

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

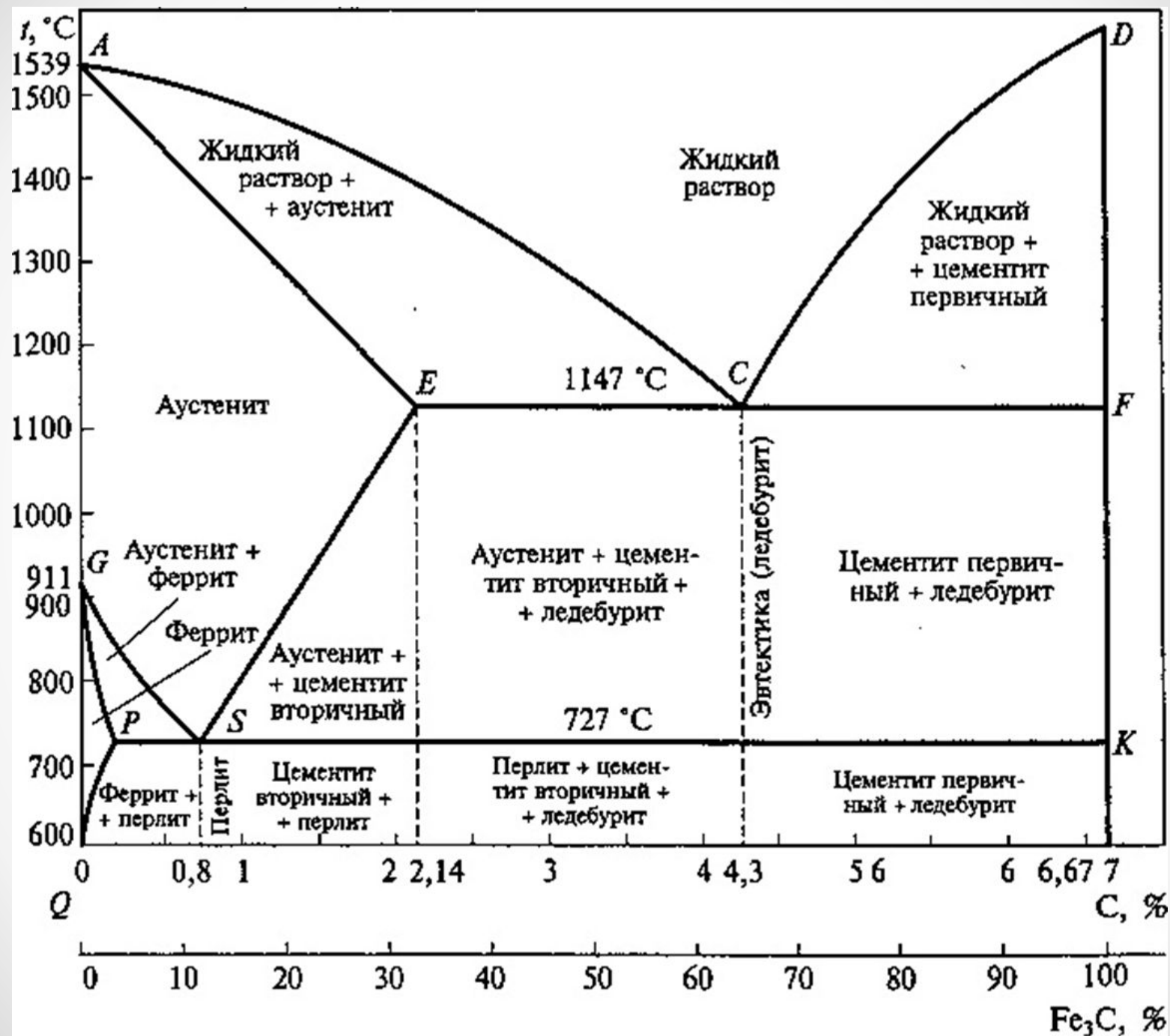
- **термическая обработка** – только термическое воздействие
- **химико-термическая** – сочетание термического и химического воздействия
- **термомеханическая** – сочетание термического воздействия и пластической деформации

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 **A** с индексами (например, **A₁**, **A₂**, **A₃** и др.).

Если рассматривается процесс нагревания, то к индексу добавляется буква «**c**», если охлаждение – буква «**r**».

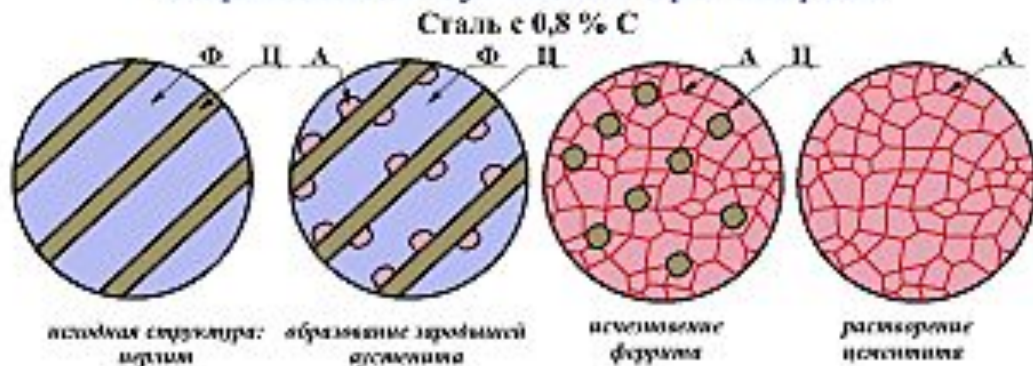


Главная цель нагрева стали – получение аустенитной структуры.

