

# 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 сталях происходят превращения.

Такие температуры называются критическими и обозначаются буквой **A** с индексами (например, **A<sub>1</sub>**, **A<sub>2</sub>**, **A<sub>3</sub>** и др.).

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

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

# Цвета каления стали

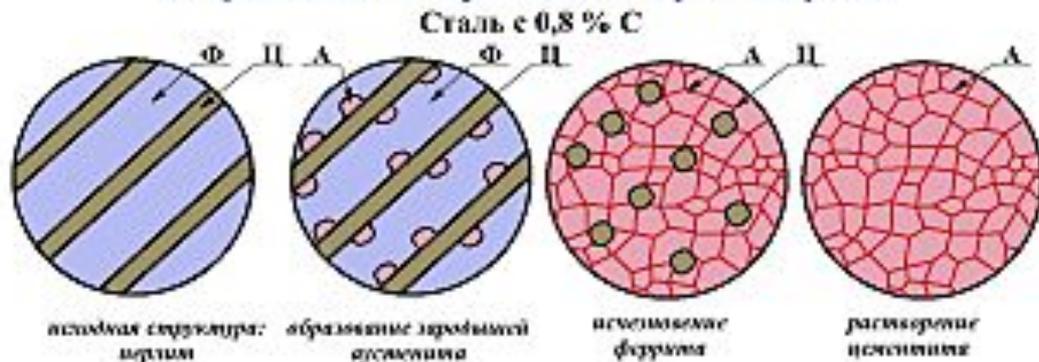
Наименование		t °C
Ослепительно белый		1250 - 1300
Светло-желтый		1150 - 1250
Темно-желтый		1050 - 1150
Оранжевый		900 - 1050
Светло-красный		830 - 900
Светло-вишнево-красный		800 - 830
Вишнево-красный		770 - 800
Темно-вишнево-красный		730 - 800
Темно-красный		650 - 730
Коричнево-красный		580 - 650
Темно-коричневый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

Главная цель нагрева стали – получение аустенитной структуры.

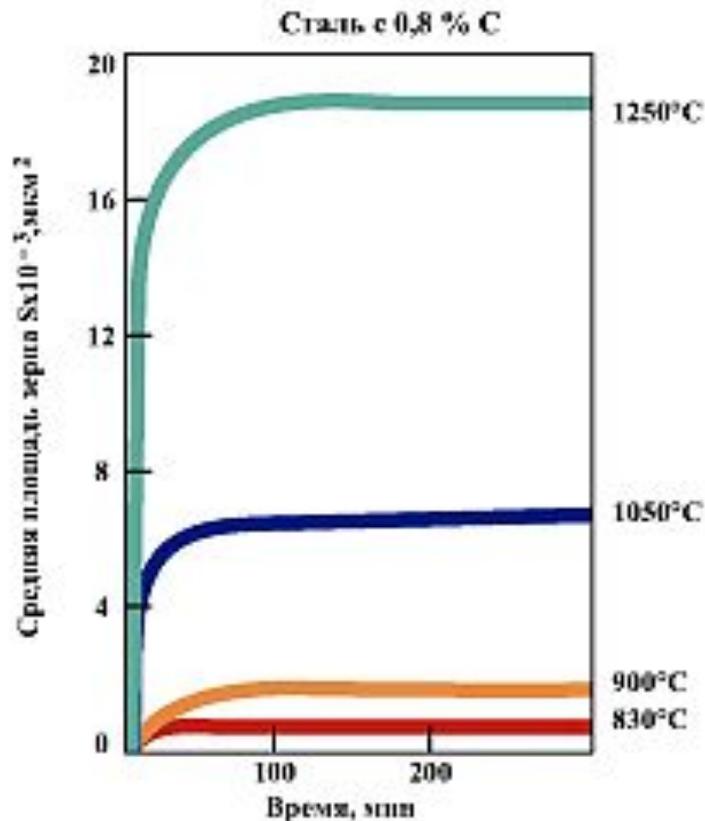
Аустенит (по имени английского ученого Аустена) — это твердый раствор углерода (и других элементов) в  $\gamma$ -Fe. Атомы растворенного в аустените углерода располагаются в центре элементарных ячеек решетки.

