость резанием, уменьшаются остаточные напряжения.
- Является подготовительной (предварительной) термической обработкой, но может быть и окончательной, например, для крупных отливок.
- К отжигу второго рода относят: 1) полный отжиг; 2) изотермический отжиг; 3) неполный отжиг; 4) отжиг на зернистый перлит; 5) нормализация

Полный отжиг

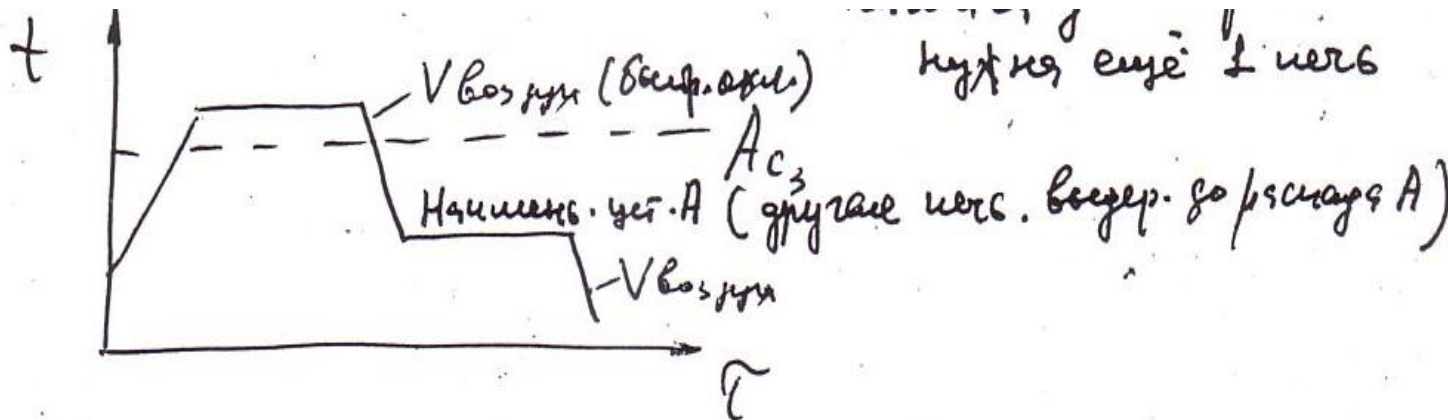
Полный (перекристаллизационный) отжиг - термическая обработка, при которой проводится нагрев стали на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше линии A_{c3} , выдержка для полного прогрева и завершения фазовых превращений, охлаждение со скоростью $150...200^{\circ}\text{C}/\text{час}$ для углеродистых сталей и $10...100^{\circ}\text{C}/\text{час}$ - для легированных сталей.

Полный отжиг обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию, за счет которой устраняются дефекты, связанные с формой, размером зерен и неоднородностью их распределения.

Полному отжигу подвергают преимущественно доэвтектоидную сталь.



Изотермический отжиг



Изотермический отжиг- разновидность полного отжига, при котором распад аустенита происходит при постоянной температуре (600-680°C), что способствует получению однородной структуры и сокращает длительность процесса.

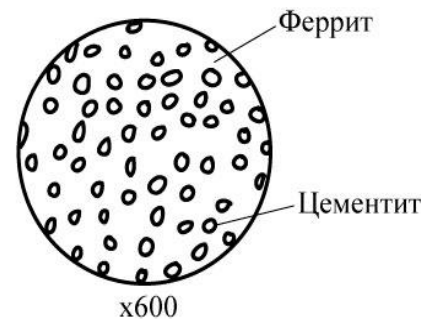
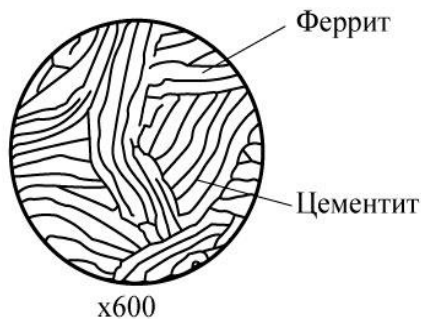
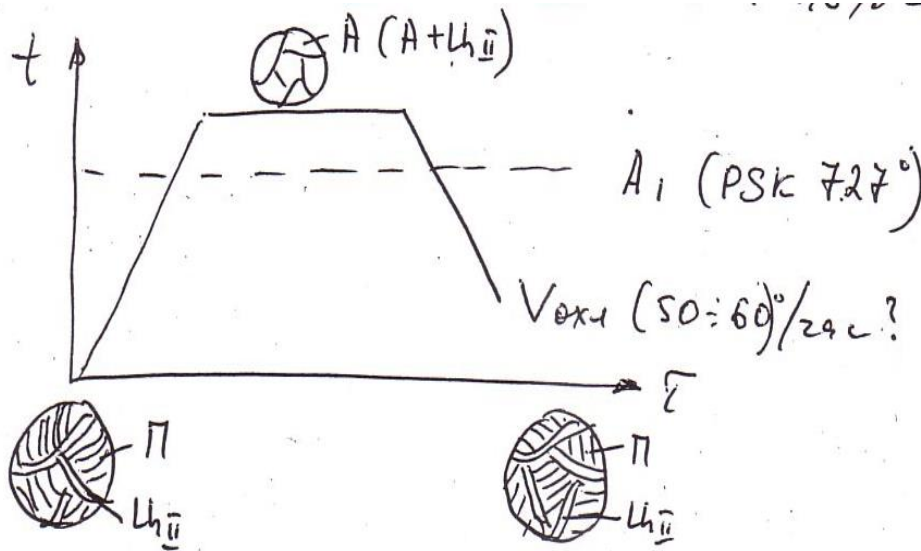
Режим изотермического отжига: нагрев выше A_{c3} на 30...50°C, ускоренное охлаждение до температуры A_{c1} - 50...100°C (перенос в другую печь), выдержка при этой температуре до полного распада аустенита и охлаждение на воздухе.

Изотермическому отжигу подвергают легированные стали, что позволяет сократить длительность отжига, но требует дополнительного оборудования.

Цель - улучшение обрабатываемости резанием и устранение остаточных напряжений перед последующей закалкой.

Неполный отжиг

Неполный отжиг- термическая обработка, при которой проводится нагрев стали на 30-50°C выше A_{c1} , выдержка и медленное охлаждение (с печью), предназначенная для улучшения обрабатываемости сталей резанием и сфероидизации цементита.



- Подвергают, главным образом, заэвтектоидную сталь.
- Режим: нагрев выше A_{c1} на 30...50°C, выдержка для полного прогрева и завершения фазовых превращений, охлаждение по режиму полного отжига
- Цель: для доэвтектоидной стали - улучшение обрабатываемости резанием, для заэвтектоидной стали получение зернистого перлита, которые по сравнению с пластинчатым перлитом имеет более высокие пластические свойства.
- В результате отжига снижается сопротивление движению дислокаций, увеличиваются пластические свойства.
- Для получения зернистого перлита охлаждение проводят со скоростью 30...50°C/час, чтобы распад аустенита произошел до температуры 650°C. Иногда при этой температуре делают изотермическую выдержку 1-3 часа и затем охлаждают на воздухе.

Нормализация

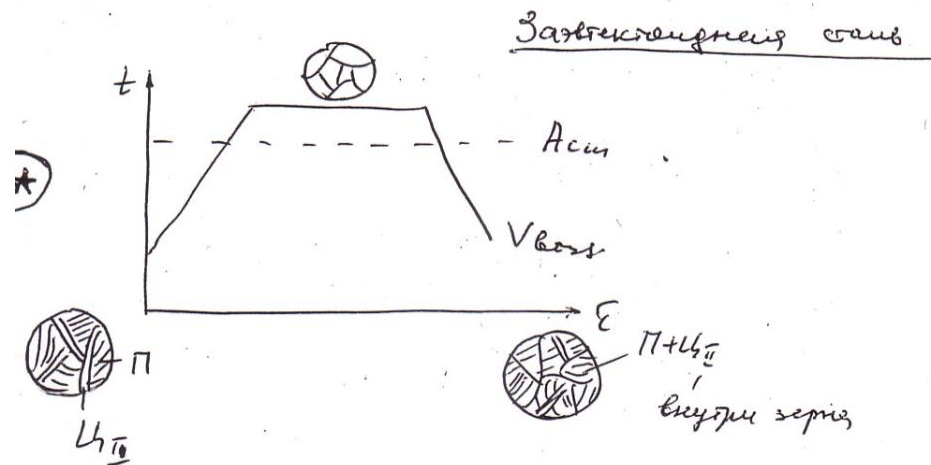
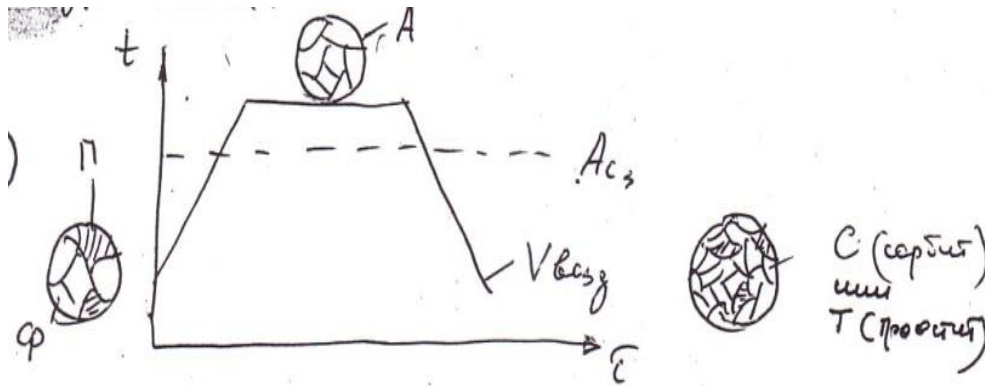
Нормализация - разновидность полного отжига, при котором охлаждение проводится на спокойном воздухе, что способствует измельчению структуры.

Режим: нагрев на $30 \dots 50^\circ\text{C}$ выше A_{c3} или A_{cm} , выдержка и охлаждение на спокойном воздухе.

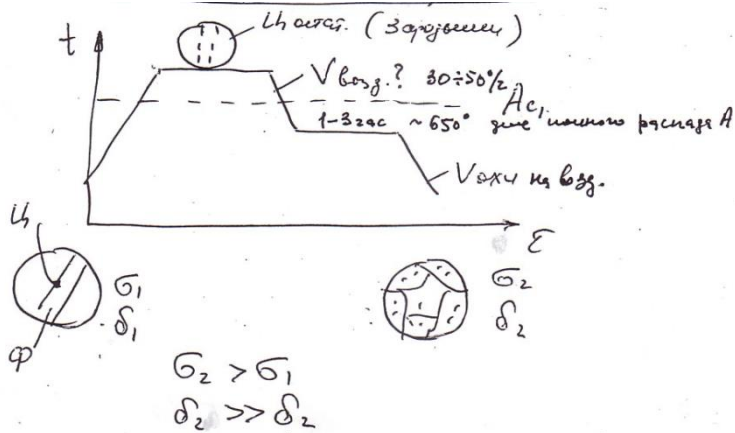
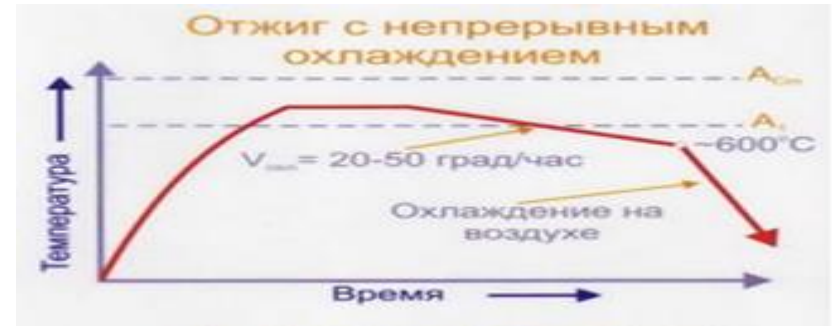
Структура - сорбит или троостит.

Цель:

- для низкоуглеродистых сталей проводят вместо отжига для повышения производительности термической и последующей механической обработки
- для отливок из среднеуглеродистых сталей проводят нормализацию и высокий отпуск, что снижает деформации и обеспечивает отсутствие трещин при закалке
- для горячекатаной стали - для снижения порога хладноломкости
- для заэвтектоидной стали - для устранения цементитной сетки
- для легированных сталей - делают нормализацию и высокий отпуск вместо полного отжига для повышения производительности



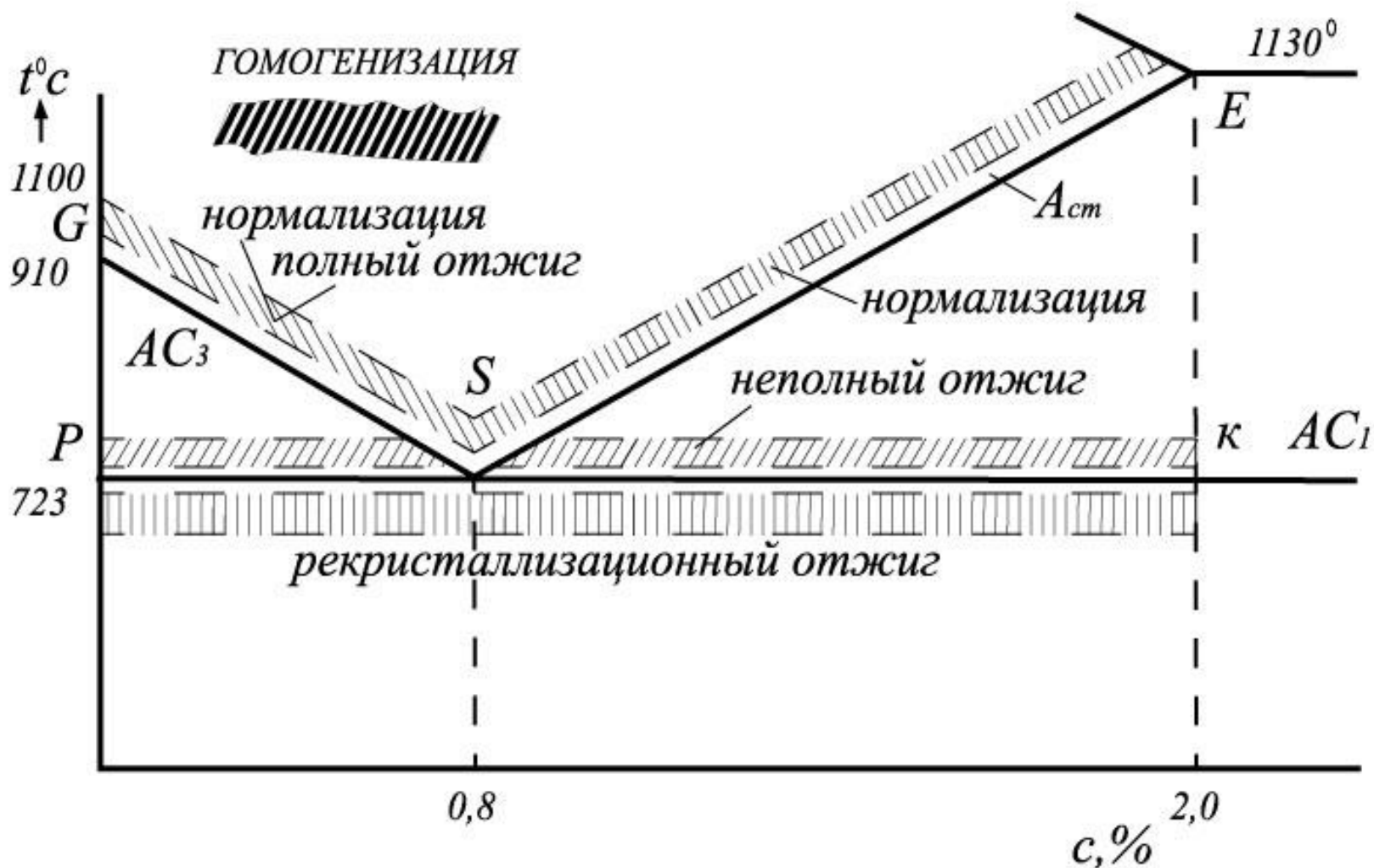
Сфероидизирующий отжиг заэвтектоидных сталей



Структура стали после сфероидизирующего отжига



Температурные интервалы нагрева стали для отжига первого и второго рода приведены на рисунке



ЗАКАЛКА СТАЛИ

- **Закалка стали** - это термическая обработка стали, которая применяется для получения максимально возможной твердости и прочности стали.
- **Закалка** заключается в нагреве выше A_{c3} на 30-50°C, выдержке при этой температуре и охлаждении со скоростью выше критической.
- В результате закалки в детали возникают тепловые и структурные остаточные напряжения ($\sigma_{ост}$), которые могут привести к короблению и трещинам. Для снижения структурных напряжений следует замедлить скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения и избегать перегрева стали.
- Необходимо строго выдерживать температуру нагрева, чтобы избежать перегрева и пятнистой закалки, когда при нагреве не весь феррит переходит в аустенит и после закалки зерна перлита являются мягкими включениями (результат недогрева)
- В зависимости от температуры нагрева закалку называют **полной и неполной**.
- **При полной закалке** происходит полное фазовое превращение т.е. сталь при нагреве переводят в однофазное аустенитное состояние. Полной закалкой подвергают доэвтектоидные стали, нагревая их выше критической температуры GS (A_{c3}) на 30-50°C .
- **При неполной закалке** происходит неполная фазовая перекристаллизация, т.е. сталь нагревают до межкритических температур - между PSK (A_{c1}) и GS (A_{c3}) или между PSK (A_{c1}) и SE (A_{cm}).
- **Заэвтектоидные стали** подвергают неполной закалке, нагревая их выше линии PSK (A_{c1}) на 30-50°C.

