Термическая обработка металлов

Сущность и назначение термической обработки

Термической обработкой сплавов системы **Fe-C** называют совокупность операция нагрева и охлаждения сплавов с целью изменения фазового состава и получения заданных механических свойств.

Назначение термической обработки металлов

— получение требуемой твердости, улучшение прочностных характеристик металлов и сплавов.

Классификация видов термической обработки

Особенности видов обработки

- **термическая обработка** – только термическое воздействие
- **химико-термическая** – сочетание термического и химического воздействия
- **термомеханическая** – сочетание термического воздействия и пластической деформации

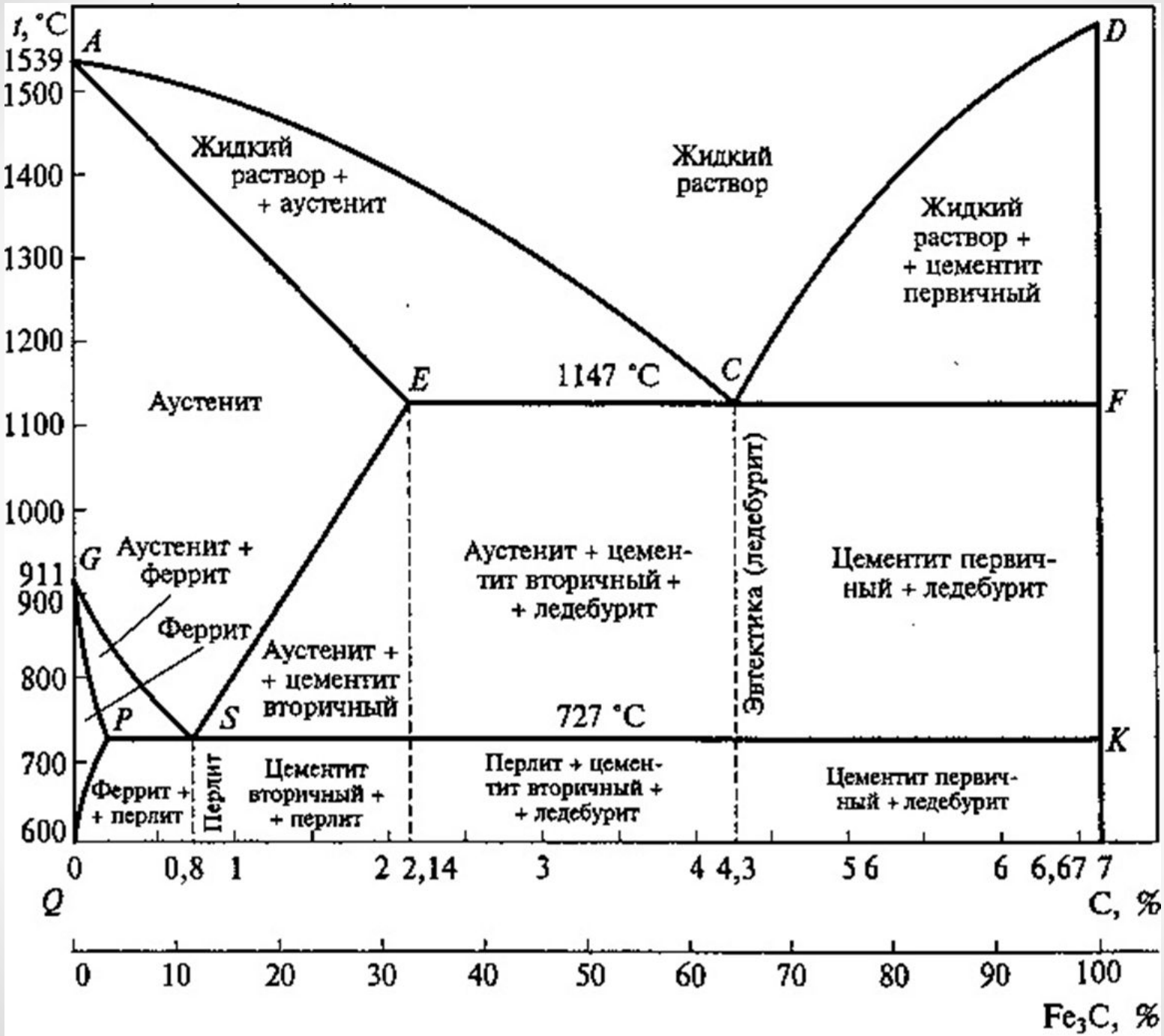
Фазовые превращения в сталях при термической обработке

Для установления режимов термической обработки необходимо знать температуры, при которых в стали происходят превращения.

Такие температуры называются критическими и обозначаются буквой **А** с индексами (например, $\mathbf{A_1}$, $\mathbf{A_2}$ $\mathbf{A_3}$ и др.).