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**

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

## Превращение аустенита при охлаждении

Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали

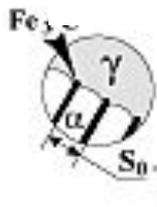


перлит

сорбит

троостит

микроструктуры при увеличении 7500



$S_0$  - межластинчатое расстояние

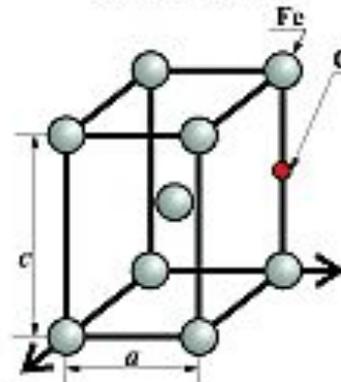
Различают:

- 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  $\alpha$ -железе

Кристаллическая ячейка мартенсита



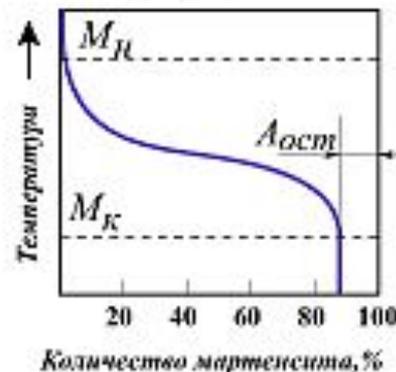
$\frac{c}{a}$  - степень тетрагональности решетки мартенсита