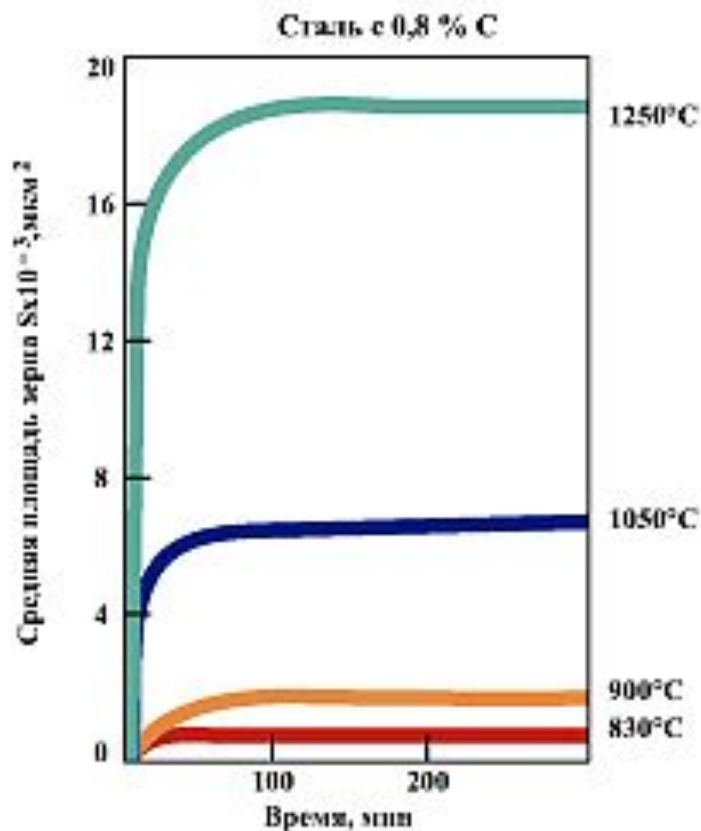
Аустенит (по имени английского ученого Аустена) — это твердый раствор углерода (и других элементов) в γ -Fe. Атомы растворенного в аустените углерода располагаются в центре элементарных ячеек решетки.

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

Образование аустенита при нагреве



Рост аустенитного зерна при нагреве



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.

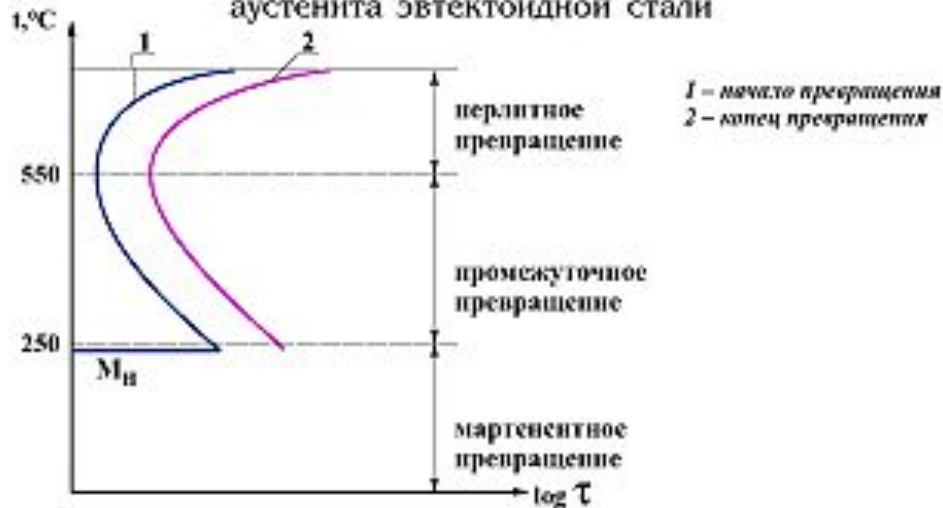
Образование этих структур зависит от скорости охлаждения (табл. 1).

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/мм²
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 эвтектондной стали



перлит

сорбит

троостит

микроструктуры при увеличении 7500



S_0 - межластинчатое расстояние

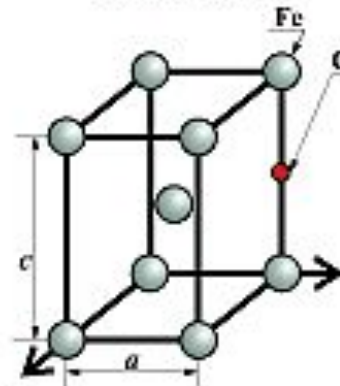
Различают:

- 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

Мартенситное превращение

Мартенсит - пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе

Кристаллическая ячейка мартенсита



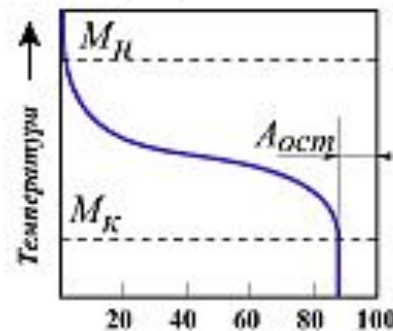
$\frac{c}{a}$ - степень тетрагональности решетки мартенсита