Если рассматривается процесс нагревания, то к индексу добавляется буква **«с»**,

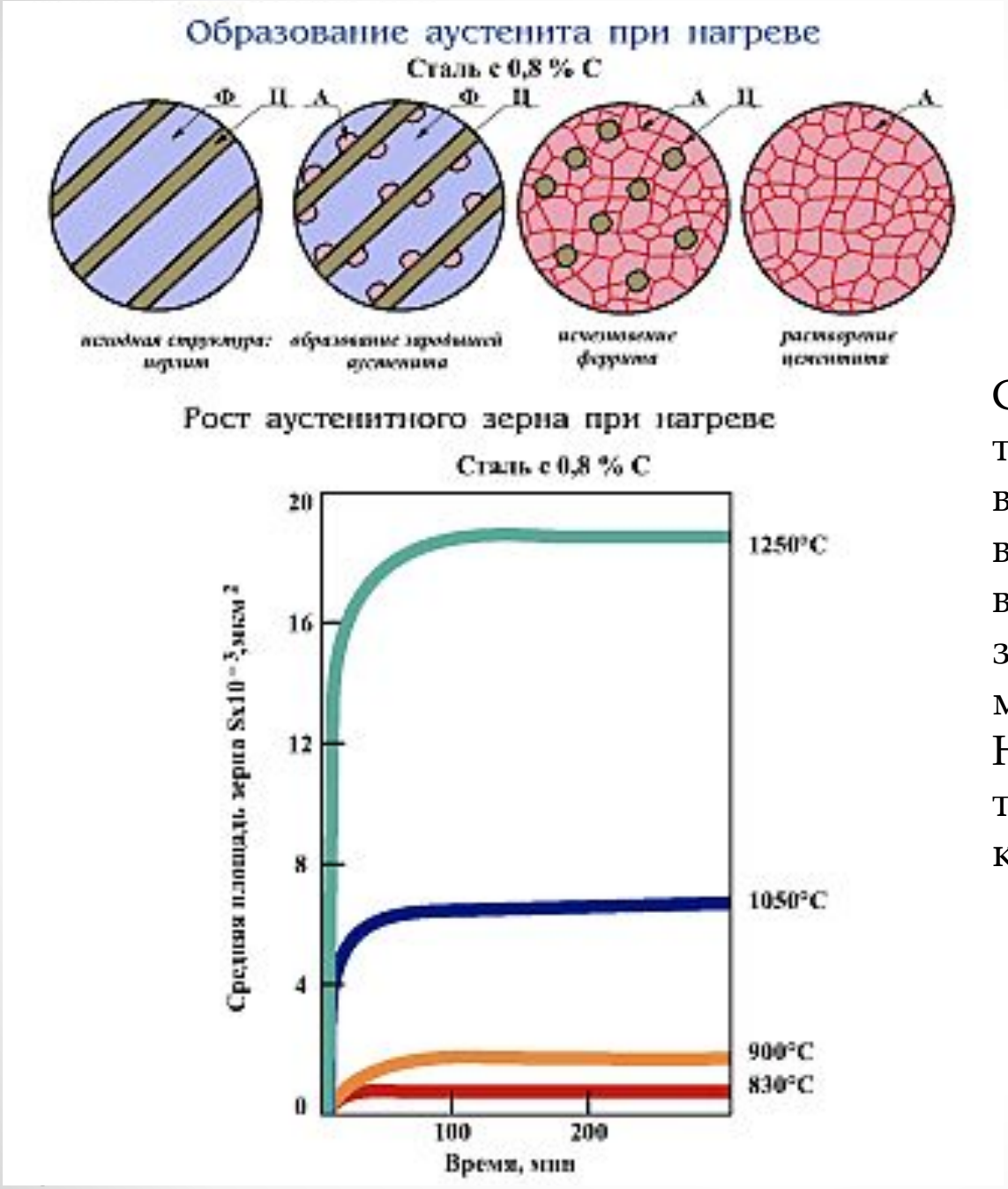
если охлаждение – буква **«r»**.


t, °C
1539
1500
1400
1300
1200
1100
1000
911
900
800
700
600
A
D
Жидкий раствор + + аустенит
Жидкий раствор
Жидкий раствор + + цементит первичный
E
1147 °C
C
F
Аустенит
G
Аустенит + феррит
Феррит
Аустенит + цементит вторичный + + ледебурит
Эвтектика (ледебурит)
Цементит первичный + ледебурит
Аустенит + + цементит вторичный
P
S
727 °C
K
Феррит + + перлит
Перлит
Цементит вторичный + + перлит
Перлит + цементит вторичный + + ледебурит
Цементит первичный + ледебурит
0
0,8
1
2
2,14
3
4
4,3
5
6
6,67
7
Q
C, %
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Fe3C, %

Главная цель нагрева стали – получение аустенитной структуры.

Аустенит (по имени английского ученого Аустена) — это твердый раствор углерода (и других элементов) в γ-Fe. Атомы растворенного в аустените углерода располагаются в центре элементарных ячеек решетки.

До нагревания сталь имеет феррито-перлитную структуру, перлитную или перлитно-цементитную.



Сталь нагревают до температуры, на 30-50 С выше линии GSE и выдерживают для выравнивания состава во всех зернах. Образуется мелкозернистая структура.

Нагрев до более высоких температур недопустим, так как приведет к росту зерен.

Главная цель охлаждения стали – превращение аустенита в желаемую структуру: перлит, сорбит, троосит или мартенсит.

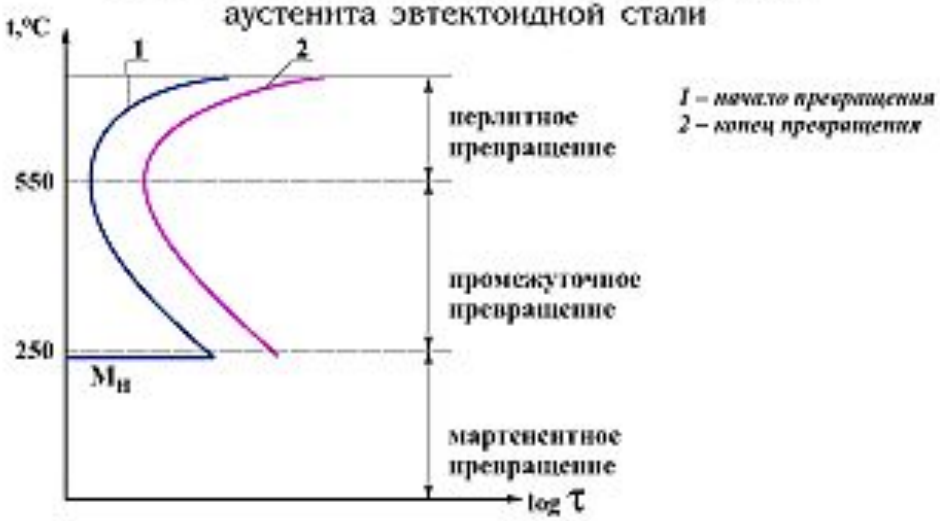
Образование этих структур зависит от скорости охлаждения (табл. 1).

Изменение структуры и твердости углеродистой стали эвтектоидного состава в зависимости от скорости охлаждения

Скорость охлаждения, °С/с	Температура превращения, °С	Структура	Твердость НВ (средние значения), кгс/мм^2
1	700—650	Перлит	200
10	650—600	Сорбит	300
50	600—500	Троостит	400
100	500—300	Троостомартенсит	500
150	300—200	Мартенсит	600

Превращение аустенита при охлаждении

Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали



перлит *сорбит* *троостит*

микроструктуры при увеличении 7500

S_0 - *межпластинчатое расстояние*

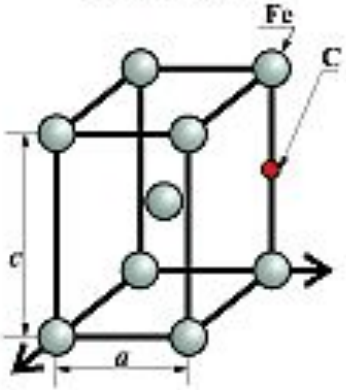
Различают:

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

Мартенситное превращение

Мартенсит - *пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α - железе*

Кристаллическая ячейка мартенсита

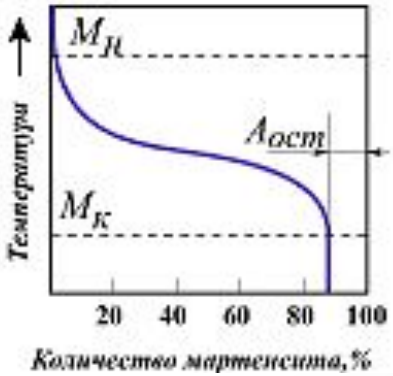


$\frac{c}{a}$ - *степень тетрагональности решетки мартенсита*

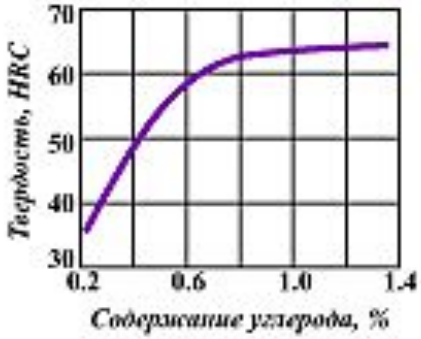
Структура мартенсита

x 100

Кривая мартенситного превращения



Зависимость твердости мартенсита от содержания углерода



Виды термической обработки

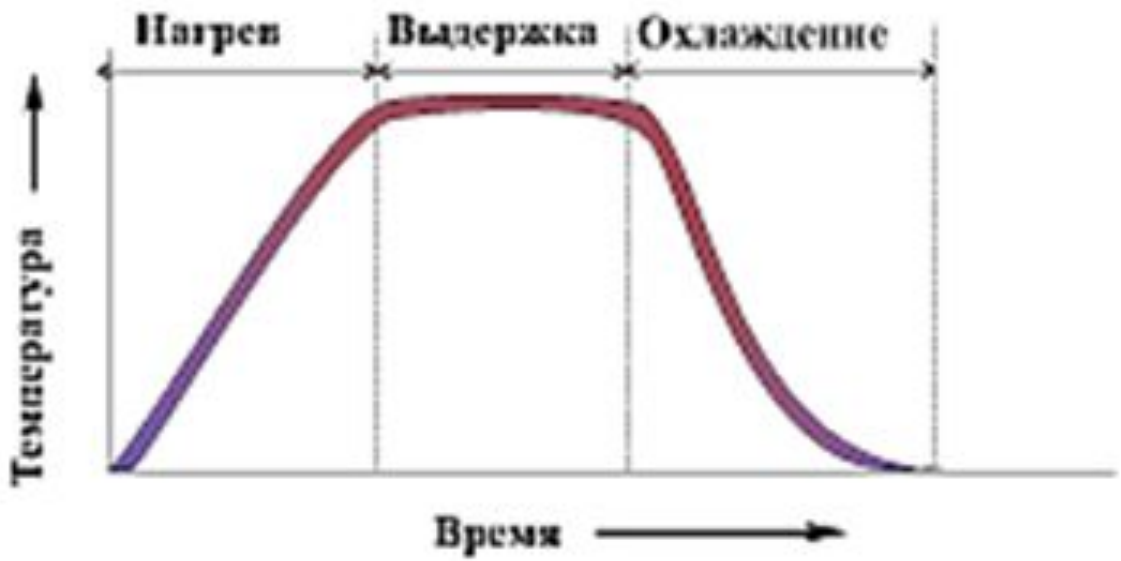
- **Отжиг** - устраняет химическую неоднородность, уменьшает внутренние напряжения.

- **Закалка** – проводится для сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве и охлаждении, с целью повышение твердости и прочности путем образования неравновесных структур (сорбит, троостит, мартенсит).

- **Отпуск** - проводится с целью снятия внутренних напряжений, снижения твердости и увеличения пластичности и вязкости закаленных сталей

Схема термической обработки

Любой процесс термической обработки может быть описан графиком в координатах температура — время



Основные температурные воздействия

- нагрев до аустенитного состояния, вызывающий фазовую перекристаллизацию;
- охлаждение с различными степенями переохлаждения, при котором происходит превращение аустенита;
- нагрев закаленных сталей до определенных температур, изменяющих их структуру и свойства.

Цвета каления стали

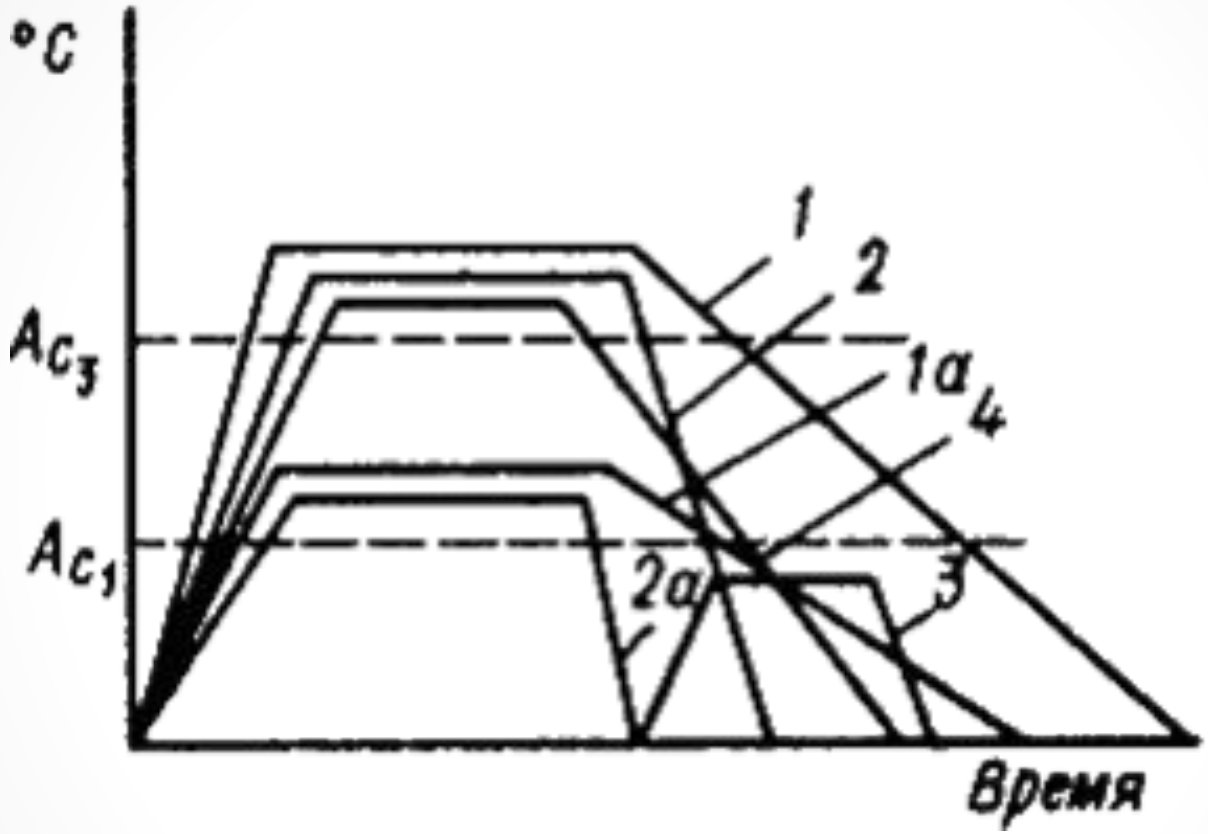
Определение температуры при термической обработке можно производить на основании цвета излучения нагретой стали или с использованием измерительных приборов.