Структура мартенсита

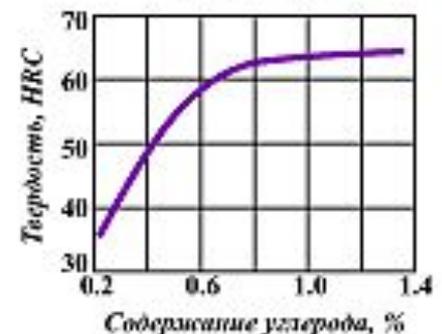


x 100

Кривая мартенситного превращения



Зависимость твердости мартенсита от содержания углерода

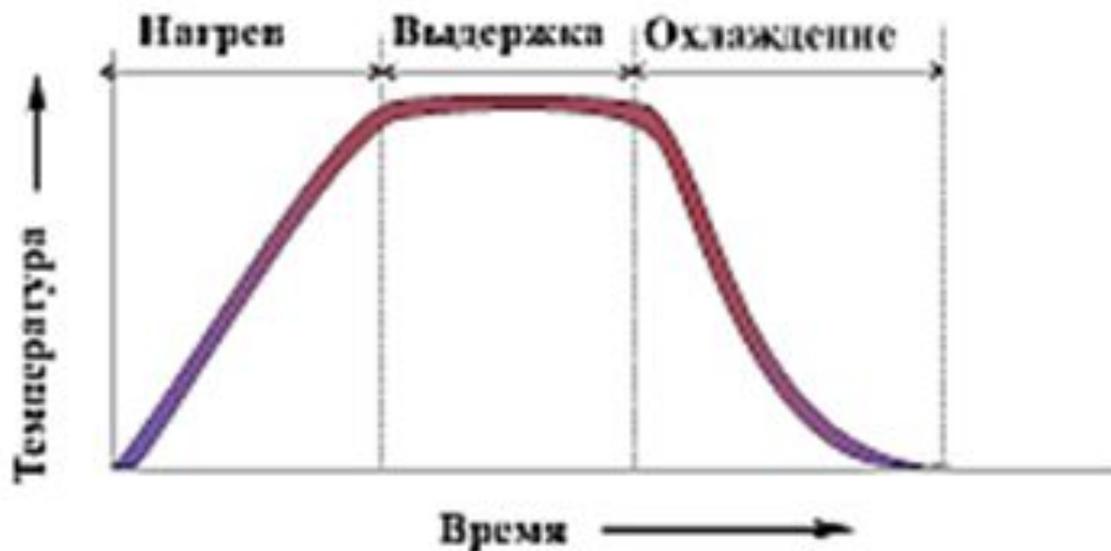


# Виды термической обработки

- **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



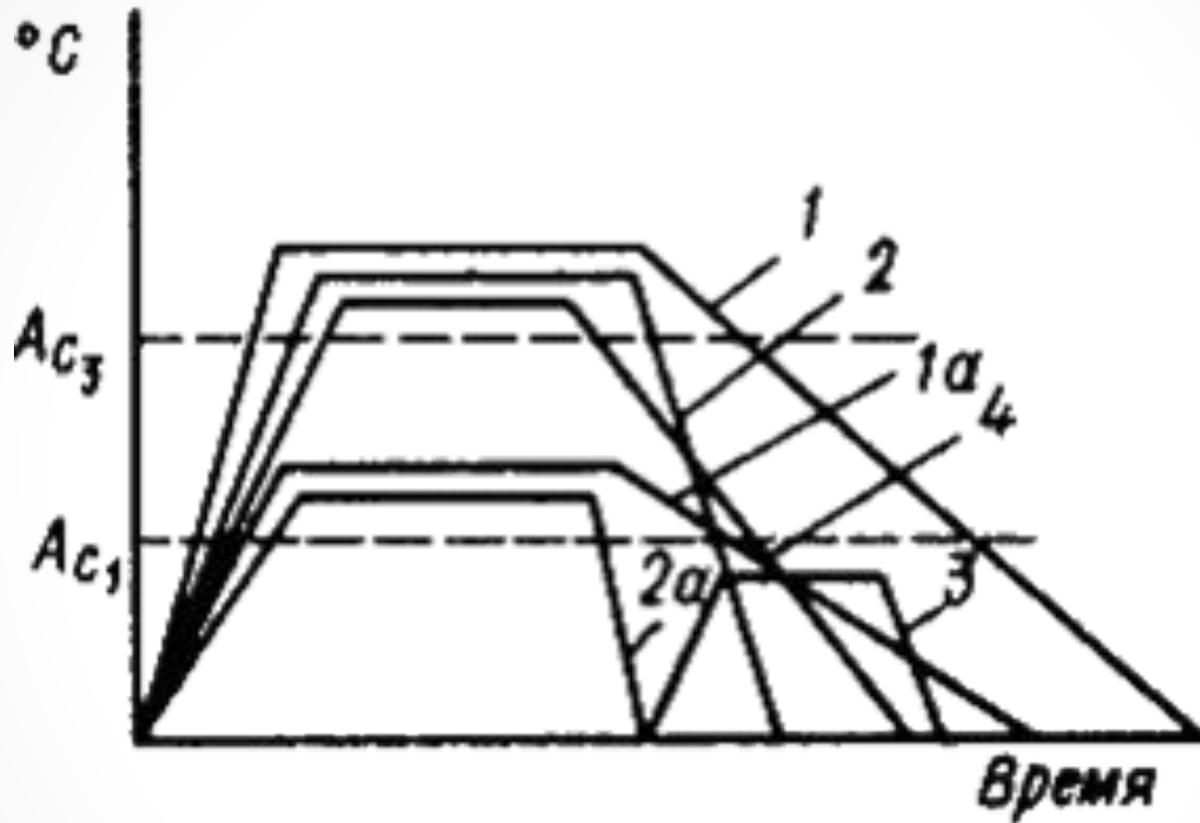
# Основные температурные воздействия

- 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.

# Параметры термической обработки:

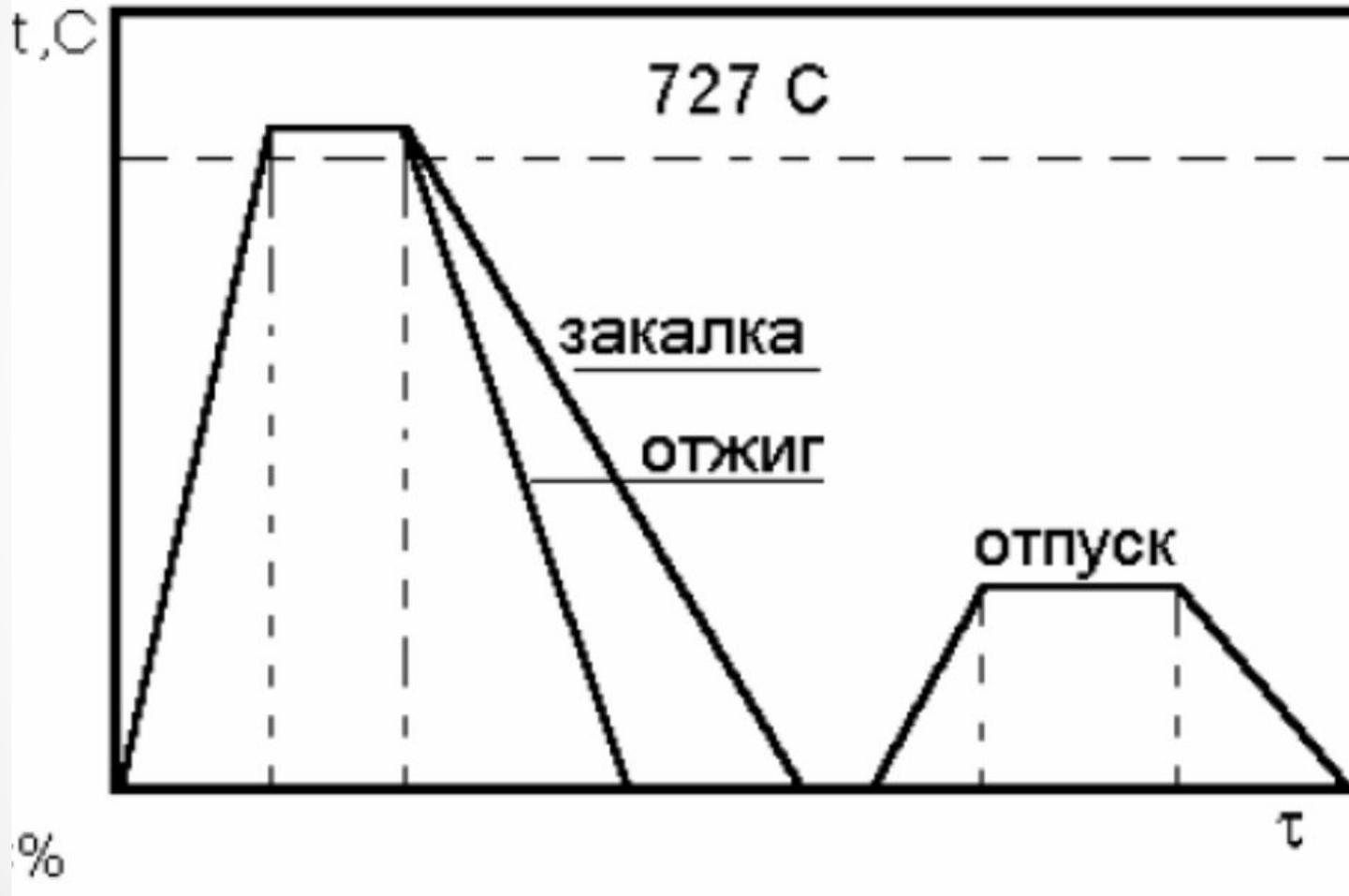
- Максимальная температура нагрева сплава -  $t_{\max}$
- Время выдержки сплава при температуре нагрева  $t_k$
- Скорость нагрева  $V_n$
- Скорость охлаждения  $V_o$
- Средняя скорость нагрева  $V_{n.cp} = t_{\max} / r_n$
- Средняя скорость охлаждения  $V_{o.cp} = t_{\max} / r_o$