Структура мартенсита



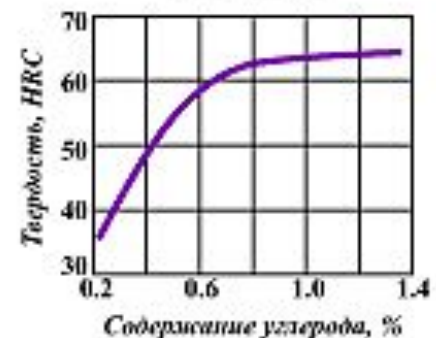
x 100

Кривая мартенситного превращения



Количество мартенсита, %

Зависимость твердости мартенсита от содержания углерода

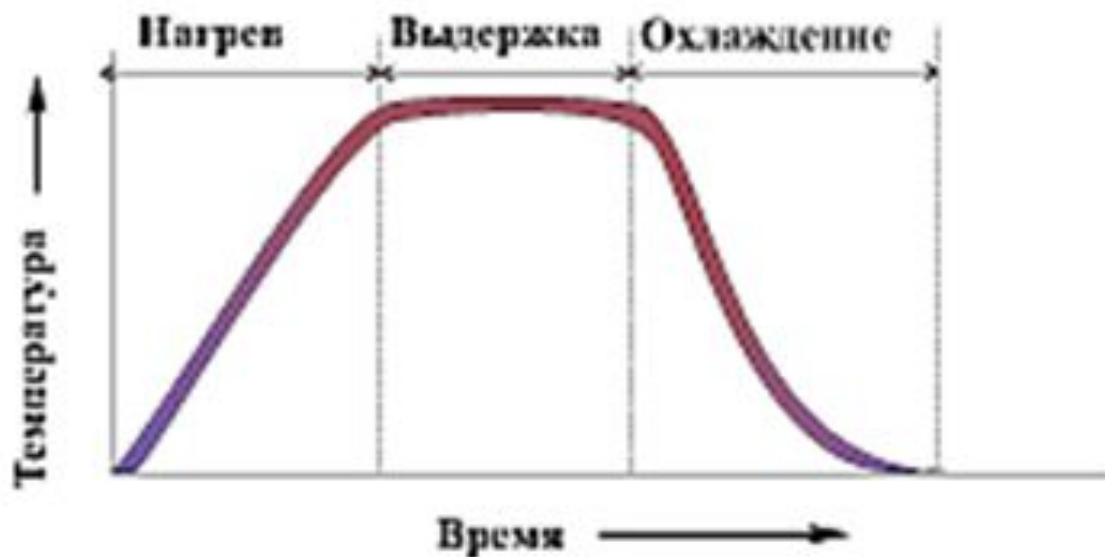


Виды термической обработки

- **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

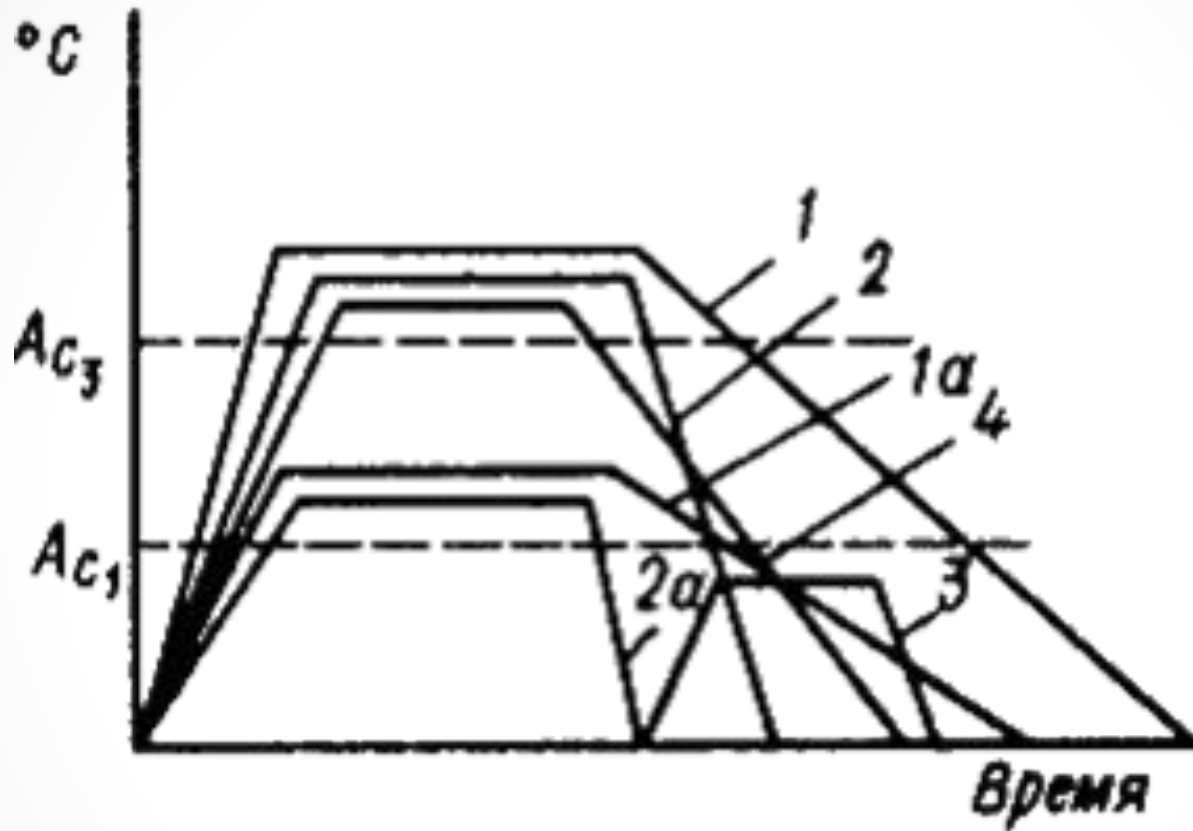
Определение температуры при термической обработке можно производить на основании цвета излучения нагретой стали или с использованием измерительных приборов.