Наименование	t °C
Ослепительно белый	1250 - 1300
Светло-желтый	1150 - 1250
Темно-желтый	1050 - 1150
Оранжевый	900 - 1050
Светло-красный	830 - 900
Светло-вишнево-красный	800 - 830
Вишнево-красный	770 - 800
Темно-вишнево-красный	730 - 800
Темно-красный	650 - 730
Коричнево-красный	580 - 650
Темно-коричневый	530 - 580

Параметры термической обработки:

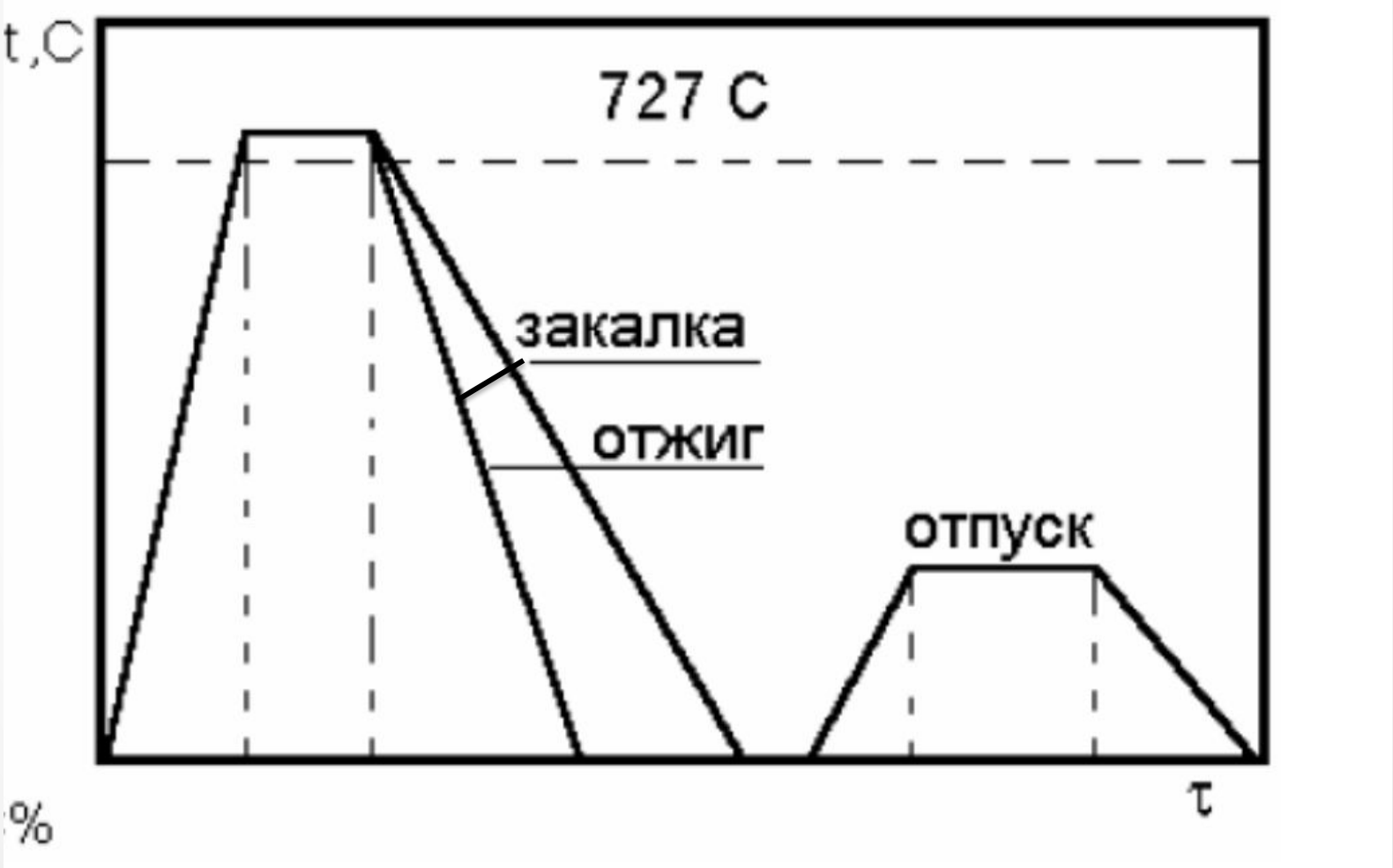
- Максимальная температура нагрева сплава - t_{max}
- Время выдержки сплава при температуре нагрева r_k
- Скорость нагрева $V_н$
- Скорость охлаждения $V_о$
- Средняя скорость нагрева $V_{н.ср} = t_{max} / r_н$
- Средняя скорость охлаждения $V_{о.ср} = t_{max} / r_о$

Графики различных видов термообработки



Отжиг - (1, 1а), закалка - (2, 2а), отпуск - (3), нормализация - (4)

Графики различных видов термообработки



Отжиг и нормализация.

Назначение и режимы

Отжиг, снижая твердость и повышая пластичность и вязкость за счет получения равновесной мелкозернистой структуры, позволяет:

- улучшить обрабатываемость заготовок давлением и резанием;
- исправить структуру сварных швов, перегретой при обработке давлением и литье стали;
- подготовить структуру к последующей термической обработке.
- Характерно медленное охлаждение со скоростью *30…100°С/ч*.

Отжиг I рода

Цель отжига – устранение отклонений от равновесного состояния, возникающих при технологических операциях. При таком отжиге не используются фазовые превращения.

Получают сталь с минимальной плотностью дислокаций, низкой твердостью и высокой пластичностью.