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

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

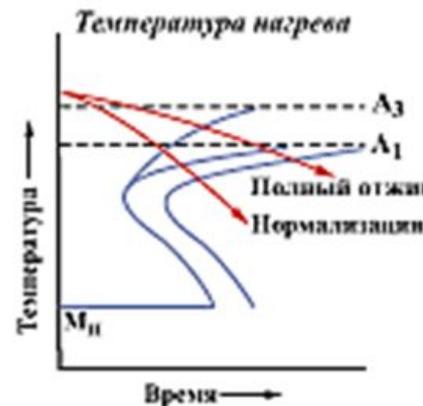
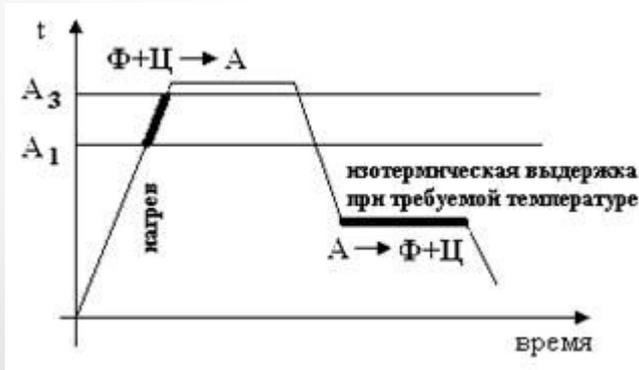
# Отжиг I рода

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

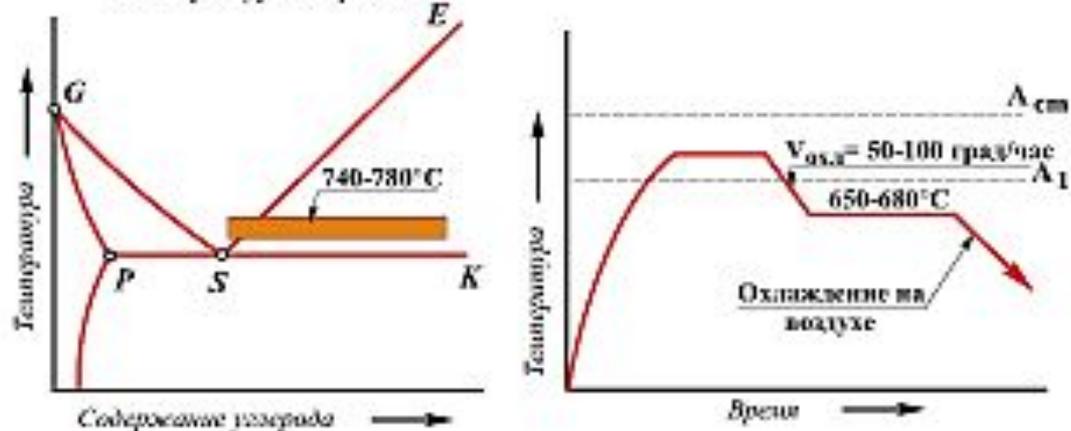
аустенитного состояния, выдержке при такой температуре, охлаждении примерно до 600 - 700 °С, новой выдержке до окончания распада аустенита, затем охлаждении до комнатной температуры