Закалка сталей



Температура нагрева сталей под закалку:

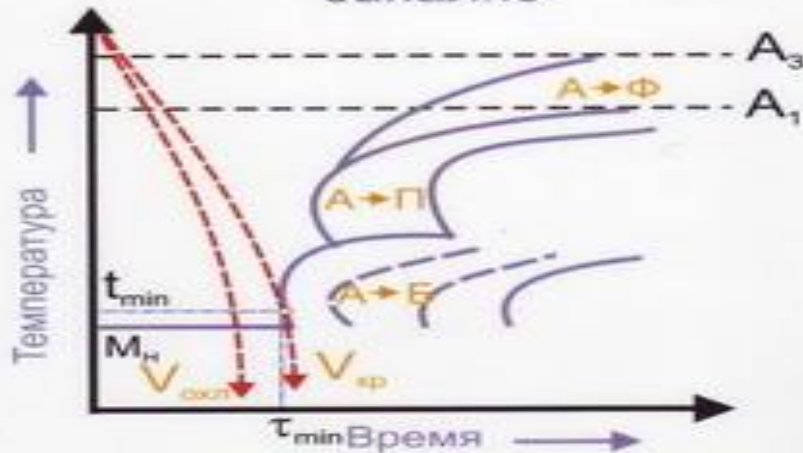
- углеродистая доэвтектоидная

$$t_{\text{н}} = A_{C3} + (30 - 50^{\circ}\text{C})$$

- углеродистая заэвтектоидная

$$t_{\text{н}} = A_{C1} + (30 - 50^{\circ}\text{C})$$

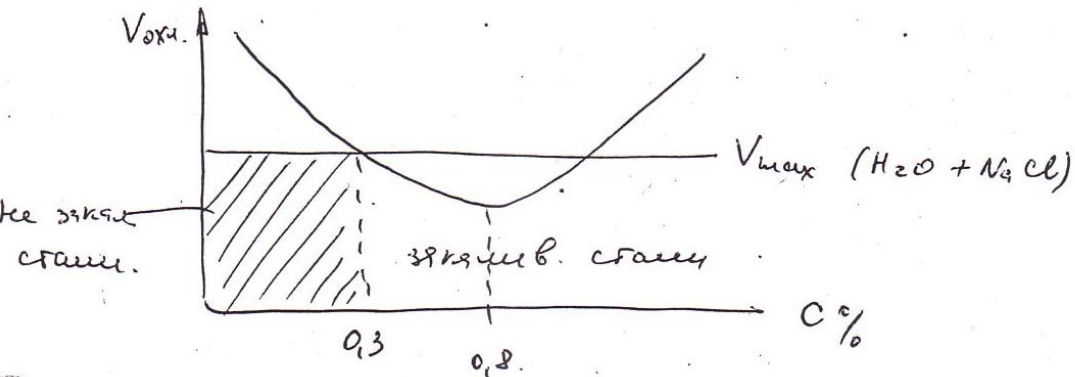
Охлаждение при закалке



Охлаждающая способность воды и масла

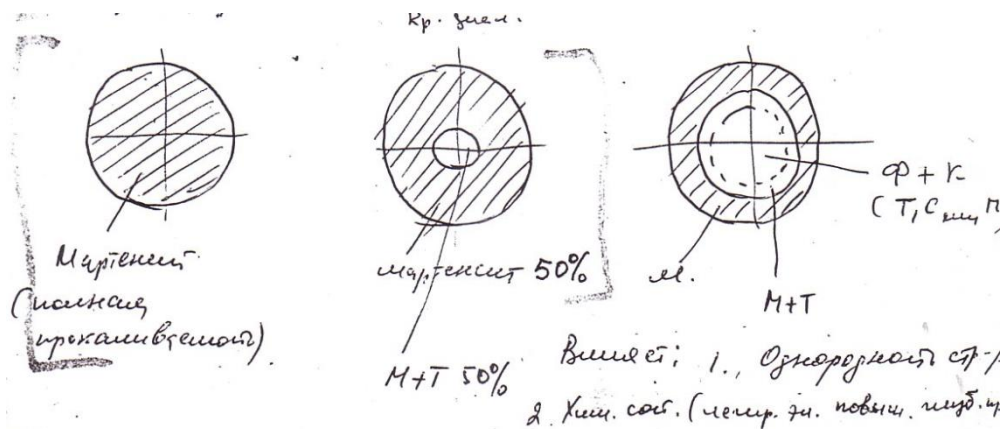


Закаливаемость и прокаливаемость стали



Закаливаемость стали – способность стали повышать твердость в результате закалки. Стали с содержанием углерода менее $0,3\%$ не закаливаются, так как вода не обеспечивает для этих сталей скорость охлаждения выше критической.

Прокаливаемость стали - способность стали получить закаленный слой с мартенситной или троостомартенситной ($M50\% + T50\%$) структурой и высокой твердостью на ту или иную глубину.



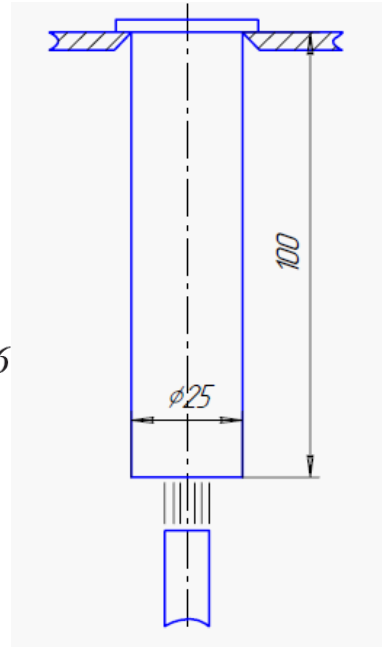
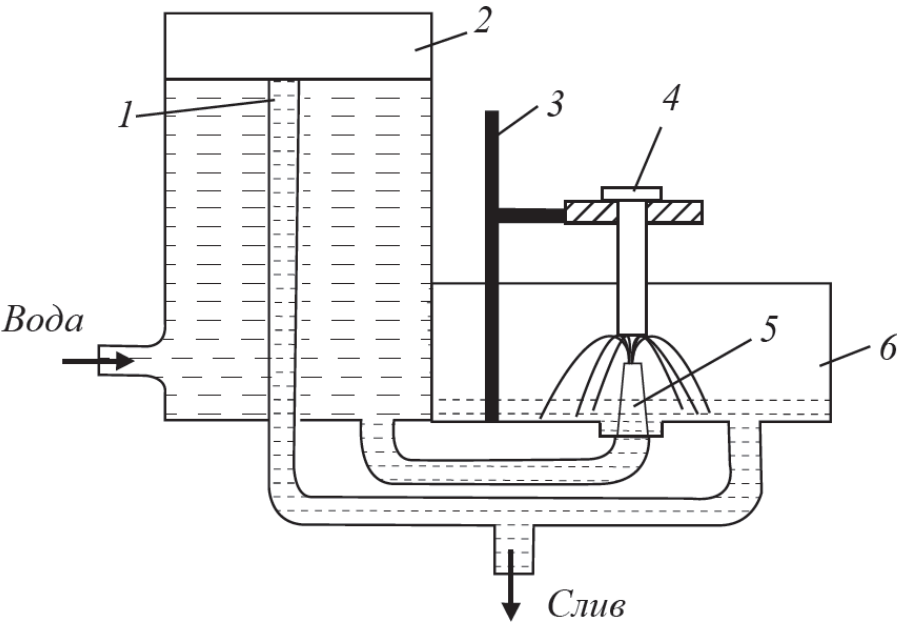
За глубину закаленного слоя условно принимают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны (50% мартенсита + 50% троостита). Диаметр заготовки, в центре которой после закалки в данной охлаждающей среде образуется полумартенситная структура, называют критическим диаметром прокаливаемости

На прокаливаемость влияют:

- 1) однородность структуры (чем выше однородность, тем выше прокаливаемость);
- 2) химический состав стали (легирующие элементы повышают глубину прокаливаемости)

Прокаливаемость и закаливаемость сталей

Установка и образец для торцовой заковки

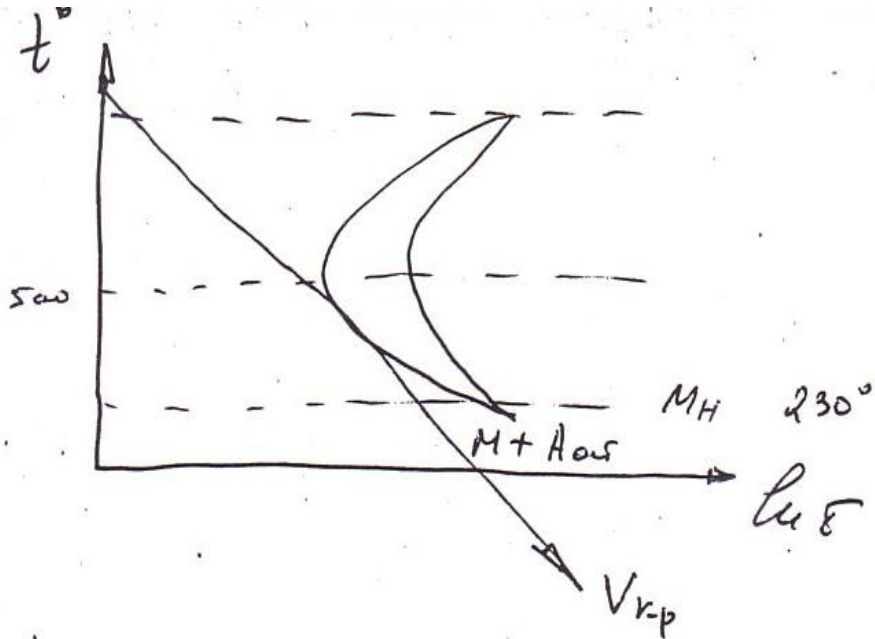


- 1-уравнительная трубка для создания постоянства напора;
- 2-напорный бачок;
- 3-штатив;
- 4-образец;
- 5-сопло;
- 6-сливная коробка

Закаливаемость сталей – способность сталей повышать твердость в результате заковки, зависит главным образом от содержания углерода в стали. Чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость.

Прокаливаемость – способность стали приобретать структуру закаленного слоя на определенную глубину. Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения. Чем меньше критическая скорость заковки, тем выше прокаливаемость стали. Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия будет меньше критической скорости заковки, то в сердцевине произойдет диффузионный распад аустенита на феррито-карбидную смесь пластинчатого строения и прокаливаемость будет не полной.

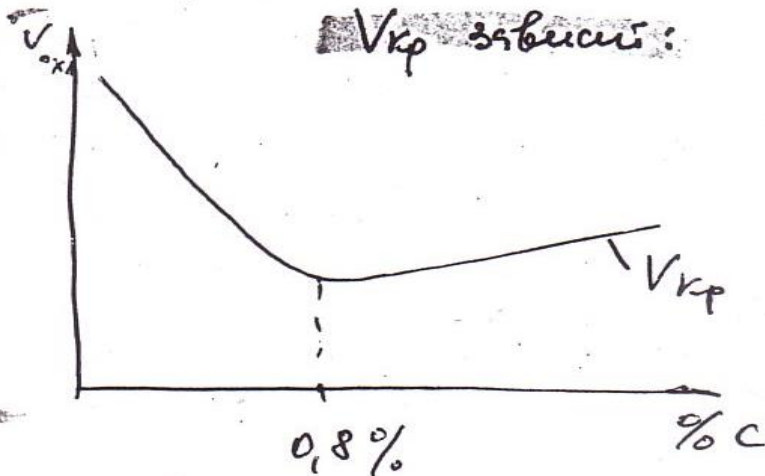
Критическая скорость заковки



Критическая скорость - это минимальная скорость, при которой аустенит превращается в мартенсит

Критическая скорость зависит:

- 1) от содержания углерода;
- 2) от равномерности (однородности) структуры. Чем более однородна структура, тем критическая скорость ниже;
- 3) От степени легирования. Легирование стали приводит к снижению критической скорости.



Для выполнения заковки необходимо иметь среду, обеспечивающую скорость охлаждения равную или выше критической.

Требования к закалочной среде

А) обеспечить критическую скорость закалки

Б) Обеспечить:

- максимальную скорость охлаждения в интервале температур A_1 - M_n и
- оптимальную скорость охлаждения в интервале температур M_n – M_k (максимальная скорость приводит к трещинам, минимальная – к самоотпуску и высокому количеству Аост)

В качестве закалочной среды используют:

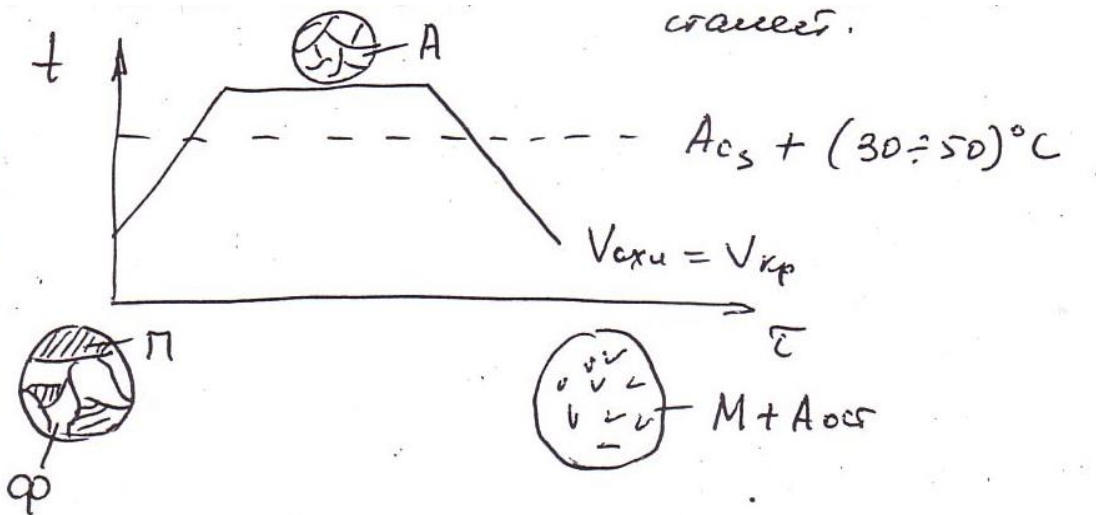
а) Резкие охлаждающие среды (для закалки углеродистых сталей с высокой $V_{кр}$)

- H_2O
- $H_2O + (5...10\%) NaOH$
- $H_2O + (5...10\%) NaCl$

б) Мягкие охлаждающие среды (для закалки легированных сталей с низкой $V_{кр}$)