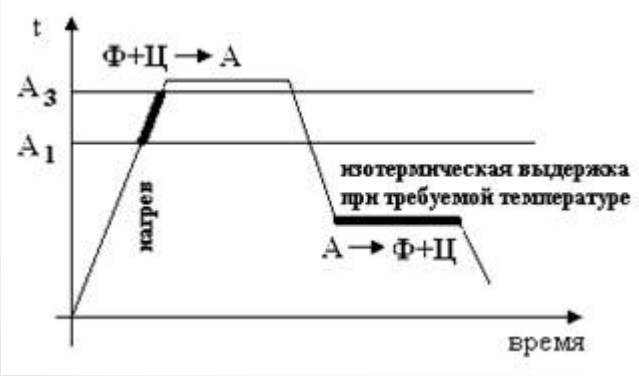
1. ***Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг***, *$T_н$ = 0,8 $T_{пл}$ (1100 -1200° С)*, время выдержки 8-20 часов. Применяют для уменьшения химической неоднородности, образующейся при кристаллизации стали (устранение дендритной ликвации)
2. ***Рекристаллизационный отжиг*** *применяют для снятия наклепа, созданного холодной пластической деформацией, $T_н$ = 0,4 $T_{пл}$ (600-700° С)*
3. ***Отжиг для снятия напряжений после горячей обработки*** применяют для уменьшения напряжений, сохранившихся после окончания литья, сварки, обработки давлением и др., *$T_н$ = 160……700°С*

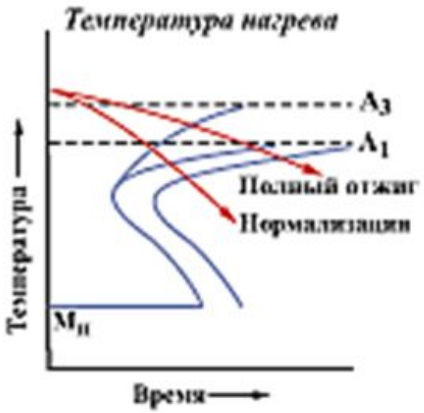
Отжиг I I рода

Эта обработка заключается в нагреве до аустенитного состояния и последующем охлаждении, обеспечивающем протекание перлитного превращения и получения феррито-карбидной структуры. В отличие от отжига I рода проходит с фазовыми превращениями.

1. Полный
2. Неполный
3. Изотермический
4. Нормализация

Полный отжиг:
доэвтектоидных сталей:
Аустенитизация при $t=A_{C3}$ + (30-50°C) + охлаждение со скоростью 150-200 град/час





Неполный отжиг:
доэвтектоидных сталей:

Нагрев в интервал A_{C1}-A_{C3} + охлаждение по режиму полного отжига.

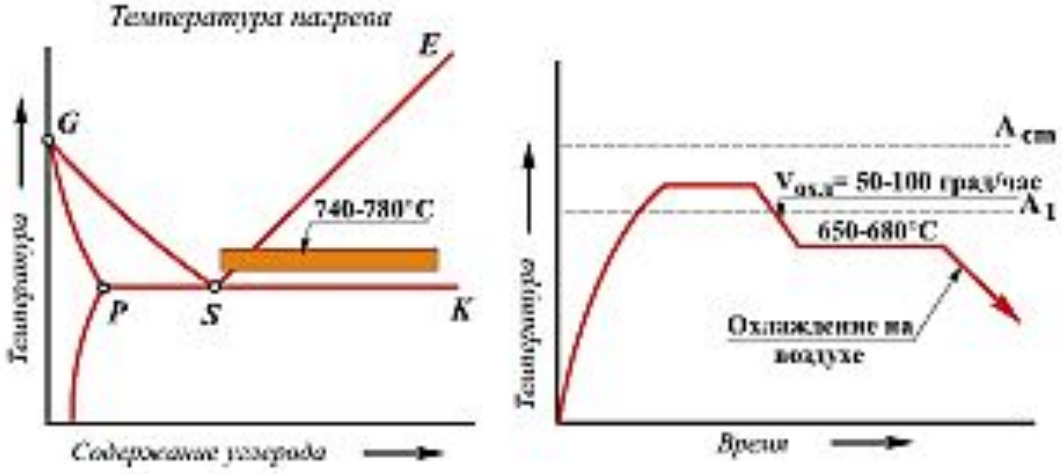
Нормализация

Аустенитизация при $t=A_{C3}$+(30-50°C) для доэвтектоидных сталей и $t=A_{Cm}$ + (30-50°C) для заэвтектоидных + ускоренное охлаждение на воздухе.

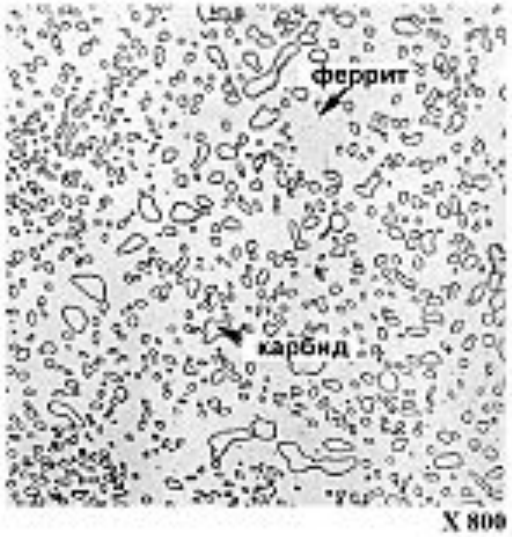
- **Изотермический отжиг**
  вид *отжига* стали, заключающийся в нагреве изделия до аустенитного состояния, выдержке при такой температуре, охлаждении примерно до 600-700 °
  С, новой выдержке до окончания распада аустенита, затем охлаждении до комнатной температуры
- **Нормализация** – нагрев выше линии GSE на 30-50 градусов и выдержка на спокойном воздухе. Структура обладает большей прочностью.

Сфероидизирующий отжиг, заэвтектоидных сталей

Цель отжига – получение структуры зернистого перлита



Структура стали после сфероидизирующего отжига



Закалка

- Нагрев стали до температуры выше критической, выдержка и быстрое охлаждение. Цель закалки – получение неравновесной структуры стали

Закалка

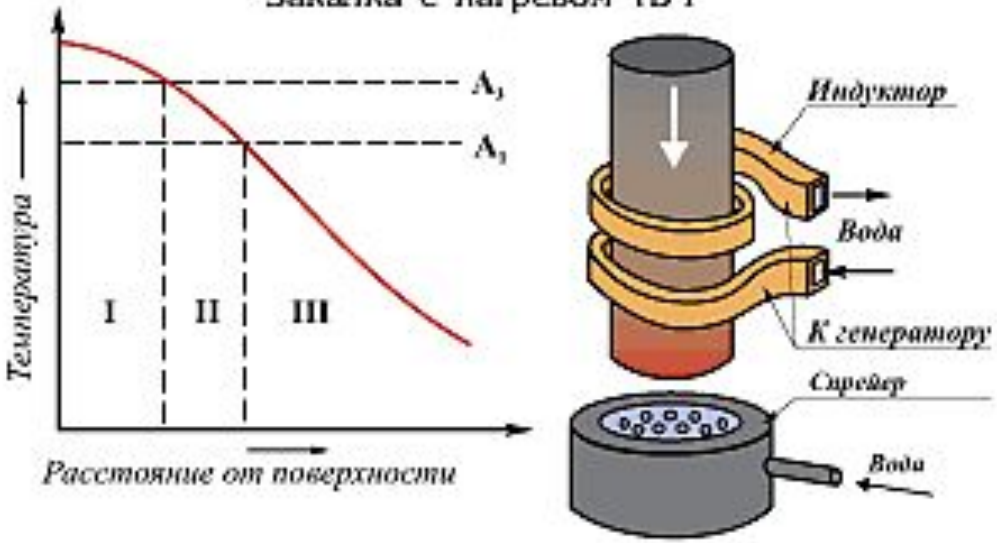
- ***Закаливаемость*** – способность стали приобретать высокую твердость при закалке.