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

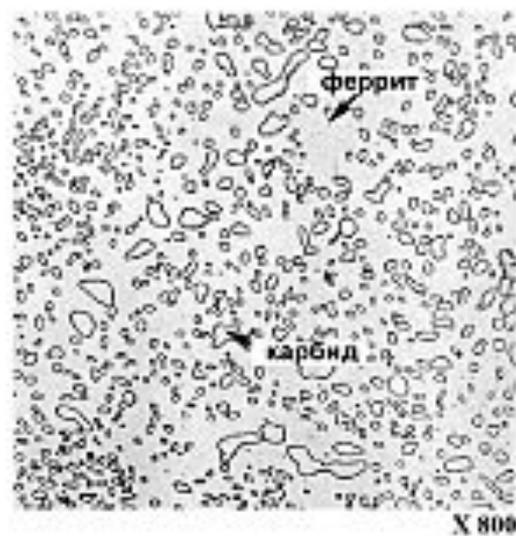
## Сфероидизирующий отжиг, заэвтектоидных сталей

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

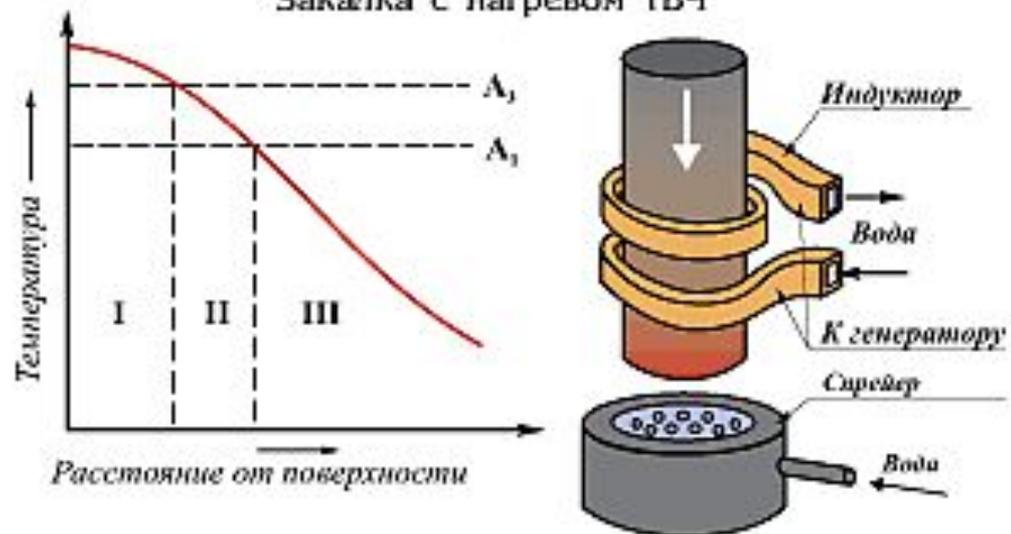
- **Закаливаемость** – способность стали приобретать высокую твердость при закалке.