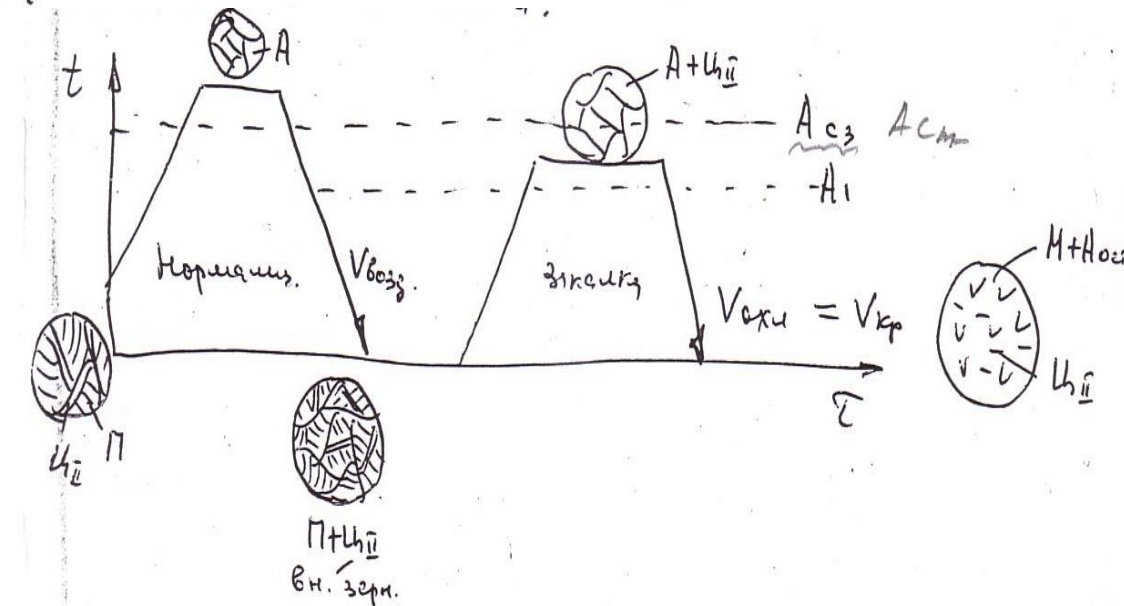
- Масло
- Расплавы солей

Полная и неполная закалка



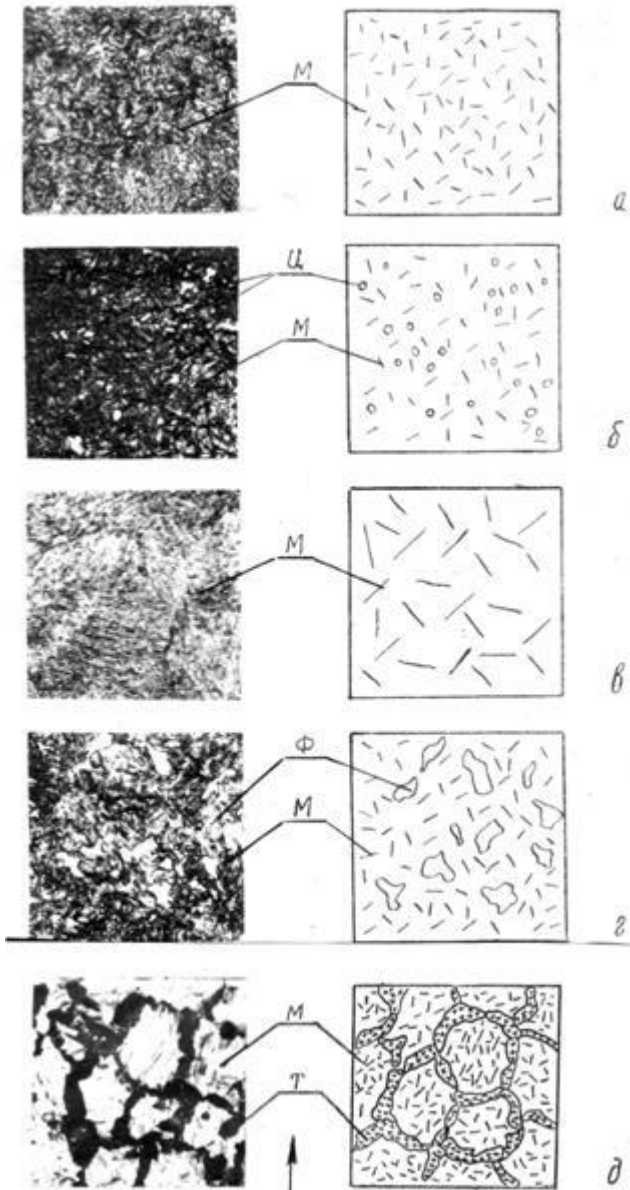
При полной закалке происходит полное фазовое превращение т.е. сталь при нагреве переводят в однофазное аустенитное состояние.

Полной закалке подвергают доэвтектоидные стали, нагревая их выше критической температуры GS (Ac₃) на 30-50°С.



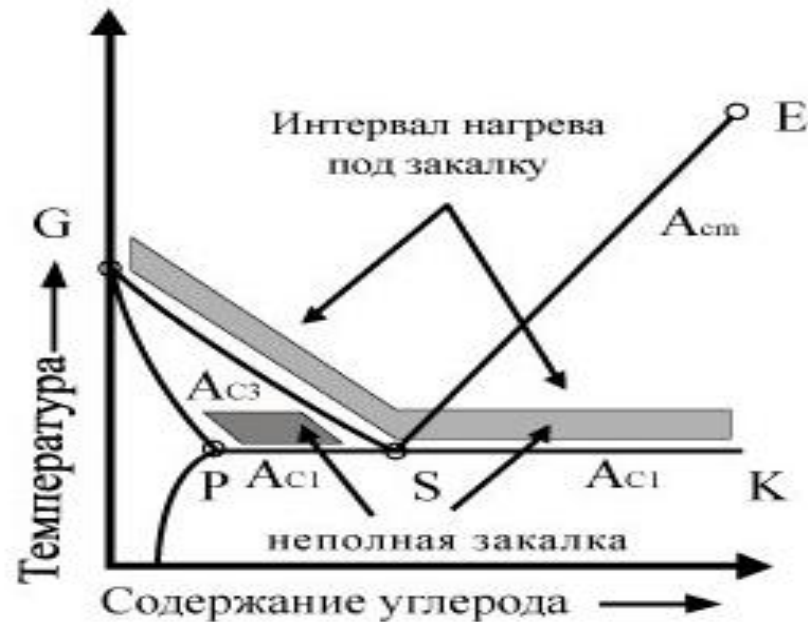
Неполная закалка применяется для заэвтектоидных сталей, но сначала проводится нормализация для устранения цементитной сетки

Микроструктура стали после закалки



- а) мартенсит мелкоигольчатый;
- б) мартенсит + цементит;
- в) мартенсит крупноигольчатый (перегрев стали);
- г) мартенсит + феррит (недогрев стали);
- д) мартенсит + тростит (замедленное охлаждение)

Температурные интервалы нагрева стали под закалку



Основные дефекты, возникающие при закалке

- **Внутренние напряжения.** Объем мартенсита увеличивается на 3%. Если суммарные внутренние напряжения совпадут с внешней нагрузкой и они превосходят предел текучести – образуются трещины, а если не превосходят - то происходит коробление.
- **Низкая твердость после закалки (белые пятна).** Обусловлены низкой температурой нагрева (недогрев). При недогреве в структуре присутствует феррит, который при охлаждении со скоростью выше критической не превращается в мартенсит. Исправляется повторной термообработкой.
- **Перегрев стали,** обусловлен высокой температурой нагрева, приводит к росту зерна. Исправляется повторной термообработкой
- **Пережог стали** - обусловлен очень высокой температурой нагрева. Приводит к росту зерна и к окислению границ зерен, брак не исправим.

Способы закалки стали



- 1 - непрерывная закалка
- 2 - закалка с подстуживанием
- 3 - закалка в двух средах
- 4 - ступенчатая закалка

Изотермическая закалка



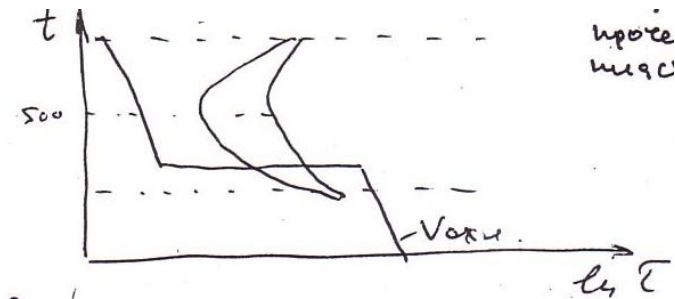
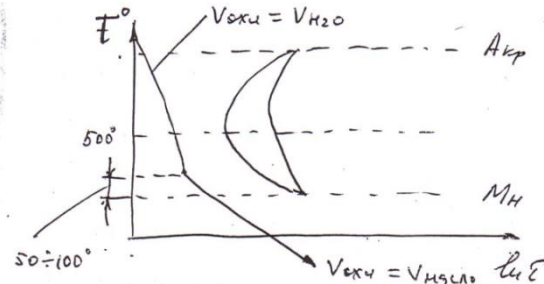
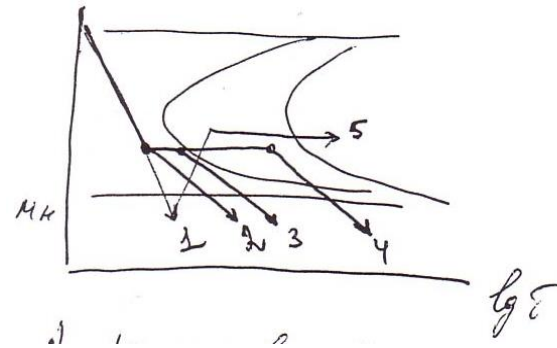
Изотермическая закалка обеспечивает формирование структуры нижнего бейнита.

$$T_{из} = M_n + (20-40^\circ C)$$

Свойства стали 40ХСНМА

Обработка	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{в.}$ МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
Закалка в масле + отпуск 550°C, 2ч	1230	1320	12	45	0,53
Изотемическая закалка (325°C, 1ч)	1200	1400	19	55	0,92

Способы закалки сталей. Специальные методы закалки



1. Непрерывная закалка - осуществляется в одном охладителе - наиболее простой и широко используемый способ закалки.

2. Прерывистая (в двух средах) применяется для инструмента из высокоуглеродистых сталей и легированных (через воду в масло). Способствует уменьшению внутренних напряжений.

3. Ступенчатая закалка - предполагает охлаждение и выдержку в среде, имеющей температуру немного выше M_n (температура начала мартенситного превращения). В это время деталь приобретает температуру закалочной ванны по всему сечению (происходит выравнивание температуры по сечению).

Затем следует окончательное охлаждение, при котором и происходит превращение аустенита в мартенсит. Такой способ закалки уменьшает внутренние напряжения и снижает вероятность закалочных деформаций.

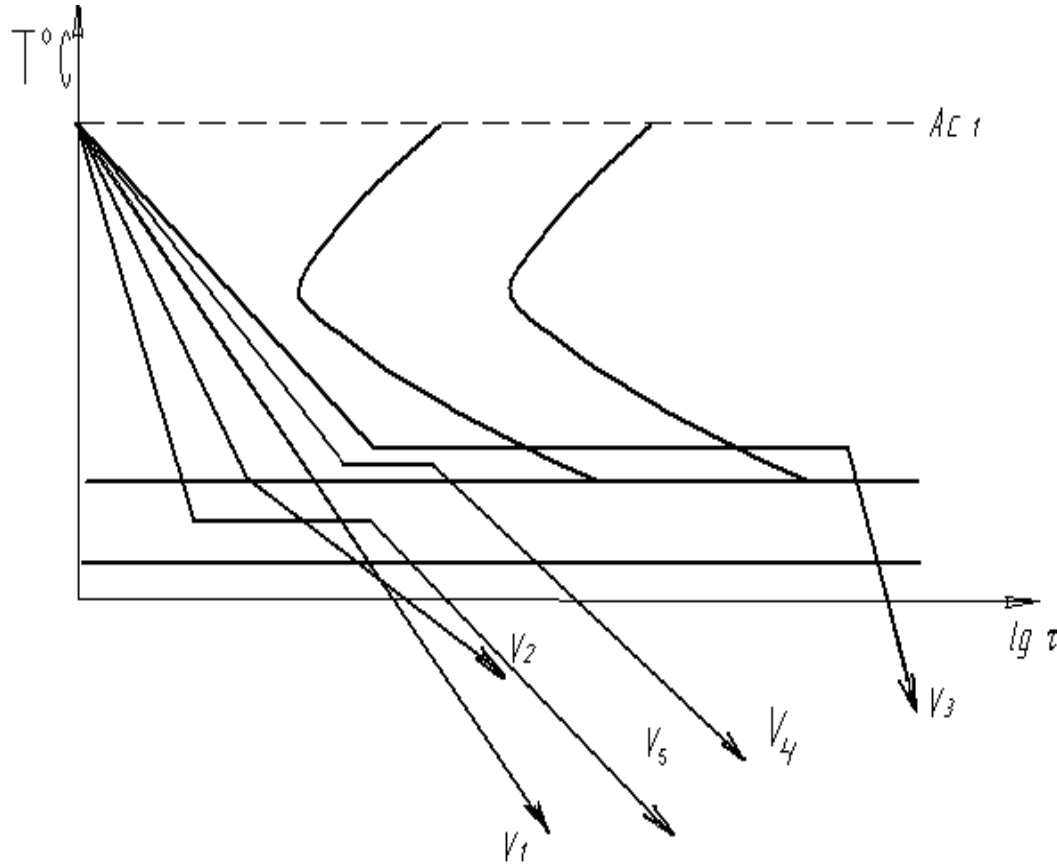
4. Изотермическая закалка предполагает изотермический распад аустенита при температуре немного выше M_n . В этом случае формируется структура нижнего бейнита, которая при достаточной прочности обладает повышенной вязкостью. Применяется для легированных сталей с содержанием углерода 0,3...0,5%. Образующаяся структура: НБ + (10...20% Ауст)

5. Закалка с самоотпуском. Охлаждение производят не полностью. За счет теплоты аккумулируемой в сердцевине происходит разогрев поверхностных слоев до температуры отпуска. Применяется для деталей с высокой твердостью - зубила, кувалды, молотки, топоры.

Закалка с обработкой холодом проводится для уменьшения содержания остаточного аустенита (Аост) в сталях, у которых температура конца мартенситного превращения (M_k) расположена в области отрицательных температур (это преимущественно стали с содержанием углерода более 0,7%).

Перенос в холод необходимо проводить сразу после обычной закалки. После обработки холодом надо сразу производить отпуск. Обработке холодом подвергают мерительный инструмент, пружины, высоколегированные цементуемые стали.

Способы закалки сталей.



Закалка в одном охладителе (V1) – наиболее простой и широко используемый способ закалки.

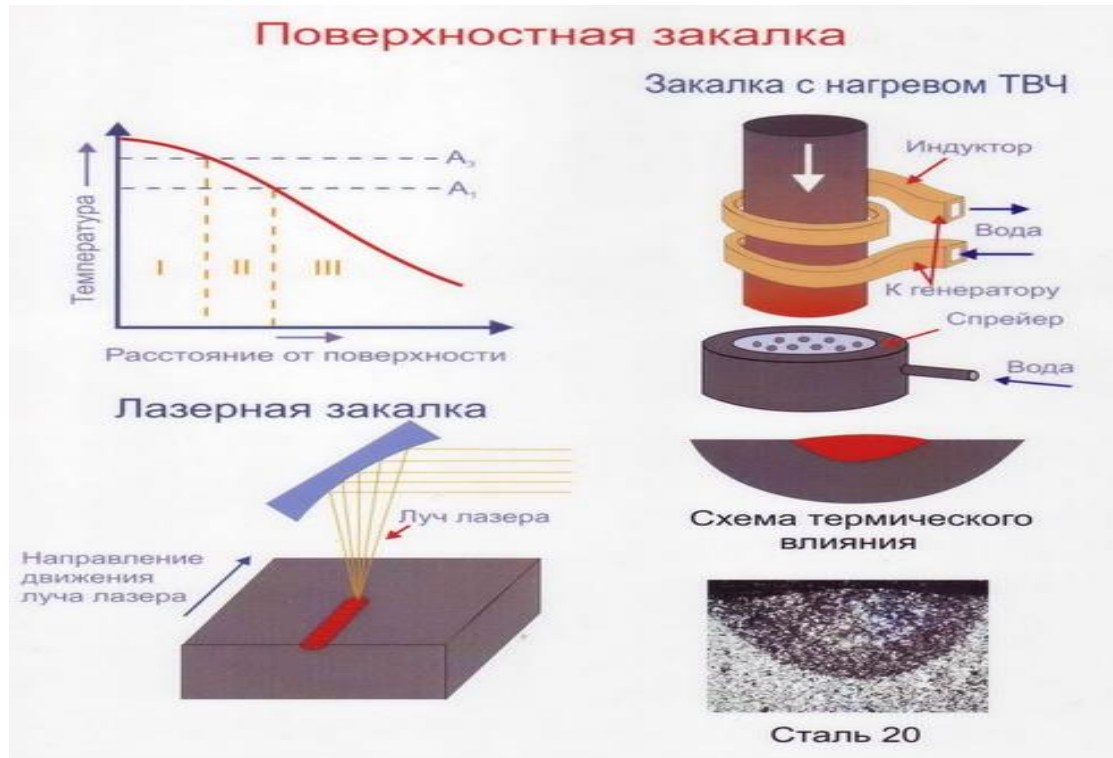
Закалка в двух средах (или прерывистая закалка) (V2) применяется для инструмента из высокоуглеродистых сталей (через воду в масло). В интервале мартенситного превращения деталь охлаждается медленнее, что способствует уменьшению внутренних напряжений.