Закаливаемость определяется содержанием углерода. Стали с содержанием углерода менее *0,20 %* не закаливаются.

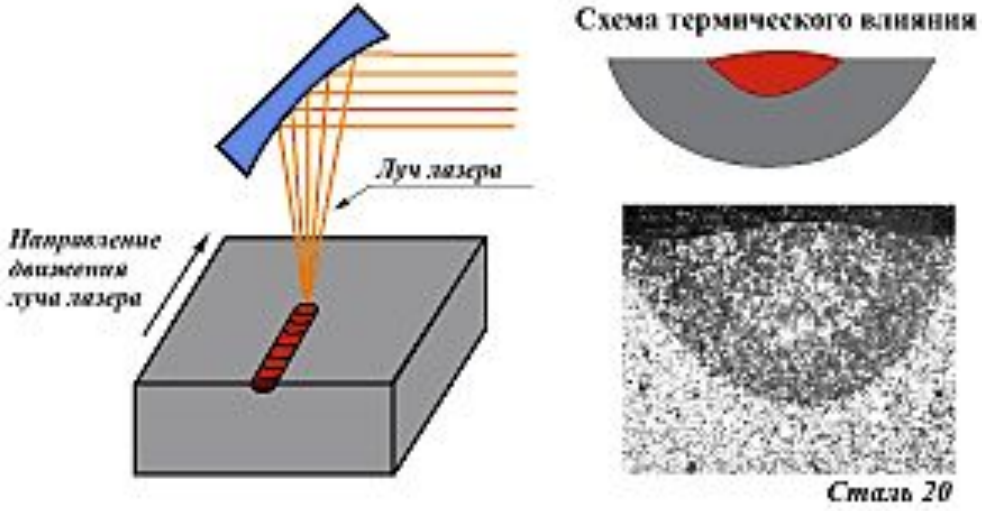
- ***Прокаливаемость*** – способность получать закаленный слой с мартенситной и троосто-мартенситной структурой, обладающей высокой твердостью, на определенную глубину
- ***Критический диаметр*** – максимальное сечение, прокаливающееся в данном охладителе на глубину, равную радиусу изделия

Поверхностная закалка

Закалка с нагревом ТВЧ

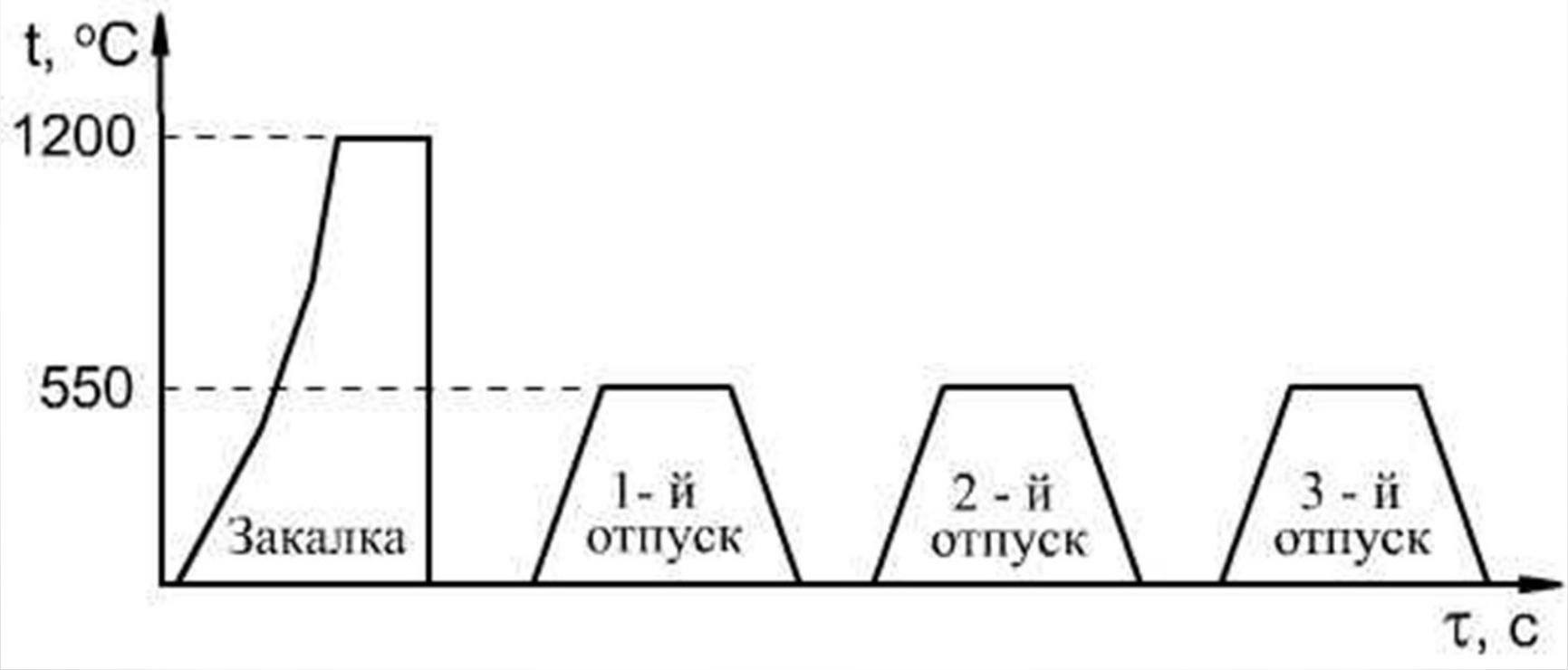


Лазерная закалка



Отпуск

Нагрев закаленной стали до температур ниже фазовых превращений с последующим охлаждением.