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

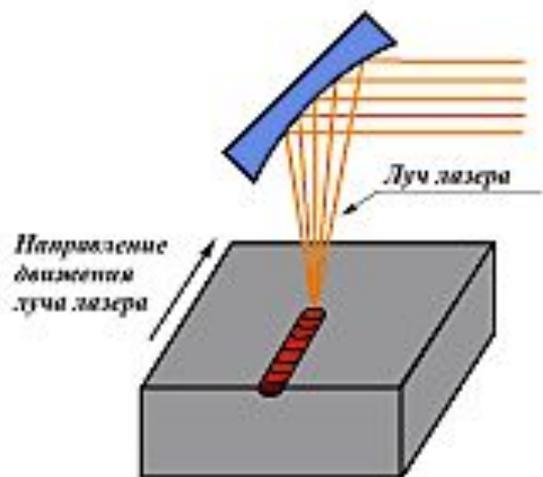


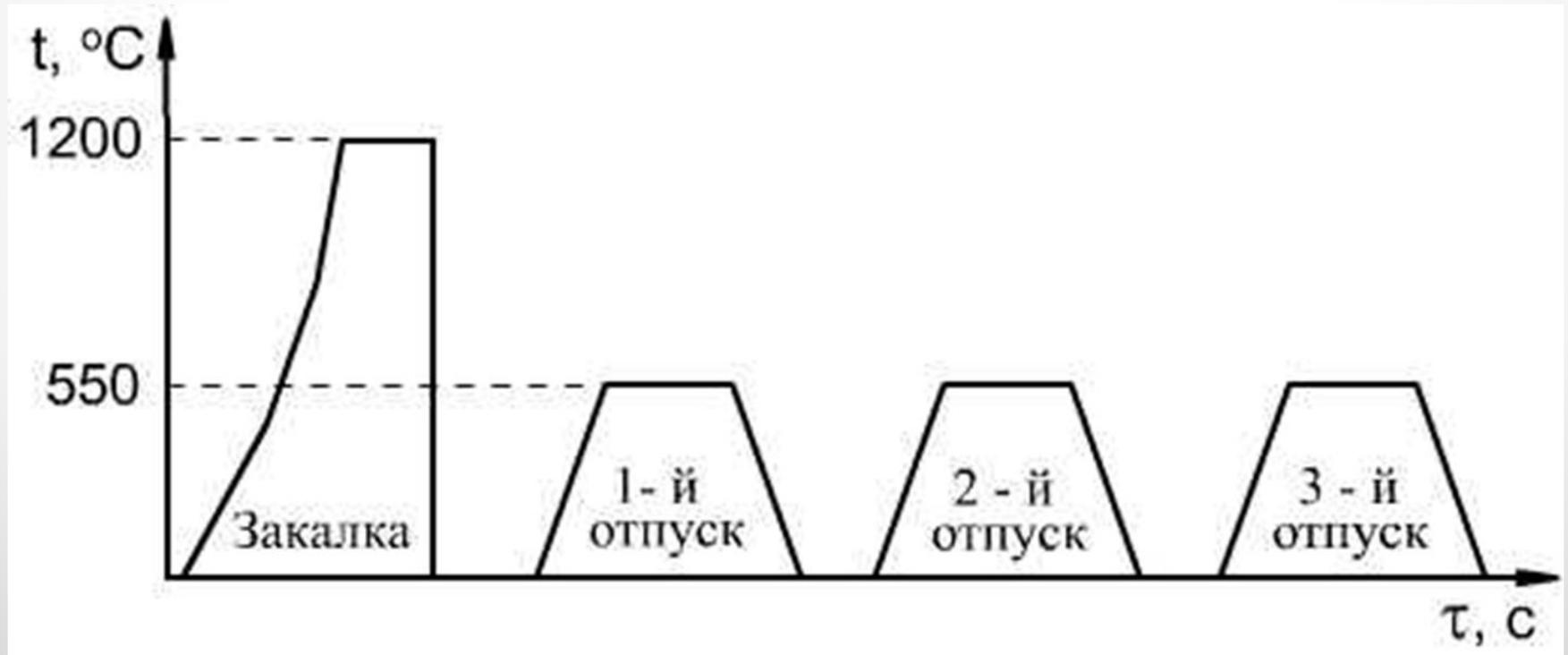
Схема термического влияния



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

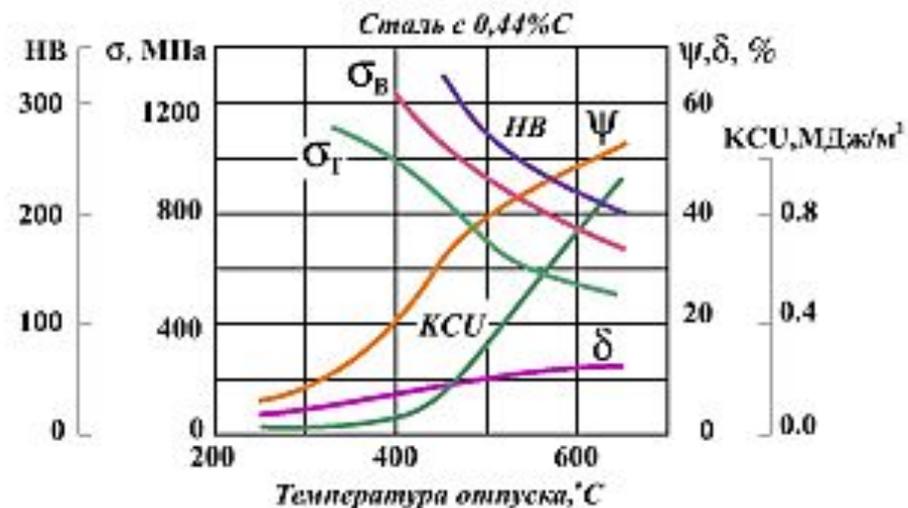
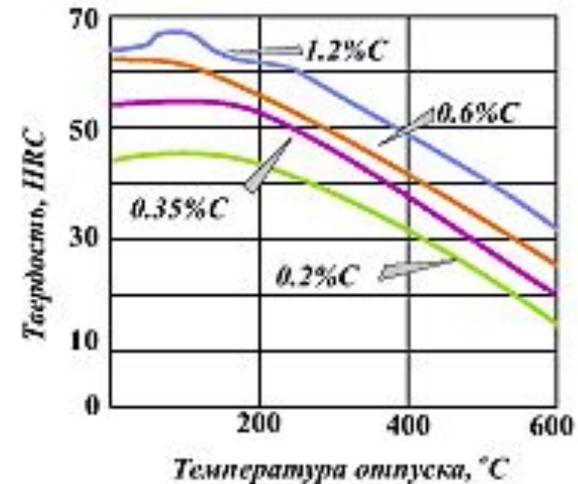