Изотермическая закалка (V3) предполагает изотермический распад аустенита при температуре немного выше M_n . В этом случае формируется структура нижнего бейнита, которая при достаточной прочности обладает повышенной вязкостью.

Ступенчатая закалка (V4) предполагает охлаждение и выдержку в среде, имеющей температуру немного выше M_n . В это время деталь приобретает температуру закалочной ванны по всему сечению. Затем следует окончательное охлаждение, при котором и происходит превращение аустенита в мартенсит. Такой способ закалки уменьшает внутренние напряжения и снижает вероятность закалочных деформаций.

Закалка в горячих средах (V5) предполагает точное сохранение размеров изделия (например- шаг резьбы), что достигается путем выдержки изделий при температуре ниже M_n . В этом случае аустенит частично стабилизируется и после окончательного охлаждения его количество увеличивается по сравнению с непрерывным охлаждением.

Поверхностная закалка



Применяется для деталей, работающих на износ для повышения твердости, выносливости, износостойкости. Цель – повышение твердости, износостойкости и выносливости.

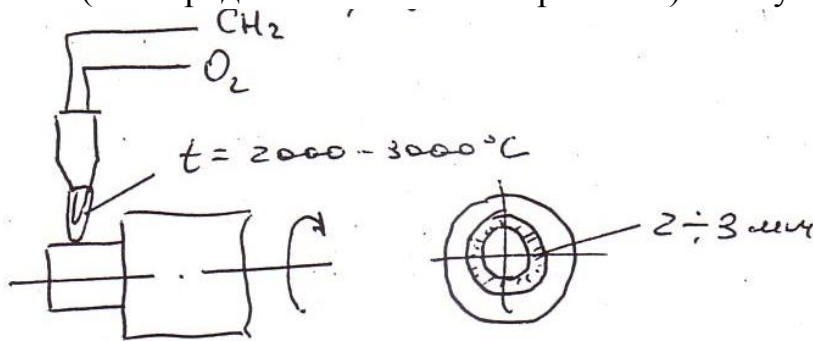
А. Закалка ТВЧ (закалка токами высокой частоты) применяется для углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода $C=0,3 \dots 0,5\%$. Глубина слоя зависит от частоты: 50...60 кГц – 1 мм, 15 кГц – 2 мм, 4 кГц – 4 мм.

- Площадь сечения закаленного слоя должна составлять $\approx 20\%$ от площади сечения.
- Из-за больших скоростей нагрева (до $500^\circ\text{C}/\text{сек}$) температура фазовых превращений смещается в область более высоких температур ($\approx 1000^\circ\text{C}$), а само превращение происходит одновременно во всем нагретом слое. Зерно значительно мельче, чем при печном нагреве. Охлаждение производится распыленной жидкостью (спрейерное охлаждение).

Поверхностная закалка

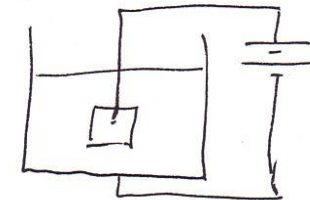
Методы поверхностной закалки ТВЧ

- Нагрев и охлаждение всей поверхности, получается мелкое зерно
 - Последовательный нагрев и охлаждение участка (шейки коленвала, часть зубьев больших шестерен)
 - Непрерывно-последовательный нагрев и охлаждение - используется для длинных валов и осей
 - Предварительная термическая обработка перед закалкой ТВЧ - нормализация или улучшение. Термическая обработка после закалки ТВЧ - низкий отпуск.
 - Преимущества - высокая производительность, отсутствие окалины, требуется меньший припуск под мехобработку, меньшее коробление и возможность механизации (автоматизации)
 - Недостатки - сложность и дороговизна оборудования
- Б) Закалка газопламенным нагревом щелевыми или многопламенными горелками (кислородно-пламенными горелками). Получаемая толщина закаленного слоя – 2...4 мм.**



акалки ТВЧ

В) Закалка в электролите NaCO_3 и CaOH 10%, Плотность тока 5...10А/см²



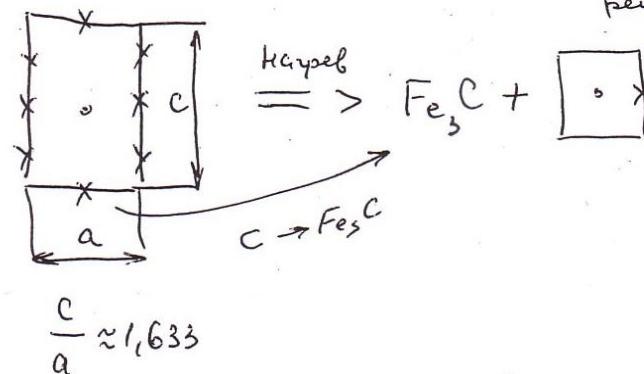
Г) Электроконтактная поверхностная закалка.

Отпуск стали

- **Отпуск** – это окончательный вид термической обработки, заключающийся в нагреве до температуры ниже A_{c1} , выдержке в течение 1-2,5 часов и охлаждении, как правило, на воздухе (медленное для деталей сложной формы).
- Охлаждение легированных сталей, склонных к обратимой отпускной хрупкости используется быстрое охлаждение с температур 500...650°C
- **Цель** - уменьшение неравновесности структуры, снятие остаточных напряжений и получение структуры в виде феррито-цементитной смеси определенной дисперсности.
- **Сталь, закаленная на мартенсит**, обладает сложным полем остаточных напряжений, имеет высокую твердость и склонность к хрупкому разрушению.
- Поэтому стали непосредственно после закалки не могут быть использованы для эксплуатации и подвергаются окончательной операции термической обработки - **отпуску**.
- Структура закаленной стали состоит из двух неустойчивых фаз: мартенсита и остаточного аустенита. Поэтому при длительном вылеживании при комнатной температуре и особенно нагреве неустойчивая структура закаленной стали стремится перейти в более устойчивое состояние, т.е. в структуру, состоящую из феррито-цементитной смеси.

После зак. неустойчивая структура: $M + A_{res}$

устойчивая структура: феррит + цементит



При нагреве закаленной стали происходят процессы диффузии углерода из пересыщенной решетки мартенсита, что приводит к уменьшению степени ее тетрагональности, снижению остаточных внутренних напряжений в стали и образованию карбидных частиц.

Скорость процесса распада мартенсита и количество углерода в нем зависят от температуры нагрева. Чем выше температура нагрева мартенсита, тем больше скорость распада и тем меньше углерода будет оставаться в нем.

В зависимости от температуры нагрева различают **низкий, средний и высокий отпуск**.

Низкий отпуск

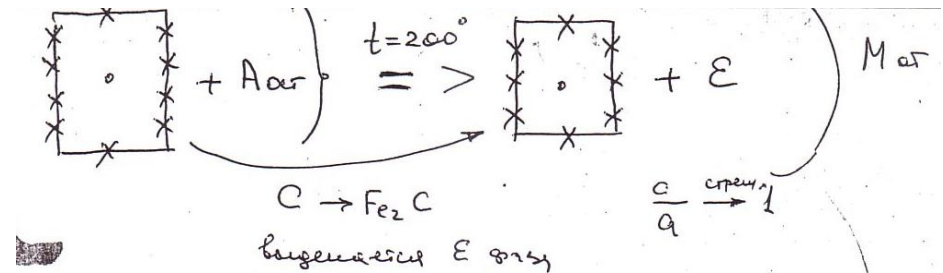
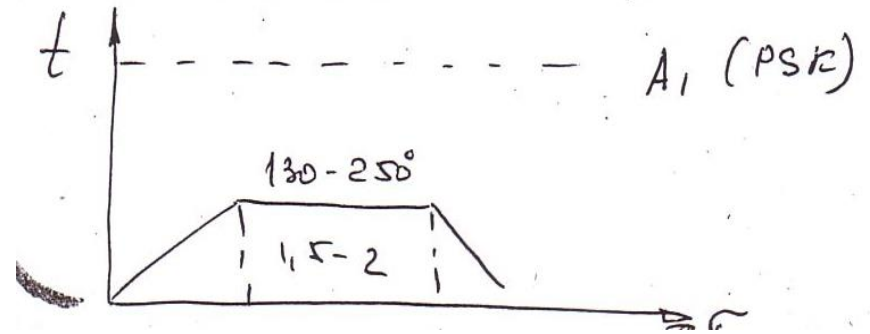
Низкий отпуск - нагрев закаленной стали до температур менее 250°C (170...220°C).

Низкий отпуск предназначается для частичного снятия внутренних напряжений и повышения вязкости и пластичности стали без заметного снижения ее твердости.

Этому виду отпуска подвергают мерительный и режущий инструмент, работающий в условиях безударной нагрузки: метчики, плашки, резцы чистовой обработки и т.д.; детали, прошедшие химико-термическую обработку: цементацию, нитроцементацию и т.д.

При низком отпуске углерод частично удаляется из мартенсита - диффундирует из пересыщенной решетки мартенсита с образованием включений промежуточных карбидов типа Fe_xC .

При низком отпуске уменьшается степень тетрагональности решетки и, как следствие, снижаются остаточные напряжения.



Мартенсит закалки переходит в **мартенсит отпуска**.

Аустенит остаточный также превращается в мартенсит отпуска.

Аустенит остаточный также превращается в мартенсит отпуска.

$M_{зак} \rightarrow M_{отп}$, $A_{ост} \rightarrow M_{отп}$

Значительных изменений в микроструктуре не происходит. Мартенситные иглы теряют свои ранее резкие очертания.

Средний отпуск

Средний отпуск - нагрев закаленной стали до температур 350 - 450°C.

Средний отпуск предназначен для почти полного снятия внутренних напряжений, повышения упругих и пластических свойств стали. Сталь обладает высокой упругостью и пределом выносливости

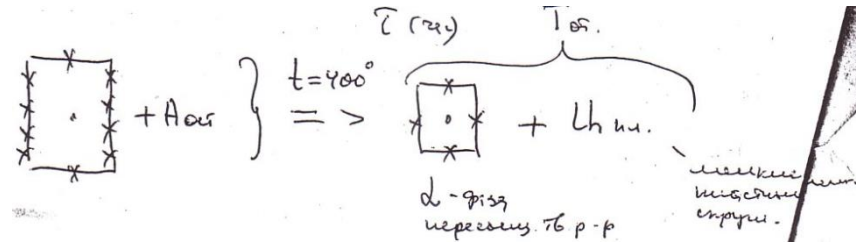
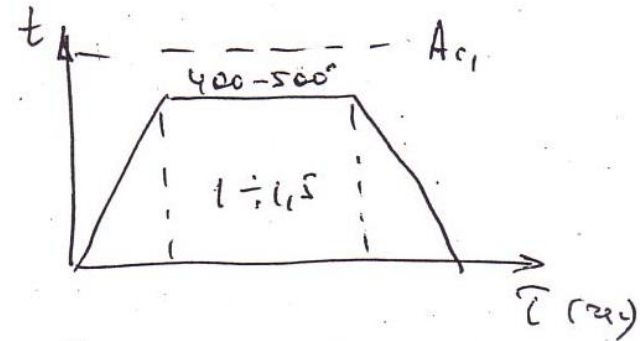
Среднему отпуску подвергаются:

А) инструмент, работающий в условиях **ударной нагрузки**: долбяки, строгальные резцы, резцы для черновой обработки дерева, слесарный инструмент и т.д. (максимальный нагрев до 350°C), штамповый инструмент

Б) детали машин, к которым предъявляются требования высоких упругих свойств: **рессоры, пружины и др.** (температура нагрева 400°C).

При среднем отпуске, особенно при максимальных температурах, избыточный углерод покидает кристаллическую решетку Fe-а, в результате почти полностью устраняется тетрагональность решетки и остаточные напряжения, мартенсит превращается в феррит, а выделившийся из мартенсита углерод образует устойчивый карбид железа Fe₃C.

Остаточный аустенит превращается в мартенсит отпуска, который затем распадается на ферритоцементитную смесь - **тростит отпуска** (феррито - цементитная смесь с высокой степенью дисперсности).



Мотп → Totп (тростит отпуска) или
Мотп → Totп + Мотп (троостомартенсит)

При среднем отпуске значительное (до 30%) падение твердости и незначительное увеличение пластичности происходят в основном за счет устранения тетрагональности, дефектов кристаллической решетки остаточных напряжений.

Пружины после отпуска необходимо охлаждать в воде. При этом образуются сжимающие напряжения в поверхностном слое, что дополнительно повышает предел выносливости.

Высокий отпуск

Высокий отпуск - нагрев закаленной стали до температур 500...680°C.

Высокий отпуск предназначен для получения однородной мелкозернистой структуры стали и обеспечения наилучшего сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости (до 600°C).

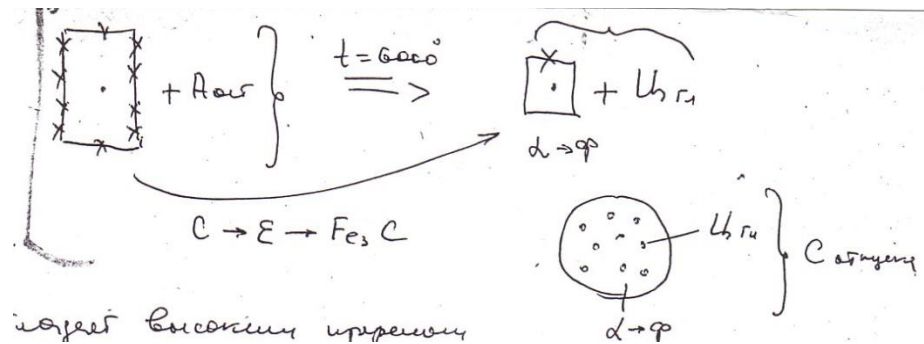
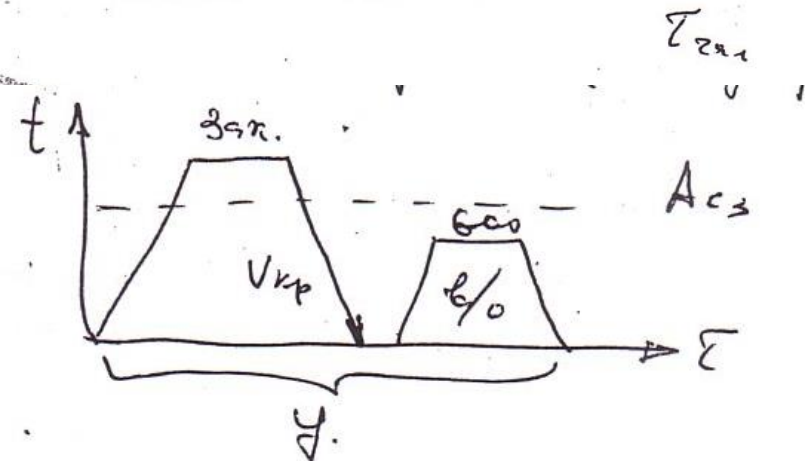
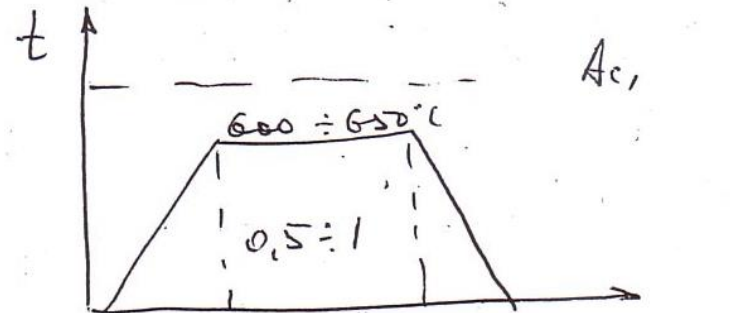
Двойная термическая обработка, состоящая из закалки и последующего высокого отпуска (до 600°C), существенно улучшает общий комплекс механических свойств, является основным видом термической обработки конструкционных сталей и называется **улучшением стали**.