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:

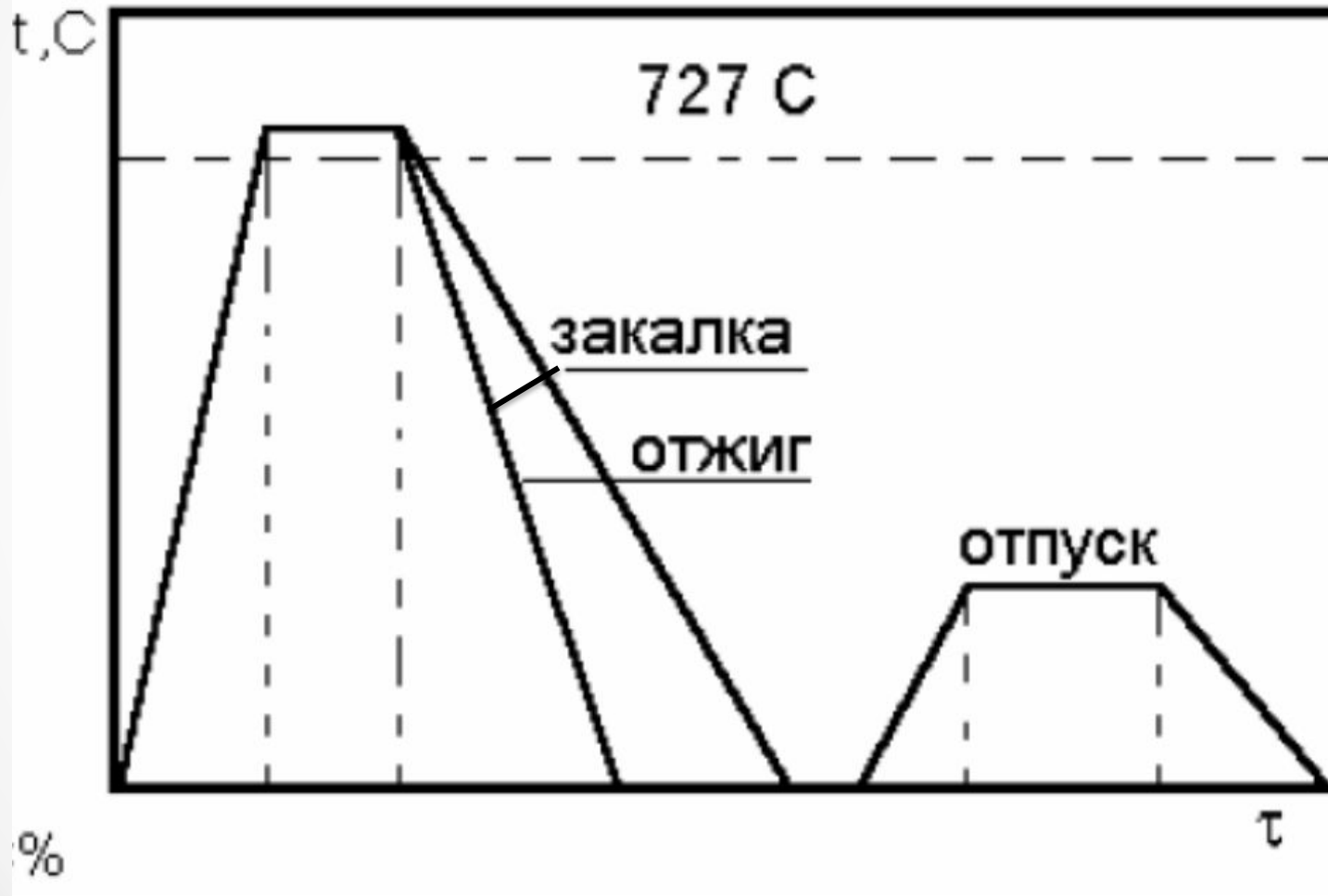
- Максимальная температура нагрева сплава - t_{\max}
- Время выдержки сплава при температуре нагрева t_k
- Скорость нагрева V_n
- Скорость охлаждения V_o
- Средняя скорость нагрева $V_{n.cp} = t_{\max} / r_n$
- Средняя скорость охлаждения $V_{o.cp} = t_{\max} / r_o$

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 $30 \dots 100^\circ\text{C}/\text{ч}$.