Высокий отпуск



X 17000

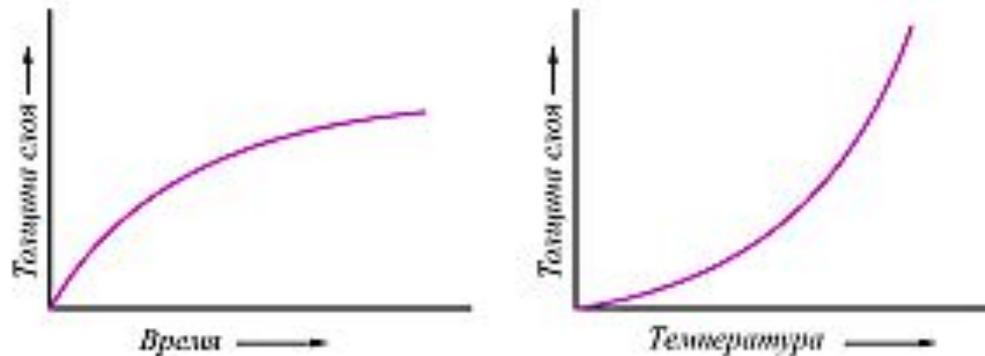
## Изменение механических свойств при отпуске



# 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

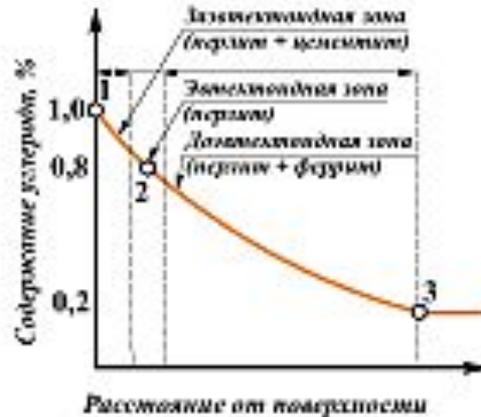
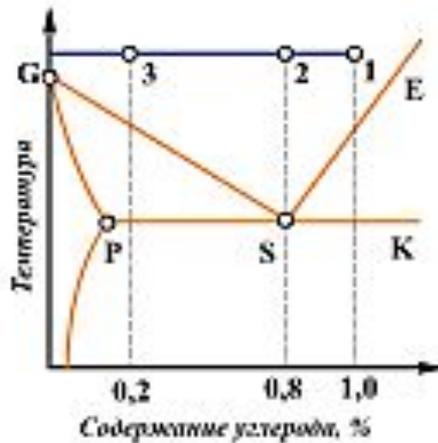
# Цементизация

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

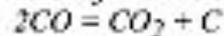
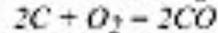
Такой обработке подвергают стали с 0,10 - 0,20% С.

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

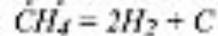
Толщина науглероженого слоя - 0,5 - 2,0 мм.



**Цементация в твердом карбонизаторе.** Процесс осуществляют при 910-930°С в карбонизаторе, состоящем из древесного угля, 20-25% ВаСО<sub>3</sub> и 3-5% СаСО<sub>3</sub>.



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



Цементированные изделия дополнительно подвергаются термической обработке – закалке и низкотемпературному отпуску

# Азотирование

Азотирование - процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей азотом

До азотирования изделия подвергают закалке и высокому отпуску

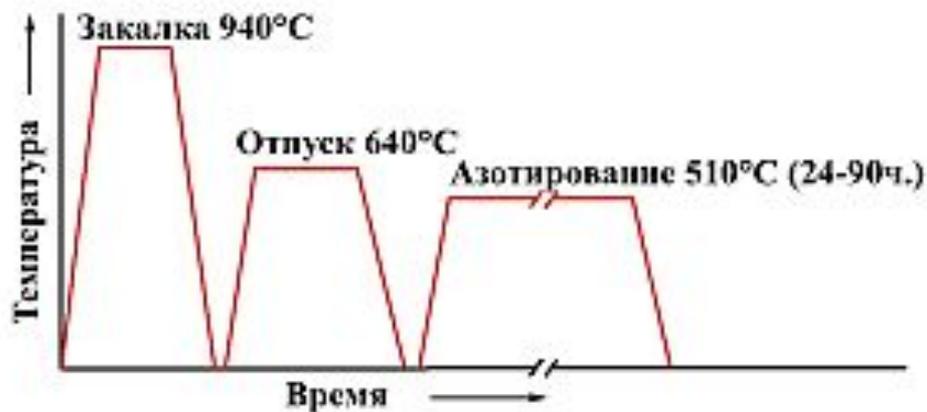
Азотирование проводят в среде аммиака:  $2\text{NH}_3 \Rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$