Улучшению подвергаются конструкционные стали с содержанием углерода 0,3...0,5%. Улучшению подвергаются такие детали, как шестерни, валы, траверсы, плунжеры, и т.д.

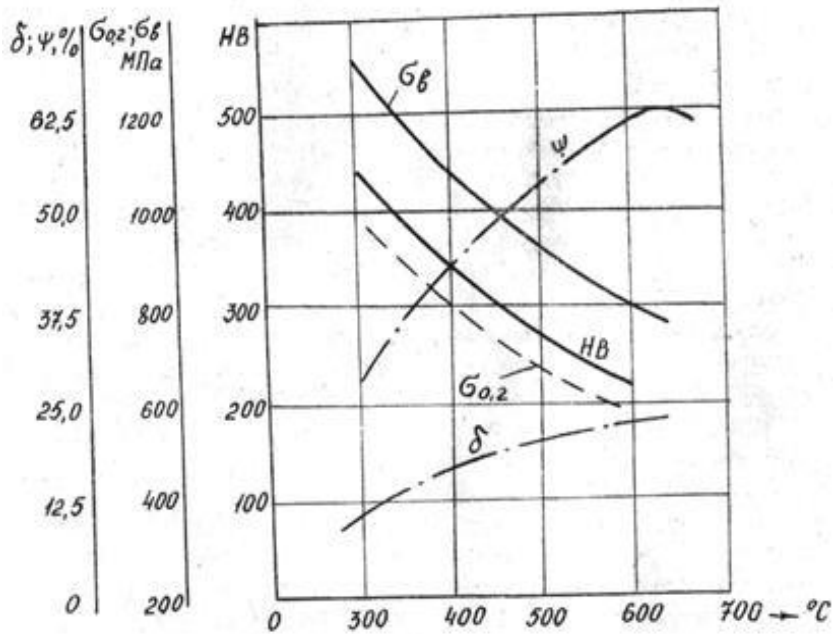
При высоком отпуске наблюдаются процессы **коагуляции (укрупнения) и сфероидизации (округления) частиц цементитной фазы**.

Уменьшается количество цементитных включений в ферритной матрице и увеличиваются их размеры, т.е. снижается степень дисперсности структуры.

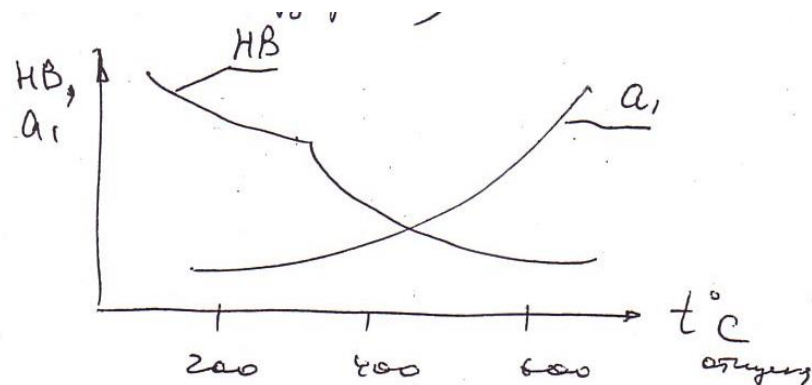
Такая смесь феррита и цементита средней дисперсности **зернистого строения** называется **сорбитом отпуска**, в отличие от сорбита закалки, имеющего пластинчатое строение.



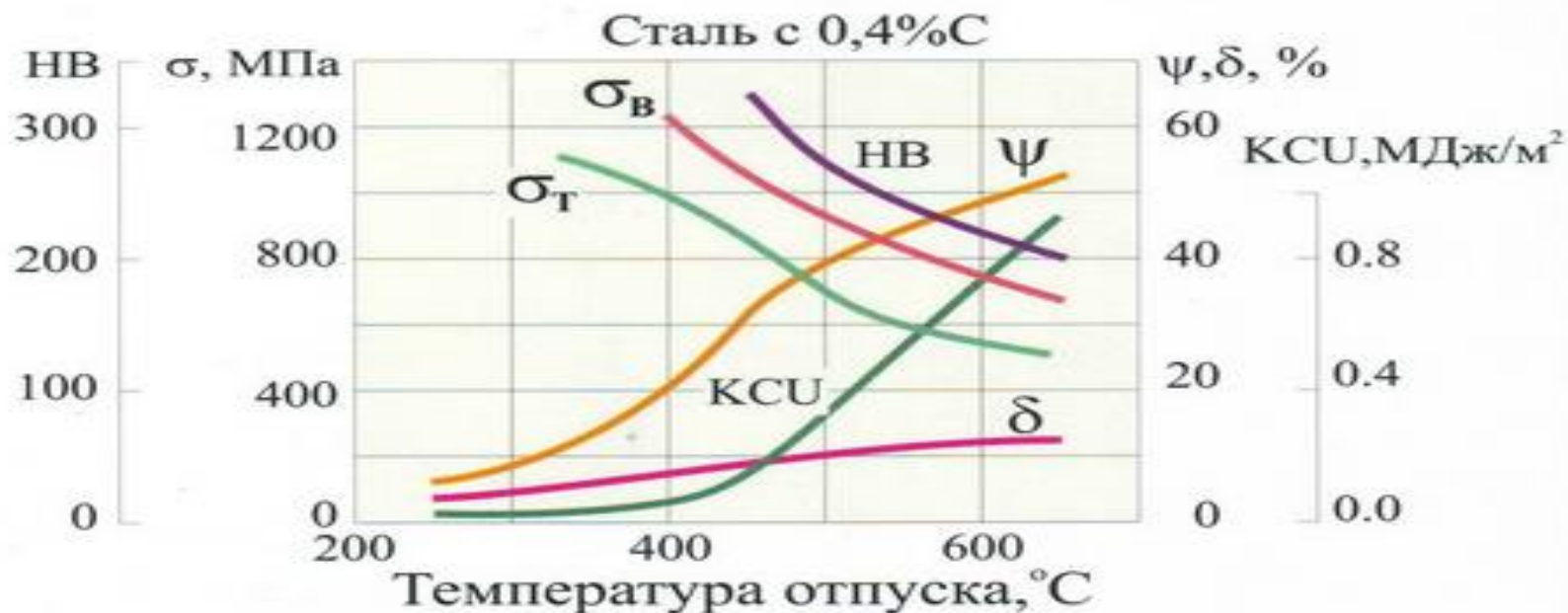
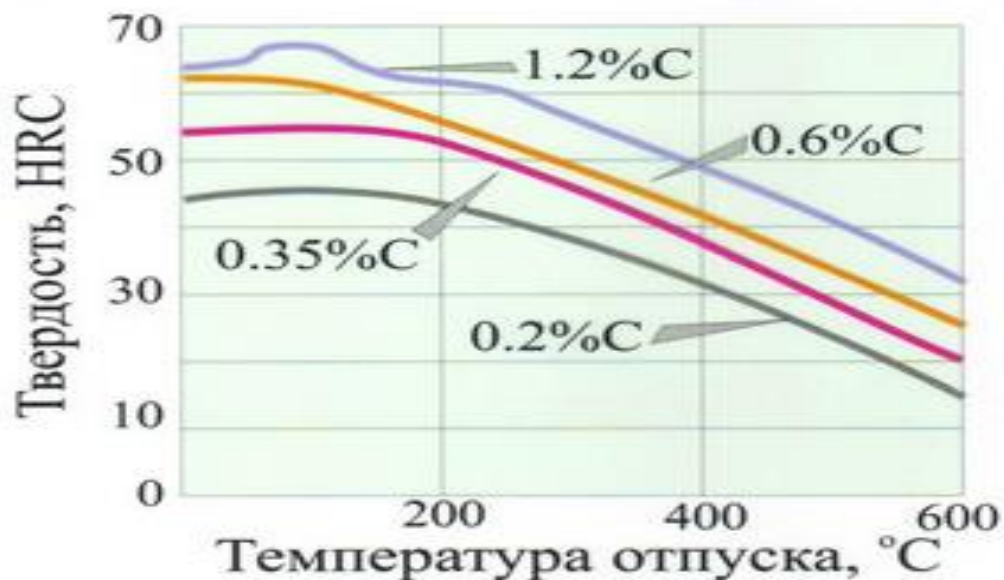
Высокий отпуск. Свойства стали после отпуска



- По сравнению с нормализацией после высокого отпуска повышается предел прочности, предел текучести, относительное сужение и относительное удлинение, особенно повышается ударная вязкость.
- При высоком отпуске происходит падение твердости (до 50%) закаленной стали при значительном увеличении пластичности и ударной вязкости, максимальные значения которых достигаются при температуре отпуска 700°C.
- Перед обработкой резанием применяют **высокий отпуск (до 700°C)**, резко снижающий твердость предварительно закаленной стали и износ режущего инструмента. Частицы карбидов оказываются укрупненными. Такая структура именуется **перлитом отпуска** в отличие от **пластинчатого перлита**, получающегося при непрерывном охлаждении стали из области аустенита.



Изменение механических свойств при отпуске



Отпуск закаленной стали

Процессы, происходящие при отпуске закаленных углеродистых сталей:

- распад мартенсита с образованием карбидов (20-350°C)
- превращение остаточного аустенита по механизму бейнитной реакции (200-300°C)
- снятие внутренних напряжений и превращение ϵ - карбида (Fe_2C) в цементит (350-400°C)
- сфероидизация и коагуляция карбидов (450°C и выше)
- уменьшение плотности дислокаций, полигонизация и рекристаллизация ферритной матрицы (450°C и выше)

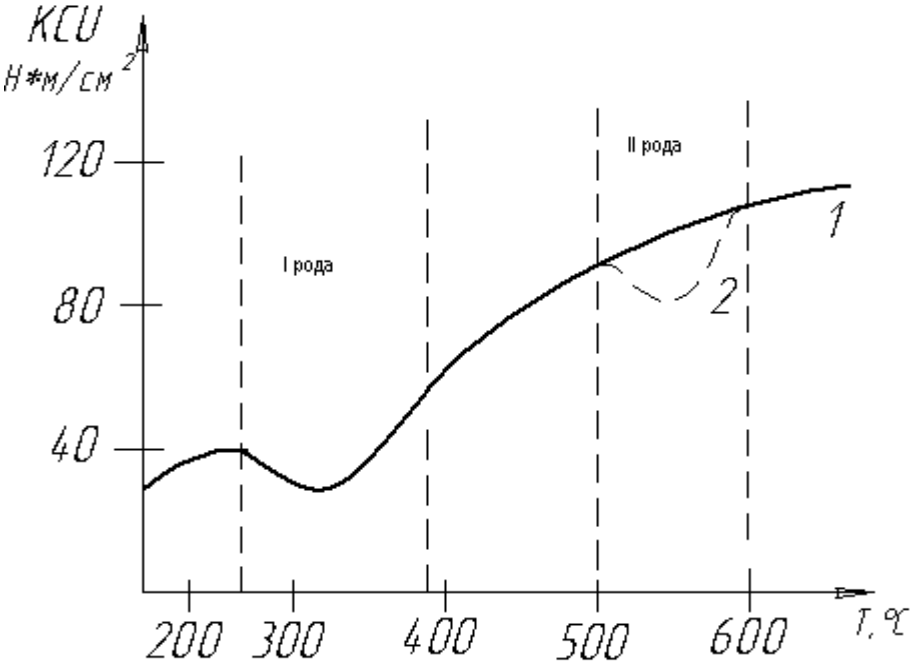
Низкий отпуск



Высокий отпуск



Отпускная хрупкость I и II рода.



Влияние температуры отпуска и скорости охлаждения на ударную вязкость конструкционных сталей (1-быстрое охлаждение, 2- медленное охлаждение).

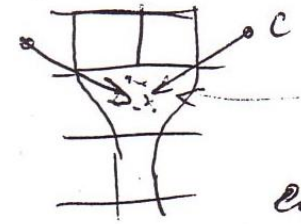
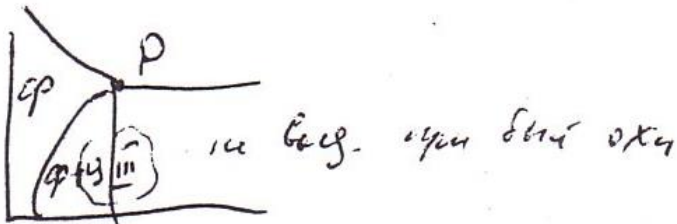
Меры борьбы с отпускной хрупкостью:

1. Снижение содержания вредных примесей,
2. Ускоренное охлаждение с температуры высокого отпуска, однако это не устраняет отпускную хрупкость в центре массивных изделий и может привести к возникновению трещин, если деталь имеет резкие перепады в толщине стенок, отверстия, ребра (то есть, концентраторы напряжений),
3. Введение молибдена (0,2...0,2%). При содержании молибдена более 0,2% отпускная хрупкость усиливается.
4. Проведение высокотемпературной термомеханической обработки.

Отпускная хрупкость I рода (необратимая) не устраняется повторным отпуском, поэтому следует избегать проведения отпуска при температурах ее проявления. Отпускная хрупкость I рода наблюдается у всех конструкционных сталей независимо от степени легирования.

Отпускная хрупкость II рода (обратимая) наблюдается в легированных сталях при медленном охлаждении. Её причиной считают выделение дисперсных фаз легирующих элементов по границам α -фазы и диффузию фосфора к границам зерен. Предотвратить отпускную хрупкость II рода можно путем ускоренного охлаждения в масле или воде после отпуска. Альтернативный путь - микролегирование молибденом или вольфрамом, которые связывают легирующие элементы, не давая им выделяться в виде хрупких частиц по границам зёрен.

Термическое и деформационное старение углеродистой стали



- Старение – распад пересыщенного твердого раствора. Пересыщенный твердый раствор может быть подвергнут закалке без полиморфного превращения.
- Старение происходит самопроизвольно с выделением теплоты, при этом сплав переходит в более стабильное, но тоже неравновесное состояние
- Термическое старение (естественное) происходит при комнатной температуре в течение нескольких суток, а при нагреве (искусственное старение) для повышения диффузионной активности атомов происходит течение нескольких часов или минут.
- В низкоуглеродистых сталях цементит третичный при быстром охлаждении не успевает выделиться и феррит при комнатной температуре оказывается пересыщенным ($C=0,025\%$ вместо $C=0,006\%$).
- Процесс начинается с диффузии атомов углерода к дислокациям, где образуются атмосферы Коттрелла. Подвижность дислокаций уменьшается. Дислокации надо сдвинуть не только соседнюю атомную плоскость, но и влечь за собой атмосферу Коттрелла, или оторваться от нее. Вблизи дислокации образуются плоские скопления атомов углерода толщиной 1...3, а в поперечнике 10...20 межатомных расстояний. Затем происходит образование цементита третичного.
- Чем при большей температуре и дольше идет процесс, тем крупнее будет новая фаза. Присутствие азота приводит к образованию нитридов. В технически чистом железе также выделяются частицы нитридов $Fe_{16}N_2$ или Fe_4N . Появление кристаллов избыточной фазы в твердом растворе препятствует перемещению дислокаций, чем повышает твердость и прочность, но снижает пластичность.

Термическая обработка сплавов с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии



Сплавы, состав которых лежит правее точки **F**, могут быть подвергнуты упрочняющей термической обработке, включающей **истинную закалку** и **старение**.

При **истинной закалке** быстрым охлаждением фиксируют **высокотемпературное** состояние сплава. При этом возникает пересыщенный твердый раствор.