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**,
 $T_H = 0,8 T_{пл}$ (1100 - 1200° C), 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, $T_H = 0,4 T_{пл}$ (600-700° C)
3. **Отжиг для снятия напряжений после горячей обработки**
применяют для уменьшения напряжений, сохранившихся после окончания литья, сварки, обработки давлением и др., $T_H = 160.....700^{\circ}C$

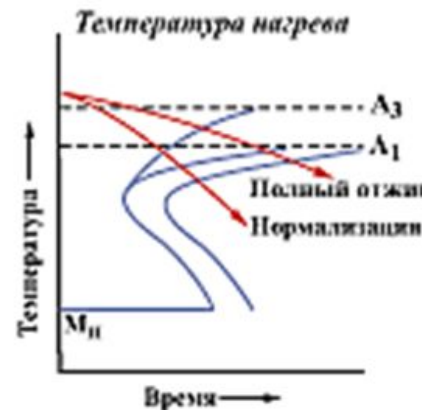
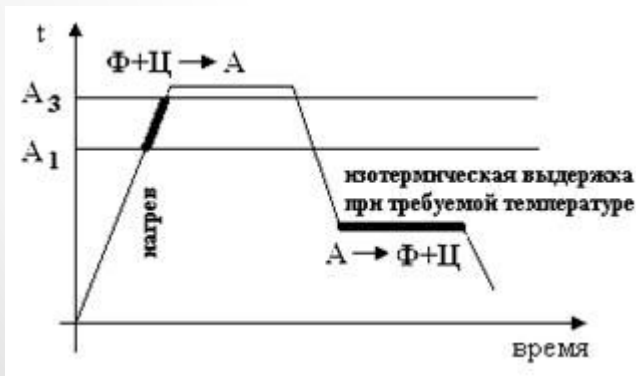
Отжиг I рода

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 $t = A_{C3} + (30-50^\circ\text{C})$
+ 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 $t = A_{C3} + (30-50^\circ\text{C})$
для доэвтектоидных сталей и
 $t = A_{Cm} + (30-50^\circ\text{C})$ 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 °

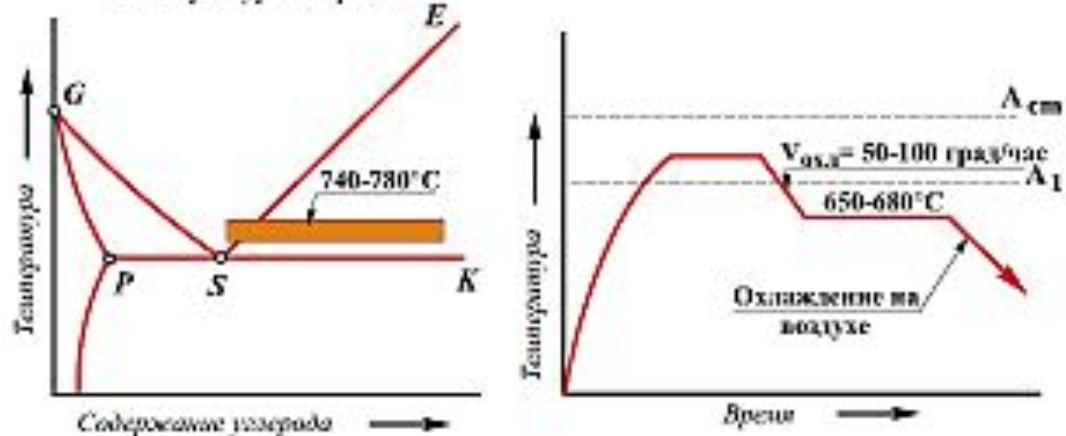
С, новой выдержке до окончания распада аустенита, затем охлаждении до комнатной температуры

- **Нормализация** – нагрев выше линии GSE на 30-50 градусов и выдержка на спокойном воздухе. Структура обладает большей прочностью.

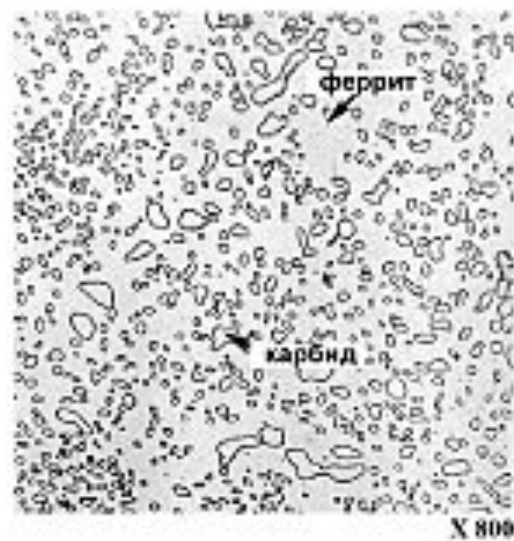
Сфероидизирующий отжиг, заэвтектоидных сталей

Цель отжига – получение структуры зернистого перлита

Температура нагрева



Структура стали после сфероидизирующего отжига



Закалка

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







Закалка

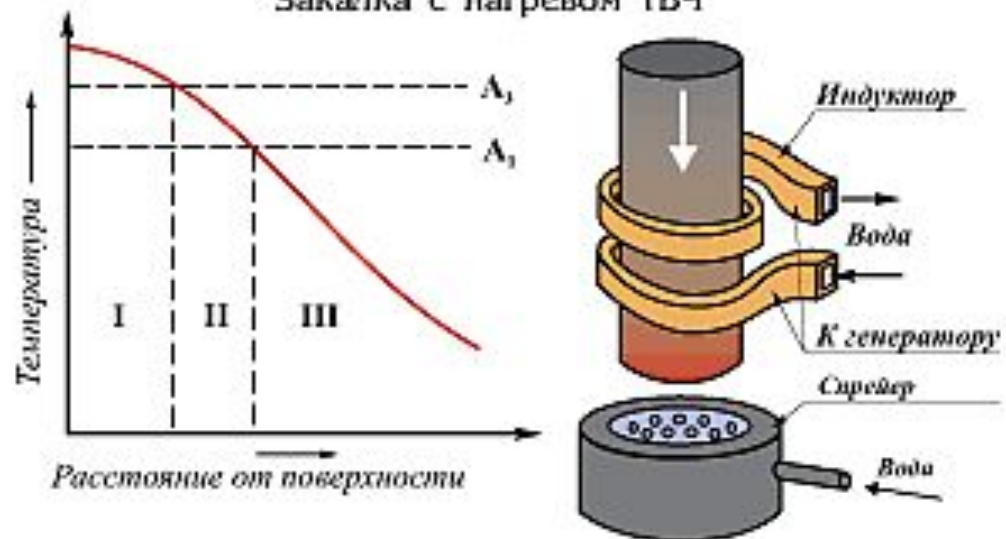
- **Закаливаемость** – способность стали приобретать высокую твердость при закалке.