Отпуск закаленной стали

Отпуск **– это операция, заключающаяся в нагреве закаленной стали до температуры ниже точки A_1**

Процессы, происходящие при отпуске закаленных углеродистых сталей:

- **распад мартенсита с образованием карбидов (20-350°С)**
- **превращение остаточного аустенита (200-300°С)**
- **сфероидизация и укрупнение карбидов, уменьшение плотности дислокаций(400°С и выше)**

Виды отпуска:

- **низкий отпуск при 120 – 250°С**
- **средний отпуск при 350-450°С**
- **высокий отпуск при 500 – 670°С**

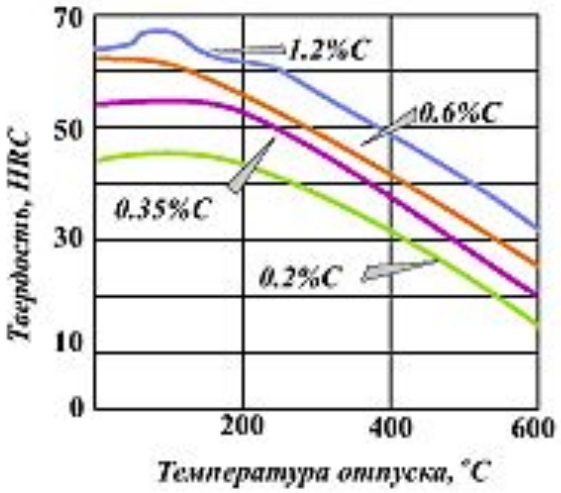
Термическая обработка, включающая закалку и высокий отпуск, называется *улучшением*

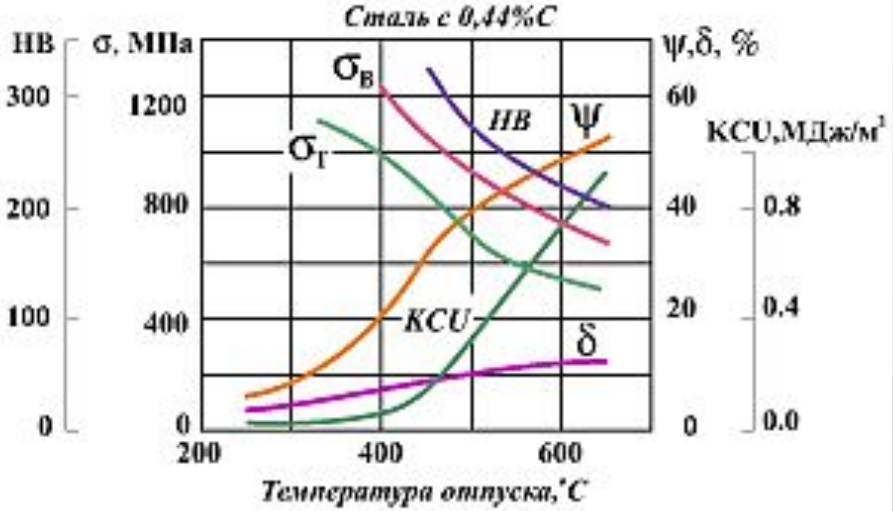
Низкий отпуск

Высокий отпуск

X 17000

Изменение механических свойств при отпуске

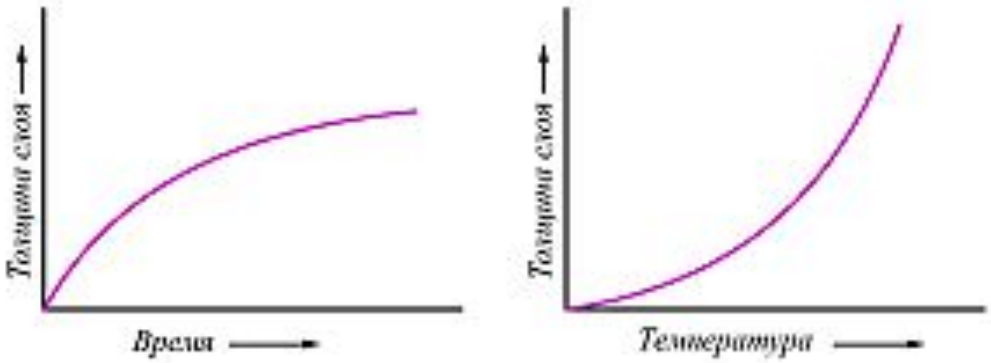




Химико-термическая обработка

- При такой обработке насыщают поверхностные слои изделий одним или несколькими элементами
- Различают три стадии ХТО
  - диссоциация – процесс, протекающий во внешенй 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.

Глубина диффузионного слоя в зависимости от продолжительности процесса и температуры



Основные виды химико-термической обработки стали:

- *цементация;*
- *азотирование;*
- *нитроцементация;*
- *диффузионная металлизация*

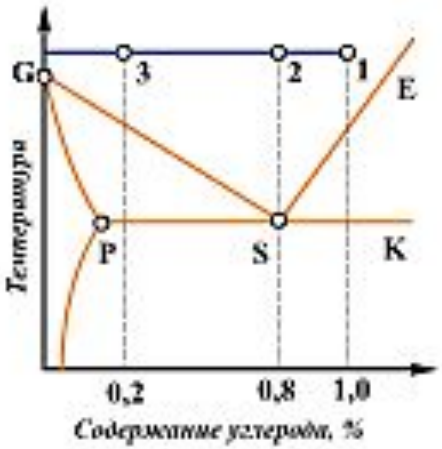
Цементизация

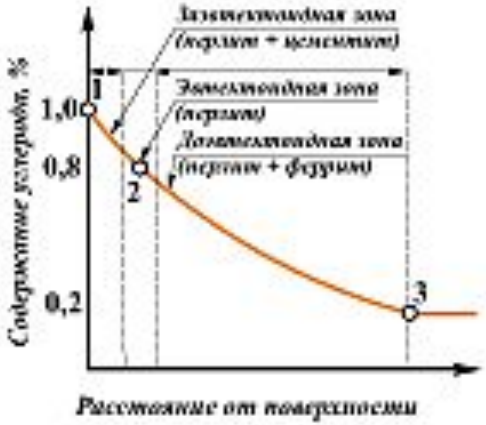
Цементация - *процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом.*

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°С в карбюризаторе, состоящем из древесного угля, 20-25% $BaCO_3$ и 3-5% $CaCO_3$.*

$2C + O_2 = 2CO$

$BaCO_3 + C = BaO + 2CO$

$2CO = CO_2 + C$

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

$CH_4 = 2H_2 + C$

Цементованные изделия дополнительно подвергают термической обработке – закалке и низкому отпуску

Азотирование

Азотирование - процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей азотом