Температура азотирования 500 - 600°C

Толщина слоя 0,3 - 0,6 мм

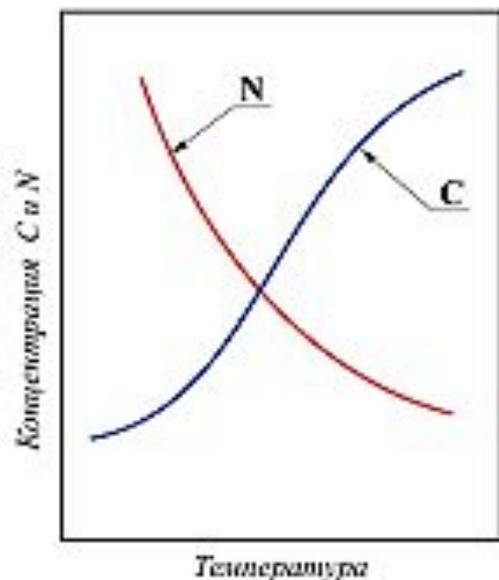
Азотированию подвергают среднеуглеродистые стали, легированные Al, Cr, Mo и V. Азот с этими элементами образует дисперсные нитриды (CrN, VN и др.), в результате чего резко возрастает твердость азотированного слоя

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 (газовая нитроцементация)



Различают высокотемпературную и низкотемпературную нитроцементацию.

## Высокотемпературная нитроцементация

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

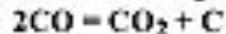
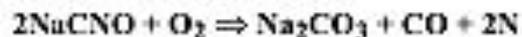
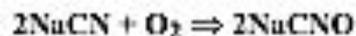
После нитроцементации производят закалку и низкий отпуск

## 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

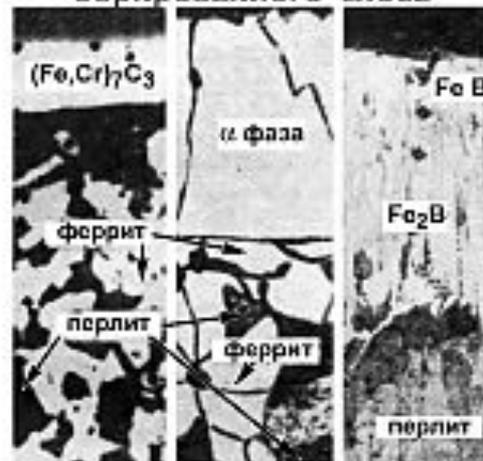
**Хромирование** – насыщение поверхностных слоев изделия хромом.  
Толщина хромированного слоя – до 0,2 мм

**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

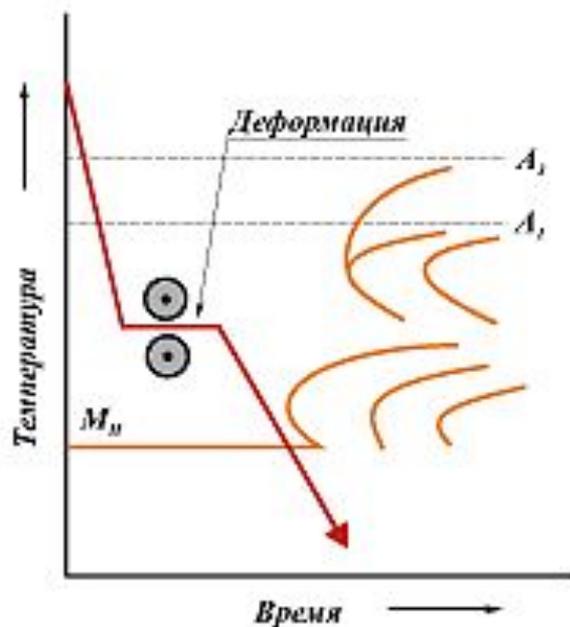


x 100

# 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

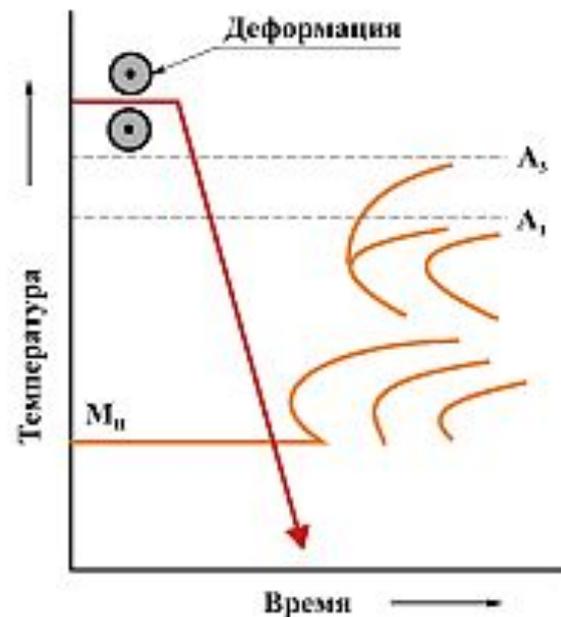


Деформацию прокаткой, экструзией или волочением проводят при 600–400°С с обжатиями 70–95%.

Для легированных сталей НТМО позволяет получить высокий уровень прочностных свойств. ( $\sigma_B$  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