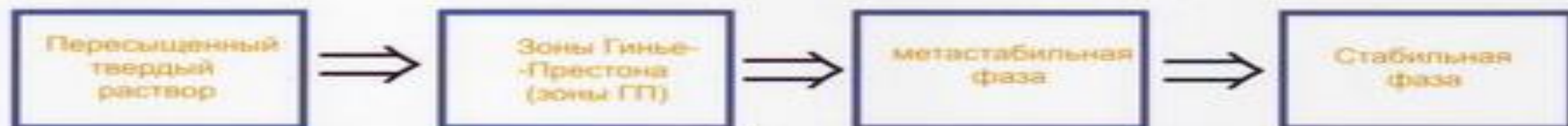
Для сплава состава **C₁** закалка с температуры **t₁**, обеспечивает получение однофазного состояния (**α**). При закалке сплава состава **C₂** фиксируются две фазы: пересыщенный **α**-твердый раствор состава **K** и **β**-фаза, нерастворившаяся при нагреве под закалку.

Старение сплавов с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии

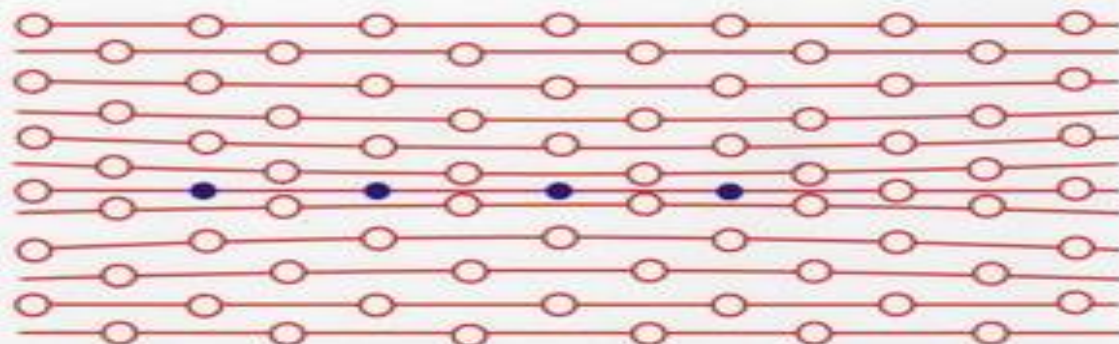
Старением называется операция термообработки, при которой происходит распад пересыщенного твердого раствора.

Старение, проводимое при повышенных температурах, называется *искусственным*, а при комнатной температуре - *естественным*.

Стадии распада пересыщенного твердого раствора при старении



Модель зоны Гинье-Престона в сплавах системы **Al - Cu**



- - атомы растворителя (Al)
- - растворенные атомы (Cu)

Изменение механических свойств при старении

Упрочнение закаленного сплава при старении называется *дисперсионным твердением*.

Сплав системы Al-Zn-Mg (старение 12 ч.)



Наибольшее упрочнение стареющих сплавов достигается на стадии образования зон ГП и метастабильных фаз. Происходящее вслед за упрочнением понижение прочности при старении называется *перестариванием*. Оно связано с образованием стабильных фаз и коагуляцией выделений.

Коагуляция (коалесценция) - процесс роста более крупных частиц за счет растворения более мелких.

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО)

ВТМО заключается в совмещении горячей деформации, осуществляемой в аустенитном состоянии, с последующей закалкой на мартенсит и окончательном отпуске. При проведении ВТМО рекристаллизация горячедеформированного аустенита должна быть исключена.



Деформацию прокаткой, ковкой, или штамповкой проводят при $850-950^{\circ}\text{C}$ с обжатиями 20-40%. ВТМО повышает пределы текучести и прочности на 150-250 МПа, циклическую прочность на 10-25%. Одновременно могут расти пластичность, ударная вязкость, сопротивление хрупкому разрушению

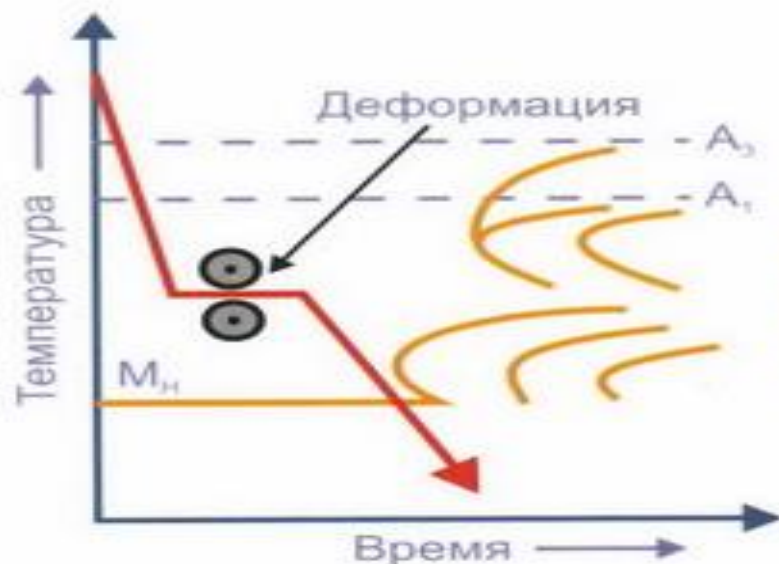
ВТМО является эффективным методом ослабления интеркристаллитных видов хрупкости сталей



Сталь 37ХНЗА
Аустенитизация при 1000°C , отпуск длительностью 1 час.
ВТМО с деформацией при 900°C на 20%.
Обычная термическая обработка

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°C с обжатиями 70-95%.

Для легированных сталей НТМО позволяет получить высокий уровень прочностных свойств.

Свойства сталей после отпуска при 220°C

Марка стали	Обработка	$\sigma_{0.2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %
37ХН3А	Обычная термообработка	1300	1900	6
	НТМО с деформацией при 525°C на 70% прокаткой	2600	2800	5
40ХН5С	Обычная термообработка	1300	1900	—
	НТМО с деформацией при 525°C на 70% прокаткой	2600	3300	6

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- **ХТО** - это операция, заключающаяся в насыщении поверхностного слоя детали химическими элементами при повышенной температуре.
- **Цель ХТО** - повышение износостойкости деталей при трении. Некоторые виды ХТО также повышают антикоррозионную стойкость, гидростойкость, противозадирные свойства металла.
- Отличие ХТО от ТО заключается в изменении химического состава поверхностного слоя.
- В зависимости от рода насыщающего элемента можно выделить:
 - Насыщение неметаллами (цементация, цианирование/нитроцементация, азотирование)
 - Насыщение металлами (хромирование, алитирование, борирование, силицирование)
- Насыщение металла (Fe) какими-либо элементами возможно лишь в том случае, когда:
 - насыщающий элемент способен растворяться в решетке насыщаемого металла (Fe),
 - атомы насыщающего вещества обладают необходимой диффузионной подвижностью.
- Любая ХТО состоит из **трех параллельно идущих стадий**:
 - 1) подготовка активной насыщающей среды (**диссоциация** молекул на атомы), выделяющей непрерывно атомы насыщающего вещества в свободном состоянии. Необходимые условия: наличие неустойчивого химического соединения, способного разлагаться при повышенных температурах.
 - 2) **адсорбция** (поглощение) активных атомов насыщающего вещества поверхностью обрабатываемого металла. Необходимое условие - отсутствие на поверхности масляных и окисных пленок.
 - 3) **Диффузия** адсорбированных атомов насыщающего вещества вглубь металла.

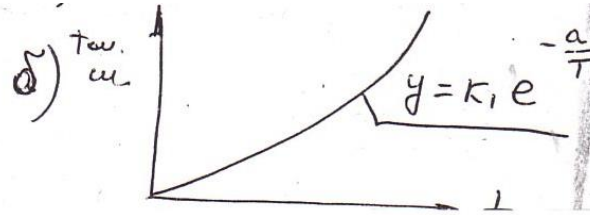
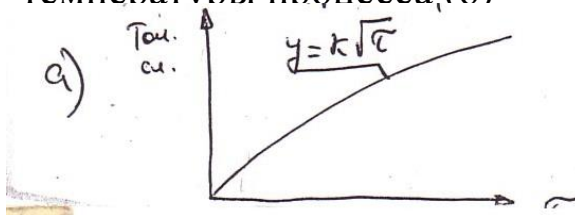
ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Скорость диффузии, выражаемая коэффициентом диффузии, определяется параметрами решетки насыщаемого металла, размером атомов насыщающего вещества, температурой процесса и временем обработки. Коэффициент диффузии определяется по формуле:

$$D = A * e^{-Q/RT}, \text{ где:}$$

- A- параметр, зависящий от кристаллической решетки;
- e- основание натурального логарифма (2, 718);
- Q - энергия активации – дополнительная энергия, необходимая для перемещения атомов в веществе, кал/гр.атом;
- R - газовая постоянная;
- T – абсолютная температура процесса, °К.

- Зависимость толщины диффузионного слоя от продолжительности насыщения (а) и температуры процесса, (б)



Насыщающее вещество может находиться:

- В твердой фазе
- В жидкой фазе
- В газообразной фазе - наиболее экономично, высокая производительность процесса, полная автоматизация, можно контролировать качество насыщаемой поверхности, можно совмещать ХТО с термической обработкой

Химико-термическая обработка

- это технологический процесс, при котором некоторыми элементами насыщается поверхностный слой стальных деталей с целью изменения его химического состава, а следовательно, структуры и свойств.

Различают три стадии химико-термической обработки:

- **диссоциация** - процесс, протекающий во внешней среде и приводящий к выделению диффундирующего элемента в атомарном состоянии;
- **адсорбция** диффундирующего элемента поверхностью металла и растворение его в металле;
- **диффузия** элемента вглубь насыщаемого металла.

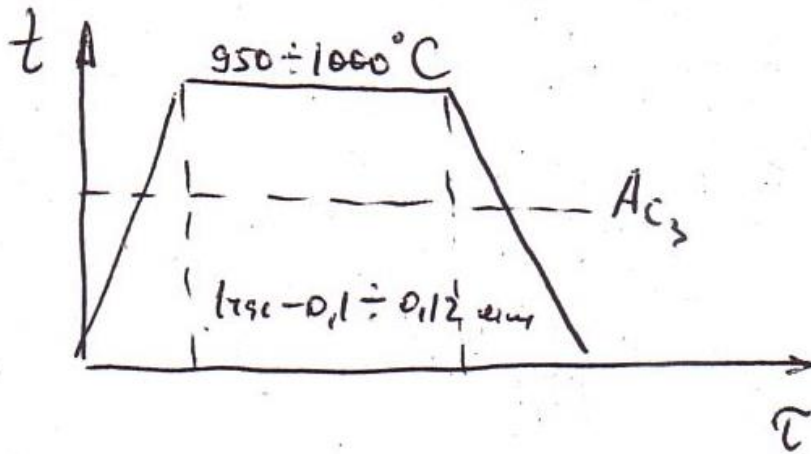
Толщина слоя L зависит:

- от продолжительности насыщения τ . При $t = \text{const}$ $L = k_1 \sqrt{\tau}$.
- от температуры. При $\tau = \text{const}$ $L = k_2 e^{Q/RT}$ (где Q - энергия активации диффузионных процессов).

Толщина слоя тем больше, чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности.



Цементация стали



- Цементация стали заключается в насыщении ее углеродом с целью повышения поверхностной твердости, износостойкости, и усталостной прочности деталей.
- Цементации подвергают детали, испытывающие в процессе эксплуатации тяжелые нагрузки и повышенные температуры (до 200°C), это шестерни, поршневые пальцы, крестовины и т.д. Цементации подвергают детали из низкоуглеродистых сталей ($C=0,1 \dots 0,25\%$) марок 15, 20, 20X, 18ХГТ, 12ХНЗА, 20ХГНМ.
- При цементации содержание углерода в поверхностном слое доводят до 0,8...1,0%, толщину слоя получают до 2,5 мм
- При наличии в стали карбидообразующих элементов Mn, Cr, V, W, Mo возможно образование карбидов и повышение общего содержания углерода до 1,8...2,0%

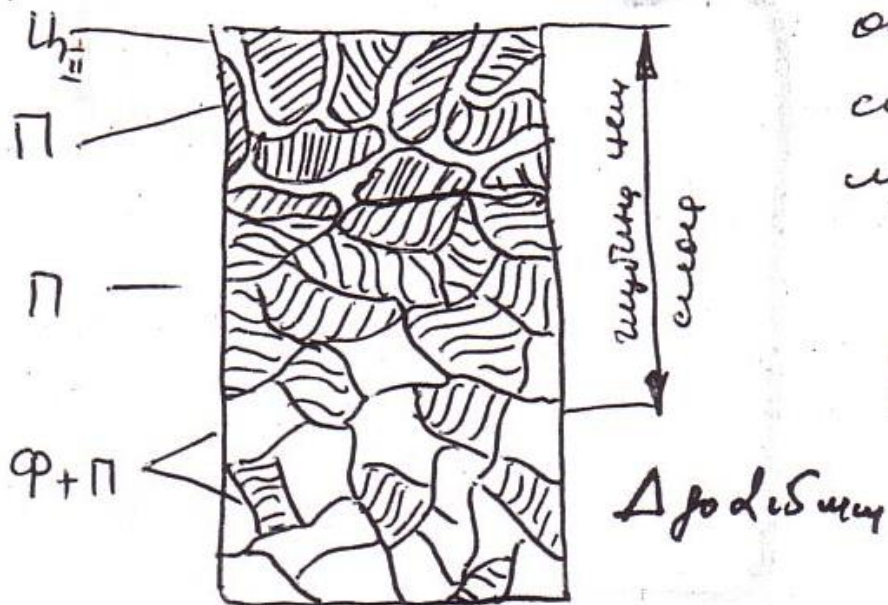
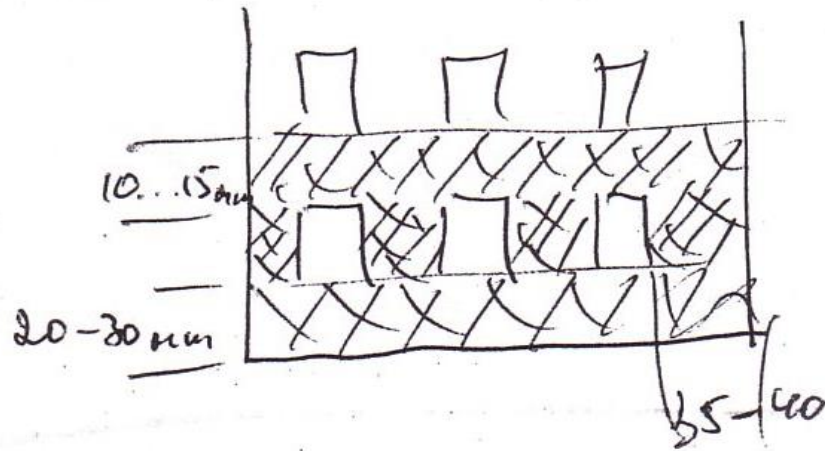
Цементация проводится:

- В твердой фазе: древесный уголь + активаторы;
- В жидкой среде;
- В газообразной фазе: в смеси 5...8% природного газа и 92...95% эндогаза (20%CO, 40% H₂ и 40% N₂)

Режим цементации:

- температура 950...1000°C,
- глубина насыщения до 2,5мм,
- твердость HRC58...62.

Цементация в твердом карбюризаторе



- Карбюризатор состоит из 70...75% древесного угля, 25...25% $BaCO_3$ (углекислый барий) и до 3,5% $CaCO_3$ (углекислый кальций)
- Детали укладываются в металлические ящики, которые герметически упаковывают и помещают в печь с температурой $T=930...950^{\circ}C$.
- Продолжительность выдержки зависит от размеров ящика и составляет 5,5...14 часов.
- Затем ящик охлаждают на воздухе до $400...450^{\circ}C$ и открывают.
- В результате цементации растет зерно, а в поверхностном слое появляется цементитная сетка.
- После цементации получают структуру, изменяющуюся (от поверхности к сердцевине) в следующей последовательности: перлит и цементит вторичный, перлит, перлит и феррит.

Газовая цементация

- Осуществляется в смеси газов: 92...95% эндогаза (20%CO, 40% H₂ и 40% N₂) и 5...8% природного газа при температуре 930...950оС в течение 6...12 часов в печах непрерывного действия и в течение 3...10 часов в шахтных печах.
- После цементации для наследственно мелкозернистых сталей производится подстуживание до 840...860°С и закалка с низким отпуском. В остальных случаях термообработка проводится как при цементации в твердом карбюризаторе.
- Для уменьшение коробления возможна ступенчатая закалка в масло при T= 160...180°С, а потом в воду. После цементации структура поверхностного слоя - Мотп + Аост, а сердцевины - Ф+П. детали имеют высокую износостойкость и контактную прочность, рабочая температура – до 200°С.