До азотирования изделия подвергают закалке и высокому отпуску

Азотирование проводят в среде аммиака: $2NH_3 \Rightarrow 2N + 6H$

Температура азотирования 500 - 600°С

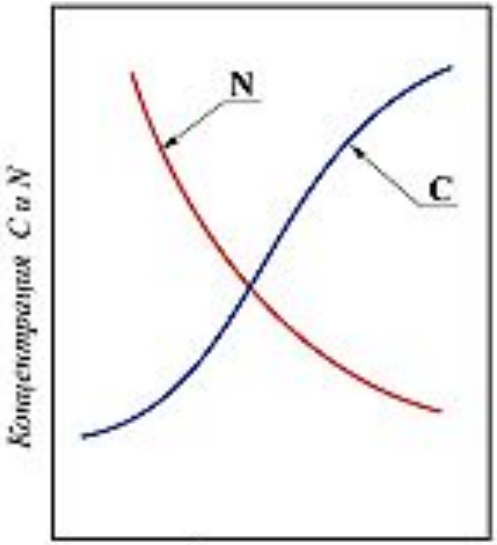
Толщина слоя 0,3 - 0,6 мм

Азотированию подвергают среднеуглеродистые стали, легированные Al, Cr, Mo и V. Азот с этими элементами образует дисперсные нитриды (CrN, VN и др.), в результате чего резко возрастает твердость азотированного слоя

Сталь 38Х2МЮА

Нитроцементация

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°С
толщина диффузионного слоя - 0,15 - 2,00 мм
После нитроцементации производят закалку и низкий отпуск

Низкотемпературная нитроцементация

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

Перед низкотемпературной нитроцементацией проводится улучшение - (закалка и высокий отпуск)

В основе жидкостной нитроцементации лежат следующие основные химические реакции:

$$2NaCN + O_2 \Rightarrow 2NaCNO$$

$$2NaCNO + O_2 \Rightarrow Na_2CO_3 + CO + 2N$$

$$2CO = CO_2 + C$$

Диффузионная металлизация

Диффузионная металлизация - *процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев изделия различными металлами*

Диффузионная металлизация производится – в расплавленных металлах;
– в расплавленных солях;
– в газовой среде;
– в твердой среде

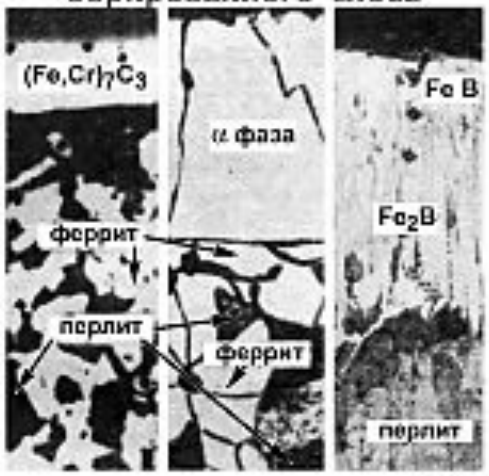
Хромирование – насыщение поверхностных слоев изделия хромом. Толщина хромированного слоя – до 0,2 мм

Алитирование – насыщение поверхностных слоев изделия алюминием. Толщина алитированного слоя – 0,2 – 1,0 мм

Силицирование – насыщение поверхностных слоев изделия кремнием. Толщина силицированного слоя – 0,3 – 1,0 мм;

Борирование – насыщение поверхностных слоев изделия бором. Толщина борированного слоя – 0,1 – 0,2 мм

Микроструктура хромированного, силицированного и борированного слоев

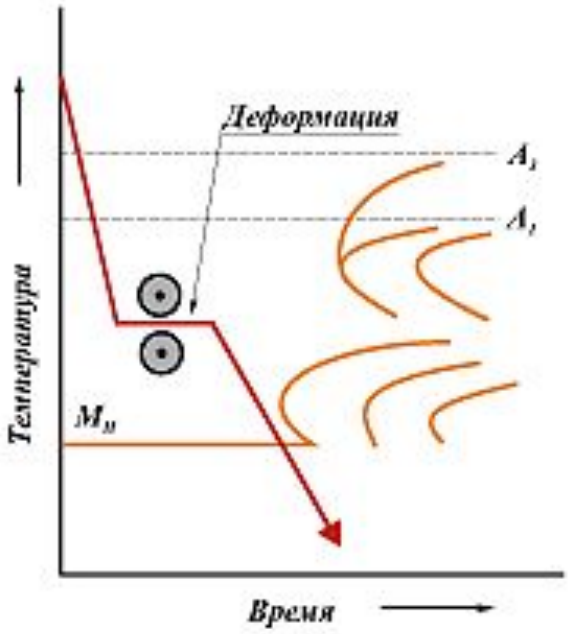


x 100

Термомеханическая обработка

Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО)

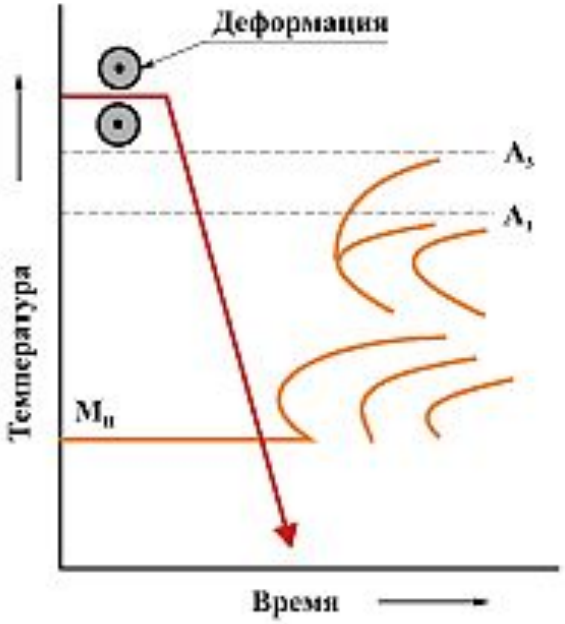
НТМО *заключается в совмещении интенсивной пластической деформации переохлажденного аустенита в температурном интервале его высокой устойчивости, с закалкой на мартенсит отпуском*



Деформацию прокаткой, экструзией или волочением проводят при 600-400°С с обжатиями 70-95%.
Для легированных сталей НТМО позволяет получить высокий уровень прочностных свойств. ($\sigma_в$ до 3000 – 3300 МПа)

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО)

ВТМО *заключается в совмещении горячей деформации, осуществляемой в аустенитном состоянии, с закалкой на мартенсит и окончательном отпуске.*



Деформацию прокаткой, ковкой или штамповкой проводят при 850-950°С 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