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

- **Прокаливаемость** – способность получать закаленный слой с мартенситной и троостомартенситной 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

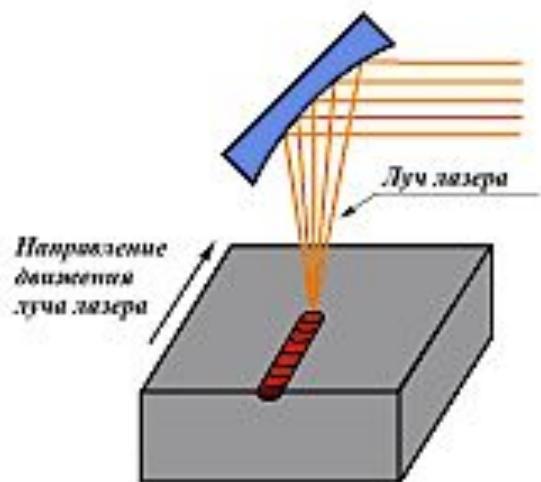


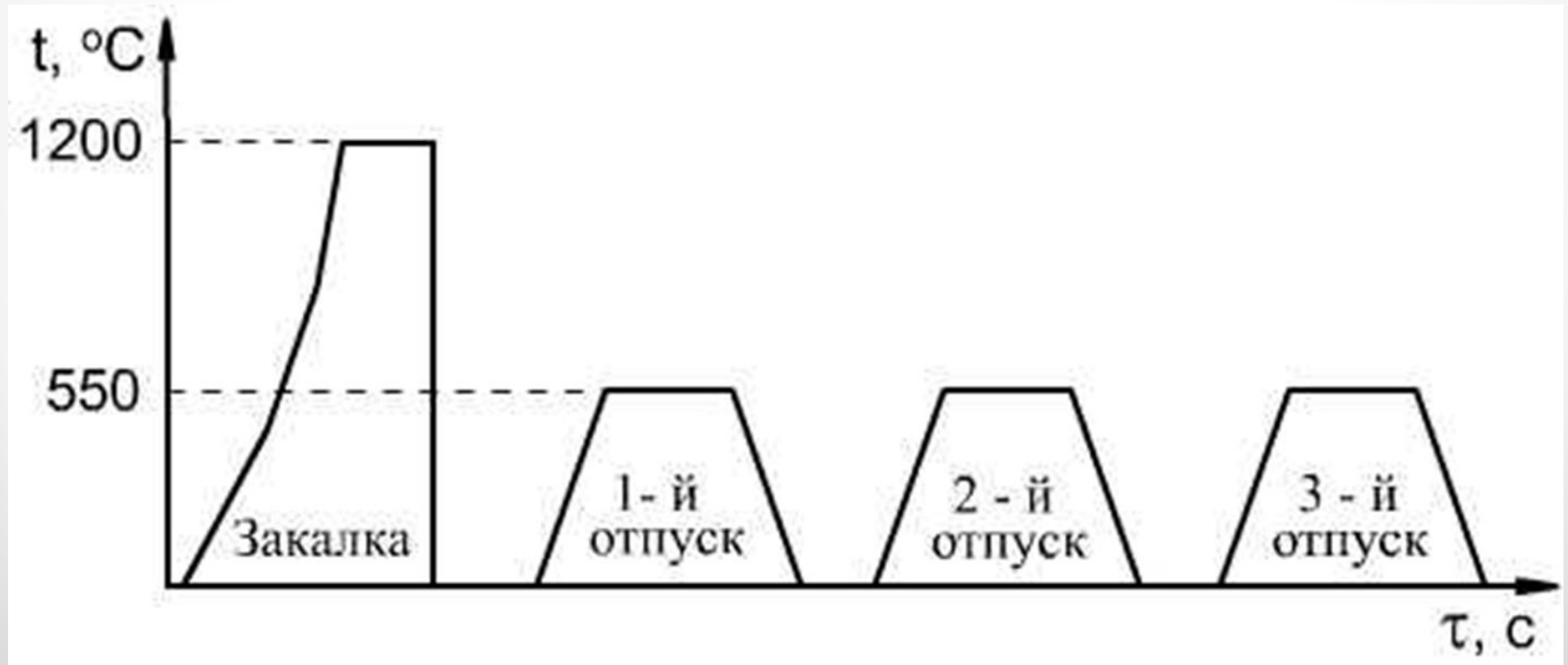
Схема термического влияния



Сталь 20

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°C)
- превращение остаточного аустенита (200-300°C)
- сфероидизация и укрупнение карбидов, уменьшение плотности дислокаций (400°C и выше)

Виды отпуска:

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

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

Низкий отпуск

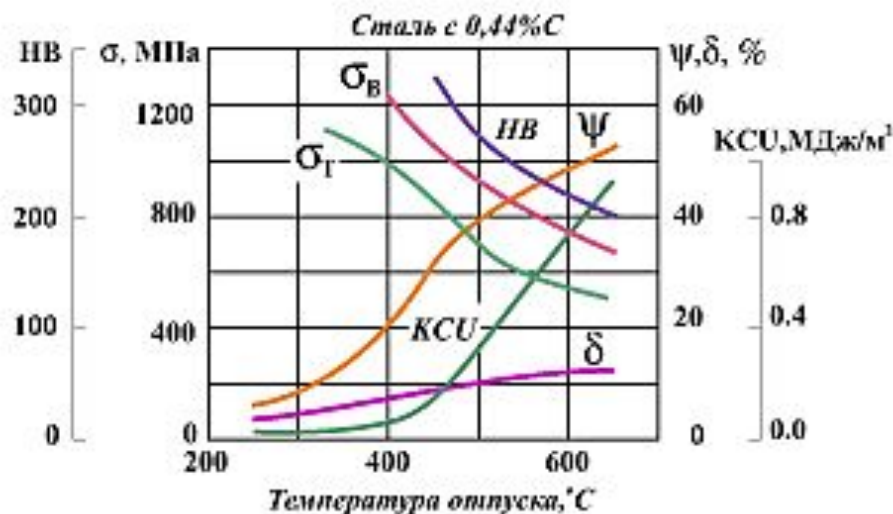
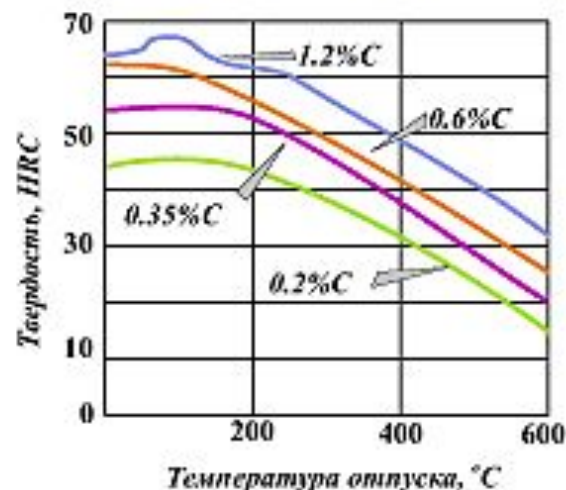


Высокий отпуск



X 17000

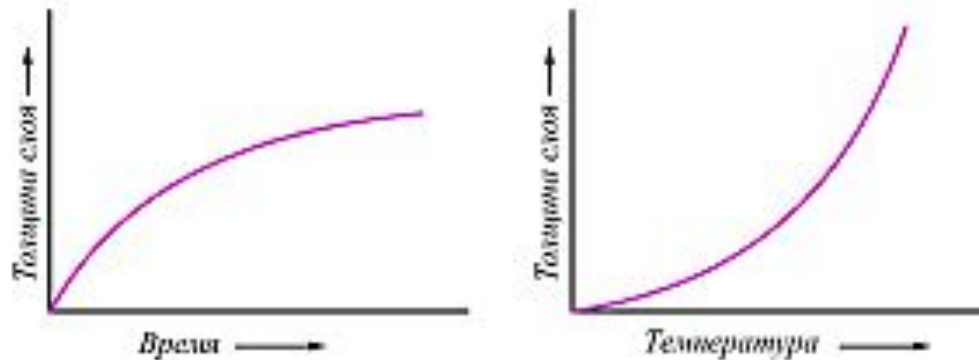
Изменение механических свойств при отпуске



Химико-термическая обработка

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

Глубина диффузионного слоя в зависимости от продолжительности процесса и температуры



Основные виды химико-термической обработки стали:

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

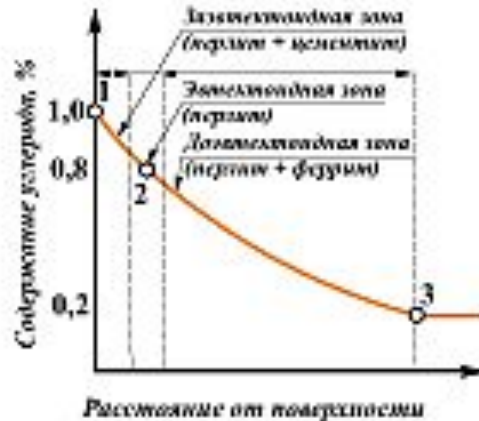
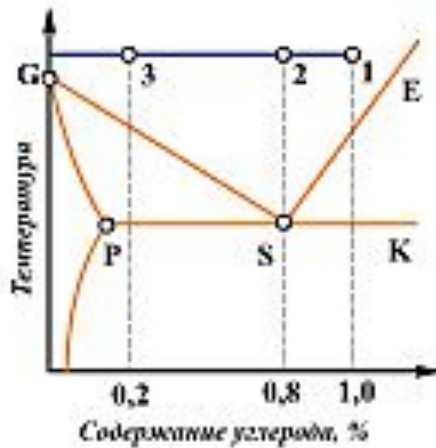
Цементизация

Цементация - процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом.

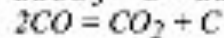
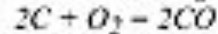
Такой обработке подвергают стали с 0,10 - 0,20% С.

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

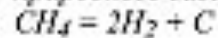
Толщина науглероженого слоя - 0,5 - 2,0 мм.