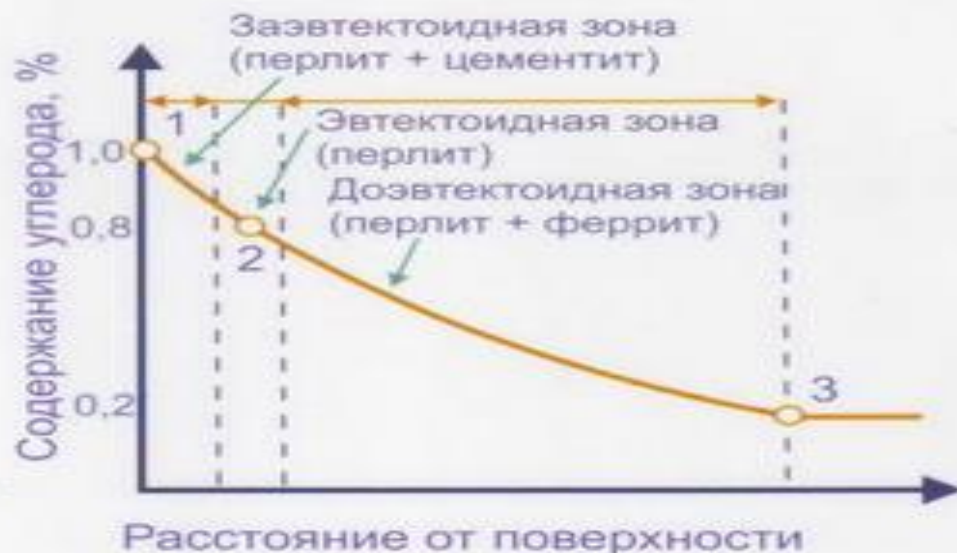
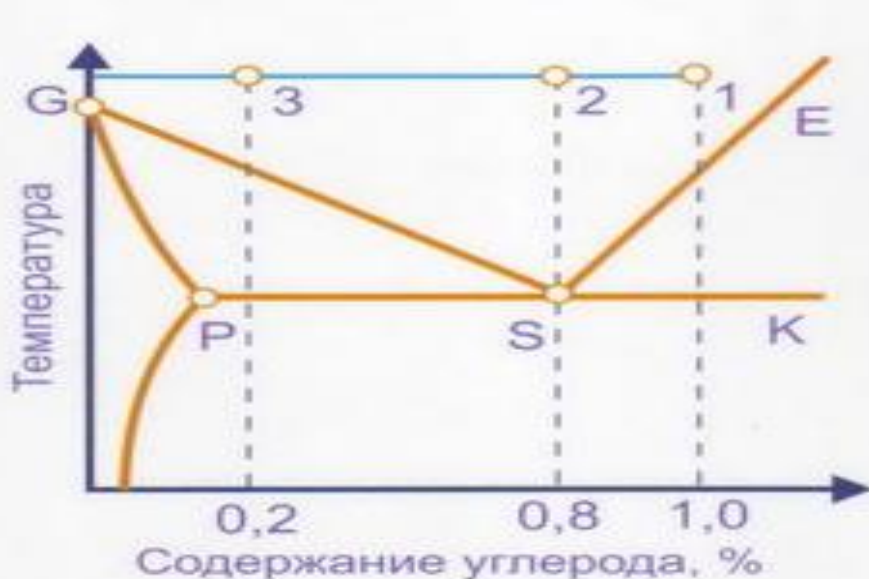
Цементация стали

- процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом.

Такой обработке подвергают стали с 0,10 - 0,20% С.

Содержание углерода в поверхностном слое - 0,8 - 1,0% С.

Толщина науглероженного слоя - 0,5 - 2,0 мм.



Цементация в твердом карбюризаторе. Процесс осуществляют при 910-930°C в карбюризаторе, состоящем из **древесного угля, 20-25% BaCO₃ и 3-5% CaCO₃.**



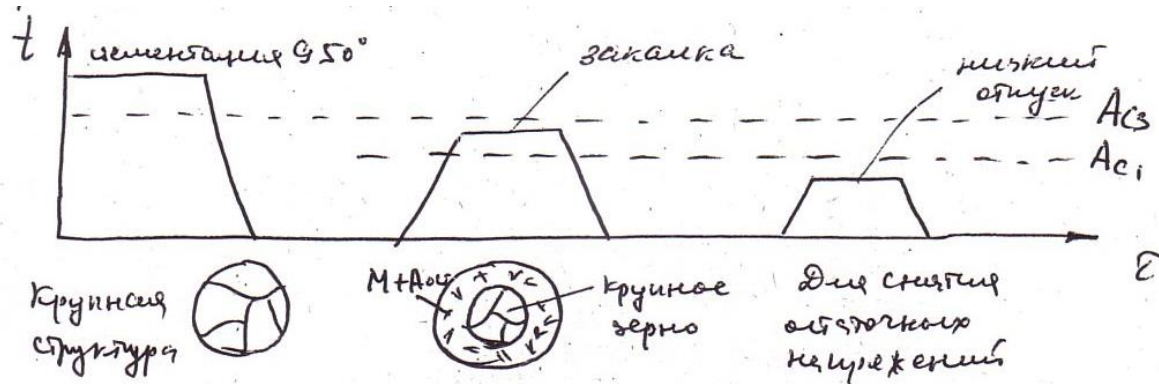
Газовая цементация проводится при 930-950°C с использованием природного газа или жидких углеводородов (бензола, керосина ...).



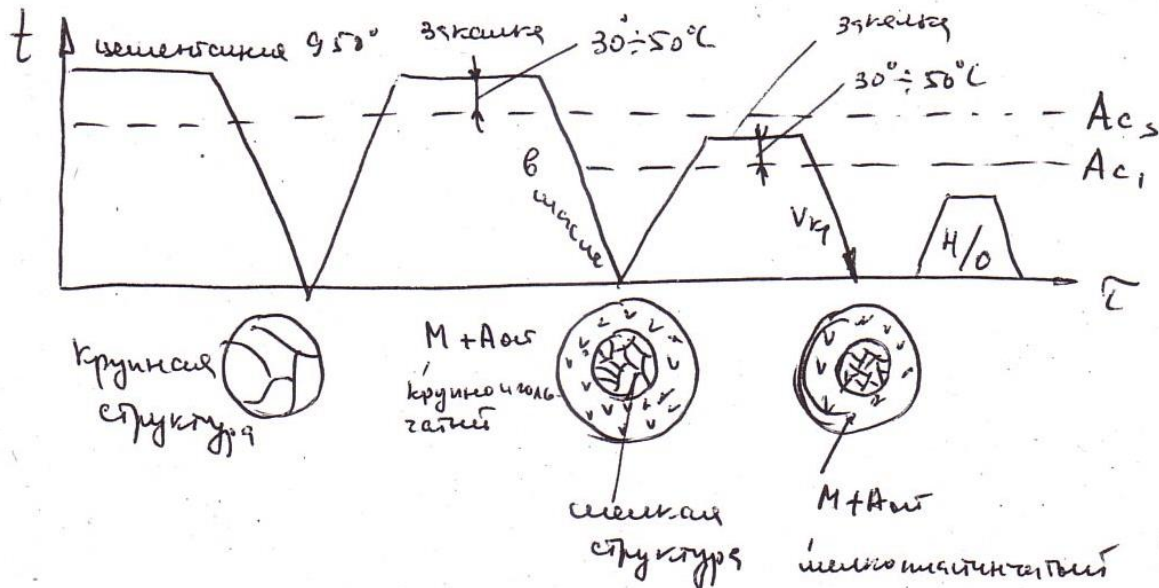
Термообработка после цементации

После цементации применяется термическая обработка:

А) К сердцевине детали не предъявляются повышенные требования



Б) К детали предъявляются повышенные требования



Термическая обработка цементованных изделий

Она заключается в закалке и низком отпуске. После такой термической обработки твердость поверхностного слоя детали достигает **58-62 HRC** при твердости сердцевины **25-35 HRC** и ниже.

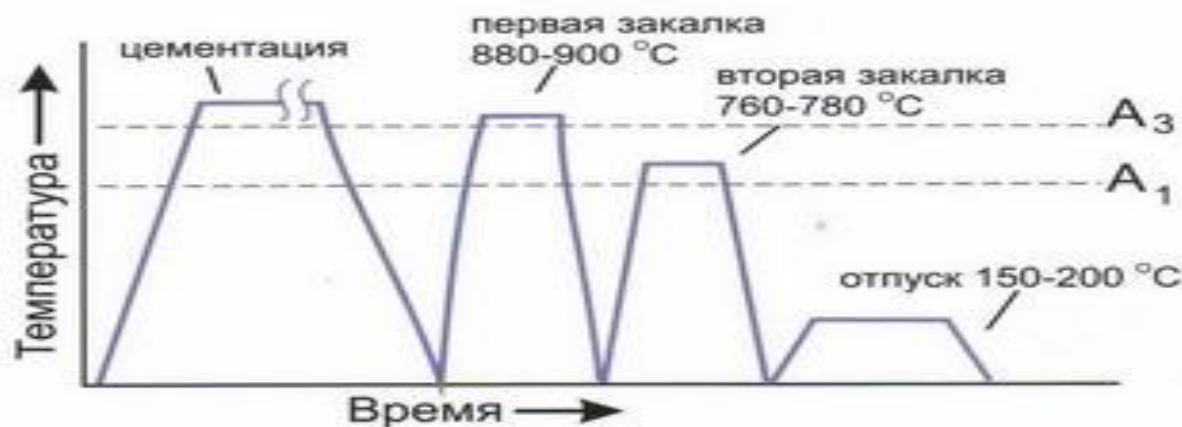
Закалка с цементационного нагрева.



Однократная закалка



Двойная закалка

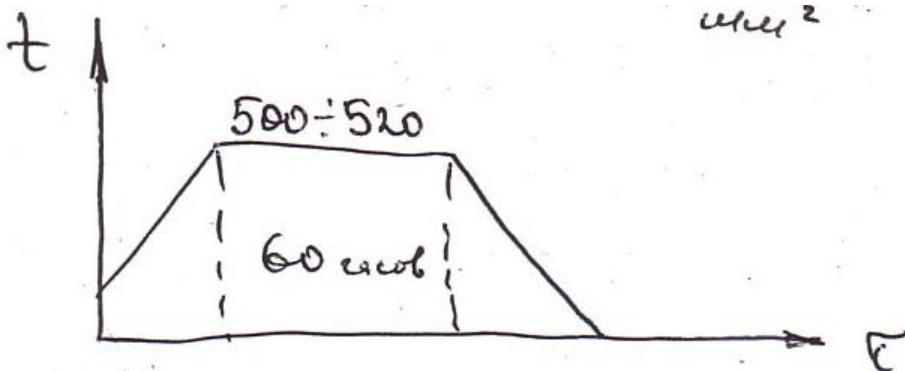


Азотирование

- **Азотирование** – это насыщение поверхностного слоя азотом с целью повышения поверхностной твердости, износостойкости, усталостной прочности деталей, работающих в условиях трения при повышенных температурах (до 500...600°C) и средних нагрузках.
- Выполняют азотирование в атмосфере аммиака при 520...600°C.

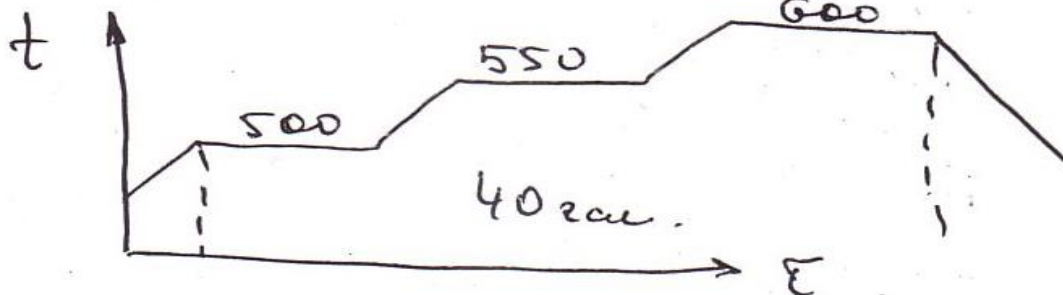
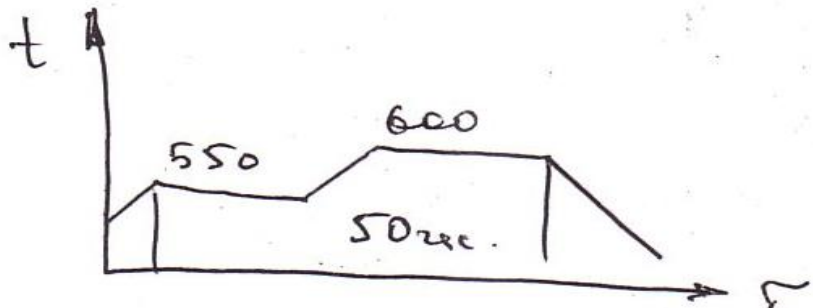
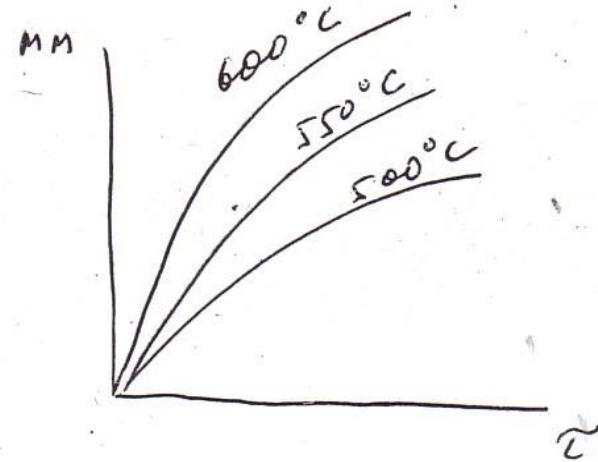
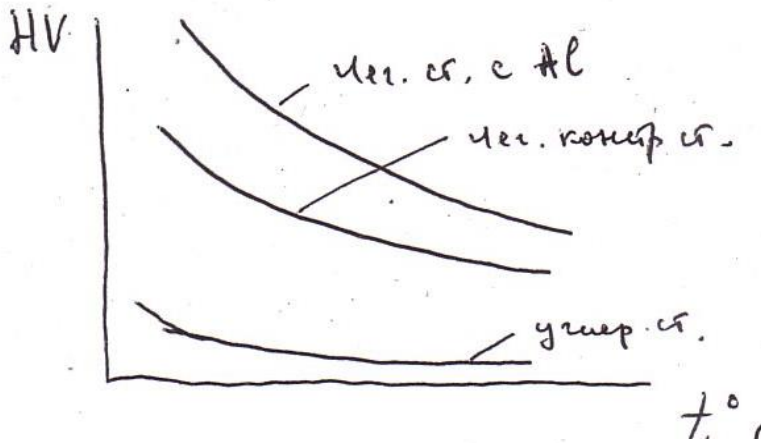


- Так как твердость нитридов железа невысока (HV300...500), то азотируют стали, легированные Al, Cr, Mo, W, V. Нитриды этих элементов имеют твердость до HV600...1200. Для повышения твердости, износостойкости подвергаются легированные среднеуглеродистые (0,3...0,5%С) стали с алюминием: 38ХМЮА, 35ХВФЮА.
- Режим азотирования: $T = 500...520^\circ\text{C}$, продолжительность ≈ 60 час, толщина слоя 0,5...0,8 мм, твердость HV850...900 (11000...12000Н/мм²)



Азотирование

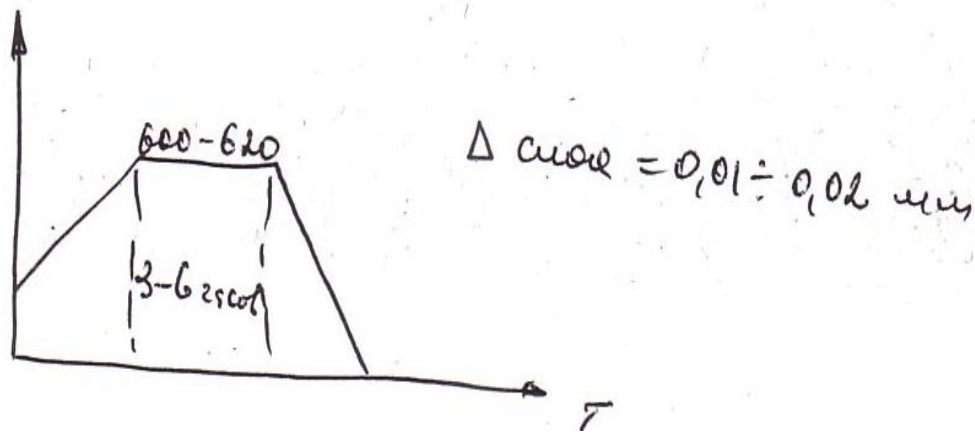
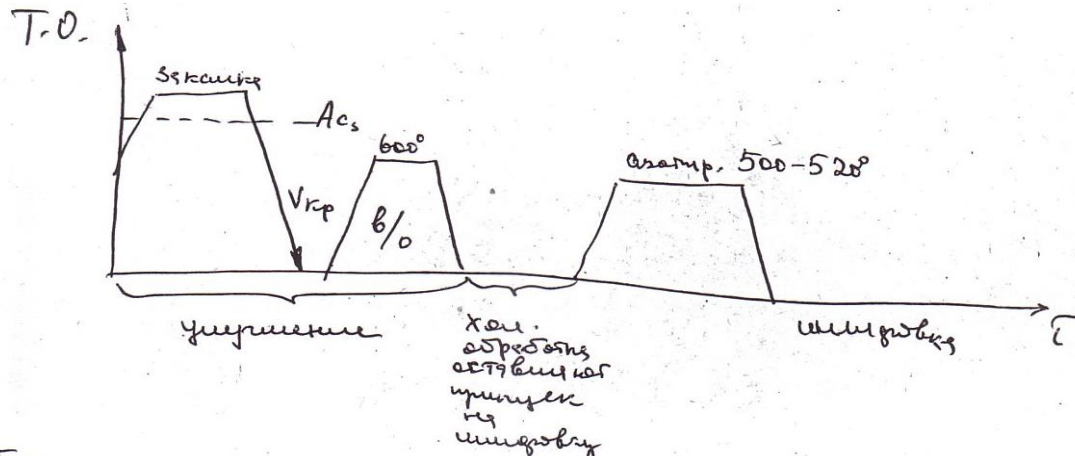
- Влияние температуры и продолжительности азотирования на твердость и толщину азотированного слоя приведено на рисунках ниже.



Для сокращения продолжительности азотирования проводят по ступенчатому режиму (режимам)

Азотирование

Последующая термообработка не производится, однако, для улучшения структуры и свойств сердцевины перед азотированием делают улучшение.



- Азотированию подвергаются гильзы цилиндров быстроходных судовых дизелей (суда ПК), детали топливной аппаратуры дизелей, детали ДВС, штампы, прессформы.
- Рабочая температура – до 550°C.
- **Азотирование для повышения коррозионной стойкости** выполняется при 600...700°C, выдержка 0,25...10 час, толщина слоя 0,01...0,03 мм (любой материал)
- Возможно азотирование в жидкой среде – в расплавах солей (KCN , NaCN , Na_2CO_3) при температуре 570°C, однако эти соли дороги и токсичны.

Азотирование стали

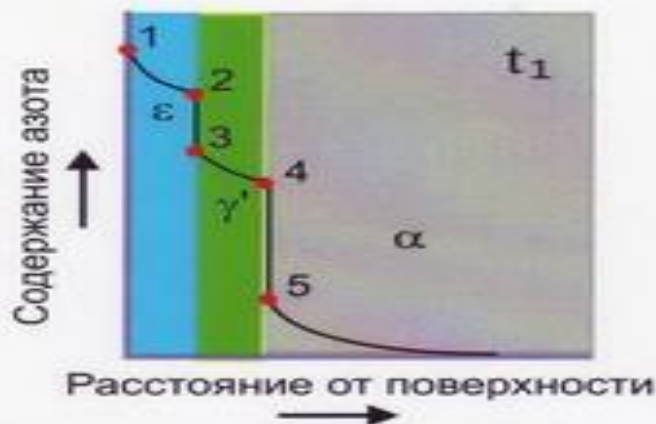
Азотирование - процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей азотом.

Диаграмма Fe - N



α – азотистый феррит
γ – азотистый аустенит
γ' – нитрид Fe₄N
ε – нитрид Fe₃N

Азотирование проводят в среде аммиака:
 $2\text{NH}_3 \Rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$
Температура азотирования 500 - 600°C
Толщина слоя 0,3 - 0,6 мм



Цианирование

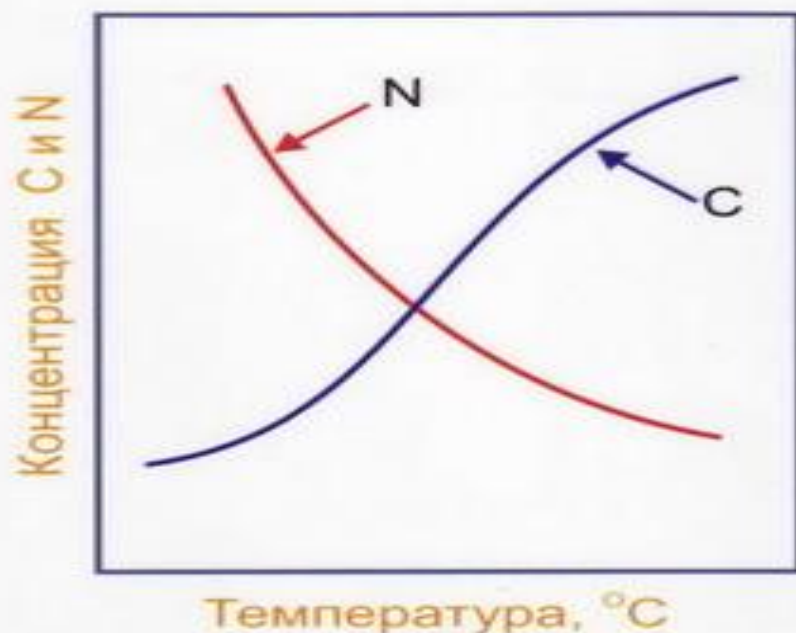
- **Цианирование** – это насыщение поверхности детали в расплавах солей (KCNO , NaCN , Na_2CO_3) при температуре $820\dots 860^\circ\text{C}$ в течение $0,5\dots 1,5$ час, на толщину $0,15\dots 0,35$ мм
- Содержание в поверхностном слое: $\text{C}=0,6\dots 0,8\%$; N $0,8\dots 1,2\%$, твердость поверхности $\text{HRC}58\dots 62$
- После цианирования производится закалка непосредственно из ванны и низкой отпуск ($160\dots 180^\circ\text{C}$). Применяется для упрочнения мелких автомобильных деталей. По сравнению с цементацией - выше износостойкость и предел выносливости.
- Возможен другой состав ванны (NaCN , NaCl , BaCl_2). При этом содержание в поверхностном слое $\text{C}=0,8\dots 1,2\%$; $\text{N}=0,2\dots 0,3\%$, толщина слоя $0,5\dots 2,0$ мм, твердость $\text{HRC}58\dots 62$.
- После цианирование производится охлаждение на воздухе, закалки и низкий отпуск. Применяется вместо цементации, так как выше производительность, выше износостойкость деталей, выше сопротивление коррозии и меньше коробление.

Нитроцементация

- **Нитроцементация** - это насыщение углеродом и азотом в газовой среде (аммиак, метан и эндогаз) при температуре $840\dots 860^\circ\text{C}$, в течение $4\dots 10$ часов. Толщина слоя после нитроцементации $0,6\dots 0,8$ мм, содержание в слое $\text{C}=0,8\dots 1,2\%$; $\text{N}=0,2\dots 0,3\%$
- Последующая термическая обработка – закалка (можно из печи) с подстуживанием до $800\dots 820^\circ\text{C}$ и низкий отпуск ($160\dots 180^\circ\text{C}$). Микроструктура поверхностного слоя – Мотп, карбонитриды и $30\dots 50\%$ Аост. Твердость $\text{HRC}58\dots 60$.
- Подвергают детали сложной формы, по сравнению с газовой цементацией выше сопротивление износу и коррозии, а так как слой тоньше и температура насыщения ниже – меньше коробление

Нитроцементация стали

Нитроцементация - процесс совместного насыщения поверхности стальных деталей углеродом и азотом. Она проводится либо в расплавленных цианистых солях (жидкостная нитроцементация или цианирование) либо в смеси науглероживающих газов и аммиака (газовая нитроцементация)



Различают высокотемпературную и низкотемпературную нитроцементацию.

Высокотемпературная нитроцементация

Температура процесса: 820 - 960°C
толщина диффузионного слоя -
- 0,15 - 2,00 мм

После нитроцементации производят закалку и низкий отпуск.

Твердость диффузионного слоя после термической обработки 58 - 62 HRC.

Низкотемпературная нитроцементация

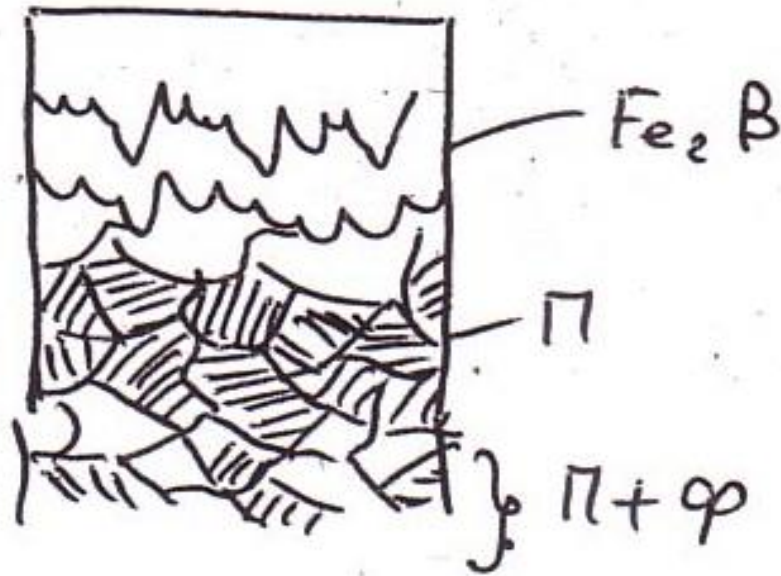
Температура процесса: 560 - 580°C
толщина диффузионного слоя -
- 0,2 - 0,6 мм.

Перед низкотемпературной нитроцементацией проводится **улучшение** - термическая обработка состоящая из закалки и высокого отпуска.

В основе жидкостной нитроцементации лежат следующие основные химические реакции:



Борирование



- Режимы борирования: электролиз в соляных ваннах (деталь – катод, два анода опускают по бокам) в расплаве буры ($Na_2B_4O_7$), при температуре $930...950^{\circ}C$ в течение $2...6$ часов, плотность тока $0,15...0,2 A/cm^2$

- Борирование – это насыщение поверхности изделия бором с целью повышения поверхностной твердости и износостойкости деталей, особенно работающих в условиях абразивного изнашивания (в контакте с песком, грунтом), а также штампов горячего деформирования.
- Борированию подвергаются любые стали и чугуны. Область применения - пальцы траков гусеничных машин, пальцы черпаковых цепей землеснарядов, зубья и обода ковшей экскаваторов и землеснарядов, детали кузнечно-прессового оборудования.

Толщина слоя – $0,1...0,2$ мм, твердость HV $1800...2000$ ($15000...20000 N/mm^2$). Окончательной термообработки нет. Высокая твердость обеспечивается за счет боридов железа (FeB, Fe_2B)

Сульфацианирование

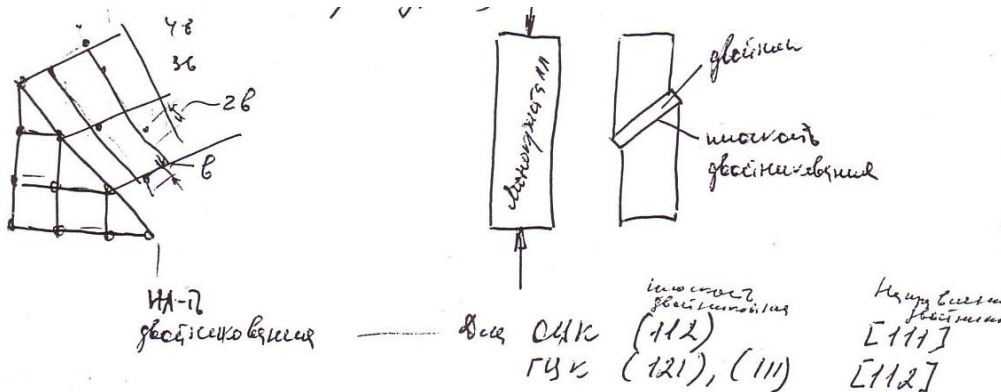
- **Сульфацианирование** - это насыщение поверхности серой, углеродом, азотом с целью повышения твердости, износостойкости, противозадирных свойств (сопротивление схватыванию, сваривание при трении). Сульфацианированию подвергаются любые стали и чугуны. После сульфацианирования тремической обработки не требуется. Режим сульфацианирования: температура -600°C , время 2 часа, толщина слоя $0,5 \dots 0,6$ мм. Распространение зоны сульфидов и карбонитридов – до 1,0 мм.
- Область применения: фрикционные диски судовых реверсредукторов и коробок передач тракторов, поршневые кольца, тормозные колодки.

Аллитирование - насыщение алюминием для повышения жаростойкости

Пластическая деформация. Наклеп

- **Пластическая деформация** – это деформация остающаяся после снятия нагрузки. Она характеризуется степенью деформации. Структурные изменения приводят к изменению свойств. Границы ячеек и субзерен затрудняют движение дислокаций и генерирование новых, поэтому для осуществления деформации необходимы более высокие нагрузки, то есть происходит упрочнение.
- **Наклеп** – это совокупность изменений структуры и вызванных ими изменений свойств при холодном пластическом деформировании. Зависимость свойств от степени деформации для дюралюминия приведена в таблице.

$\epsilon, \%$	0	10	80
Предел прочности, кгс/мм ²	1	1,6	-
Предел текучести, кгс/мм ²	1	1,1	1,5...2, 0
Относительное удлинение, %	1	0,5	0,1



С увеличением степени деформации возрастают прочностные свойства и снижаются пластические.

Двойникование - процесс пластического деформирования при $\epsilon < 10\%$, когда на участке кристалла толщиной в несколько микрон происходит смещение атомных плоскостей относительно плоскости двойникования, величина смещения каждой плоскости пропорциональна ее расстоянию от плоскости двойникования. В результате обе части кристалла становятся как бы зеркальным отражением друг друга.

Двойникование происходит в случаях, когда затруднено скольжение (особенно при низких температурах)

Поверхностное пластическое деформирование (ППД)

ППД осуществляется путем:

А) Накатывания стальными шариками или роликами.

- Диаметр шариков или роликов $D = 10 \dots 20$ мм, твердость HRC 60 с жестким или упругим контактом между инструментом и поверхностью.
- Толщина деформированного слоя $\delta = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_{0,2}}}$
-
- $P = 160 \dots 180$ кг, низкоуглеродистая сталь
- $P = 180 \dots 190$ кг, среднеуглеродистая сталь
- $P = 270 \dots 300$ кг, высокоуглеродистая сталь
- $S = 0,1 \dots 0,2$ мм/об
- $V = 50 \dots 100$ м/мин, применяют СОЖ

Б) Алмазного выглаживания оправкой с алмазом

- $R = 2 \dots 3$ мм, низкоуглеродистая сталь, цветные металлы
- $R = 0,5 \dots 1,5$ мм, материалы с HRC 58...64
- $P = 5 \dots 35$ кг, $S = 0,02 \dots 0,1$ мм/об, $V = 20 \dots 200$ м/мин

В) Дробеструйным наклепом

Г) Центробежно-шариковым наклепом

Д) Взрывом

- При ПДД в упрочненном слое повышается плотность дислокаций, измельчаются блоки уменьшается количество Аост при обработке закаленной стали.
- Повышение твердости и уменьшение макронеровностей (шероховатости) поверхности повышает износостойкость в 1,5...2,0 раза. Увеличивает сопротивление схватыванию и фреттинг-коррозии.
- В процессе ПДД деформируемый слой стремится увеличить свою поверхность, а нижележащие слои препятствуют этому. В результате в поверхностном слое возникают напряжения сжатия, что повышает предел выносливости особенно при наличии концентраторов напряжений. ПДД повышает предел сопротивления коррозионной и контактной усталости.