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



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



Цементированные изделия дополнительно подвергают термической обработке - закалке и низкотемпературному отпуску

Азотирование

Азотирование - процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей азотом

До азотирования изделия подвергают закалке и высокому отпуску

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

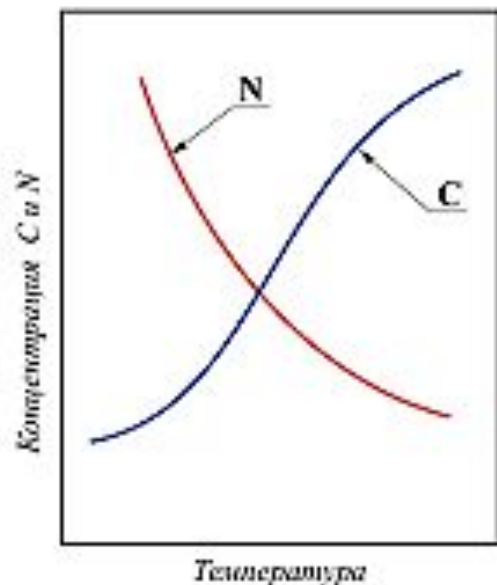
Азотированию подвергают среднеуглеродистые стали, легированные Al, Cr, Mo и V. Азот с этими элементами образует дисперсные нитриды (CrN, VN и др.), в результате чего резко возрастает твердость азотированного слоя

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 нитроуглеродизирующих газов и азотсодержащих газов (газовая нитроцементация)



Различают высокотемпературную и низкотемпературную нитроцементацию.

Высокотемпературная нитроцементация

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

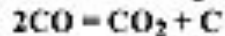
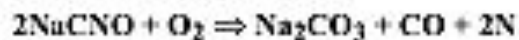
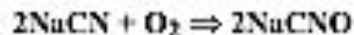
После нитроцементации производят закалку и низкий отпуск

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:



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

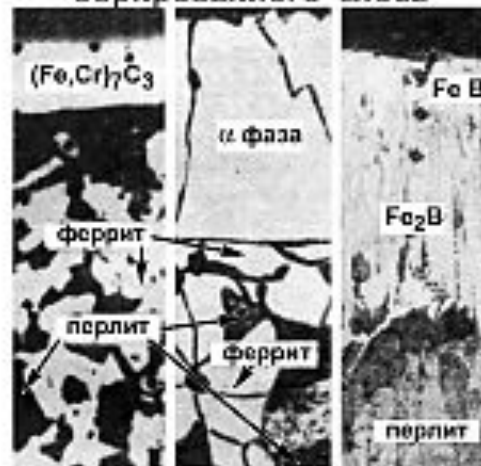
Хромирование – насыщение поверхностных слоев изделия хромом.
Толщина хромированного слоя – до 0,2 мм

Алтитрование – насыщение поверхностных слоев изделия алюминием. Толщина алтитрованного 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

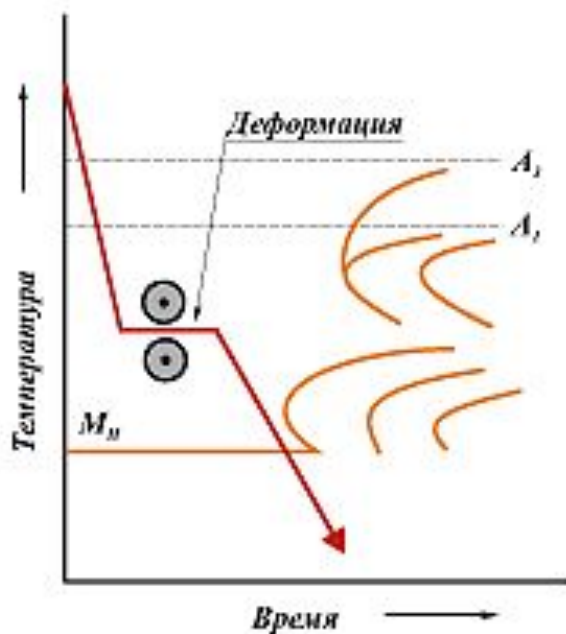


x 100

Термомеханическая обработка

Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО)

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

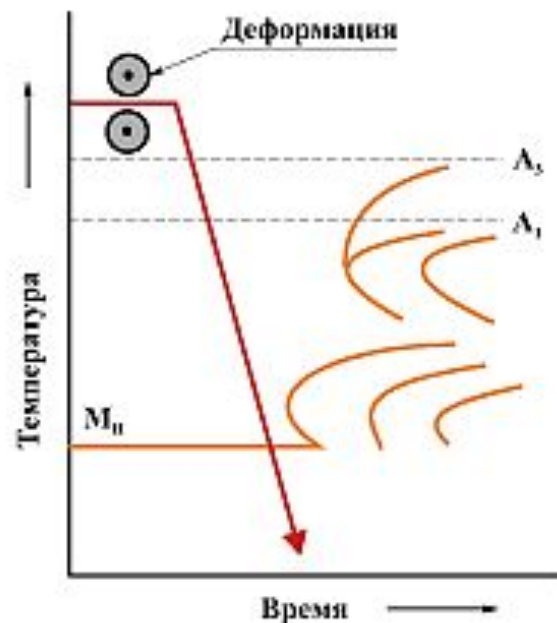


Деформацию прокаткой, экструзией или волочением проводят при 600–400°С с обжатиями 70–95%.

Для легированных сталей НТМО позволяет получить высокий уровень прочностных свойств. (σ_B до 3000 – 3300 МПа)

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО)

ВТМО заключается в сочетании 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