

Методическое пособие по дисциплине  
«Технологические процессы  
термической обработки металлов»



Раздел 4

Основные виды термической обработки

# Содержание

1. Классификация видов термической обработки, их назначение
2. Отжиг I рода
  - 2.1. Гомогенизационный (диффузионный) отжиг
  - 2.2. Рекристаллизационный отжиг
  - 2.3. Отжиг для снятия напряжений
3. Отжиг II рода
  - 3.1. Полный отжиг
  - 3.2. Изотермический отжиг
  - 3.3. Нормализационный отжиг (Нормализация)
  - 3.4. Неполный отжиг
  - 3.5. Сфероидизирующий отжиг
  - 3.6. Низкий отжиг (Высокий отпуск)
4. Закалка
  - 4.1. Закалка в одном охладителе
  - 4.2. Закалка в 2-х средах
  - 4.3. Ступенчатая закалка
  - 4.4. Изотермическая закалка
  - 4.5. Светлая закалка
  - 4.6. Закалка с самоотпуском

# Содержание

- 5. Отпуск стали
    - 5.1. Виды отпуска закаленной стали
  - 6. Химико-термическая обработка
    - 6.1. Цементация
    - 6.2. Нитроцементация
    - 6.3. Азотирование
  - 7. Диффузионная металлизация
  - 8. Термомеханическая обработка стали
    - 8.1. Виды ТМО
  - 9. Упрочнение стали методом пластической деформации (наклепом)
    - 9.1. Методы наклепа
- Приложение

# Классификация видов термической обработки, их назначение

# 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
- ❖ Диффузионная металлизация

### Термомеханическая обработка

- ❖ ВТМО
- ❖ НТМО

# Отжиг I рода

Его виды: гомогенизация, рекристаллизационный, для снижения твердости и остаточных напряжений

# Понятие отжига I рода

К первому роду относят виды отжига, в процессе которых фазовые (полиморфные) превращения отсутствуют, а если они и протекают, то не оказывают решающего влияния на конечную структуру.

Цель отжига I рода - устранение химической или физической неоднородности, созданной предшествующими обработками.

Характерная особенность этого отжига состоит в том, что устранение неоднородности происходит независимо от того, протекают ли в сплавах при этой, обработке фазовые превращения или нет, поэтому отжиг I рода можно производить при температурах выше или ниже температур фазовых превращений.

# Виды отжига I рода

● Отжиг для снятия напряжений

● Рекристаллизационный отжиг

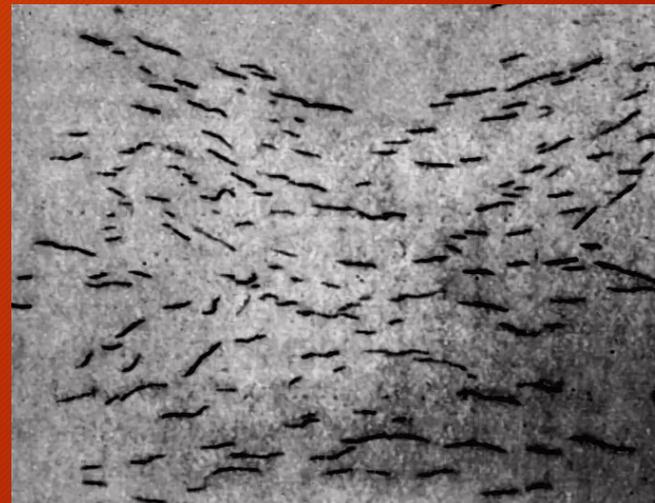
● Гомогенизационный отжиг

# Гомогенизационный (диффузионный) отжиг

Диффузионный отжиг применяют для слитков легированной стали с целью уменьшения дендритной или внутрикристаллитной ликвации (неоднородности по хим. составу), которая повышает склонность стали, обрабатываемой давлением, к хрупкому разрушению, к анизотропии свойств и возникновению таких дефектов, как шиферность (слоистый излом) и флокены (тонкие внутренние трещины, наблюдаемые в изломе в виде белых овальных пятен).



Шиферный излом

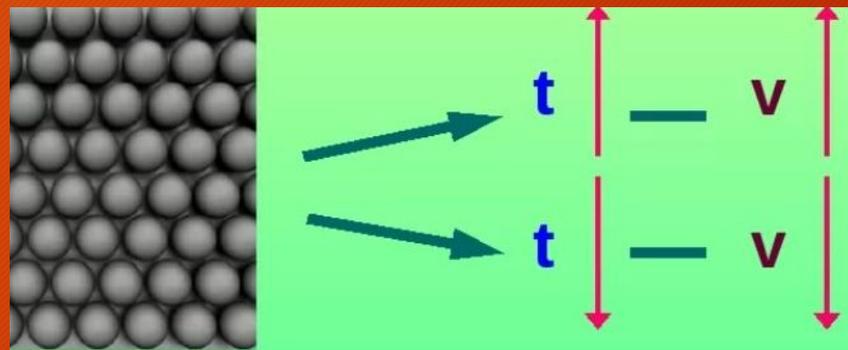


Флокены

# Суть гомогенизации

Основной движущей силой отжига являются процессы **диффузии**

Чтобы повысить скорость диффузии необходимо нагреть сталь, т.к. с повышением температуры возрастает скорость движения атомов

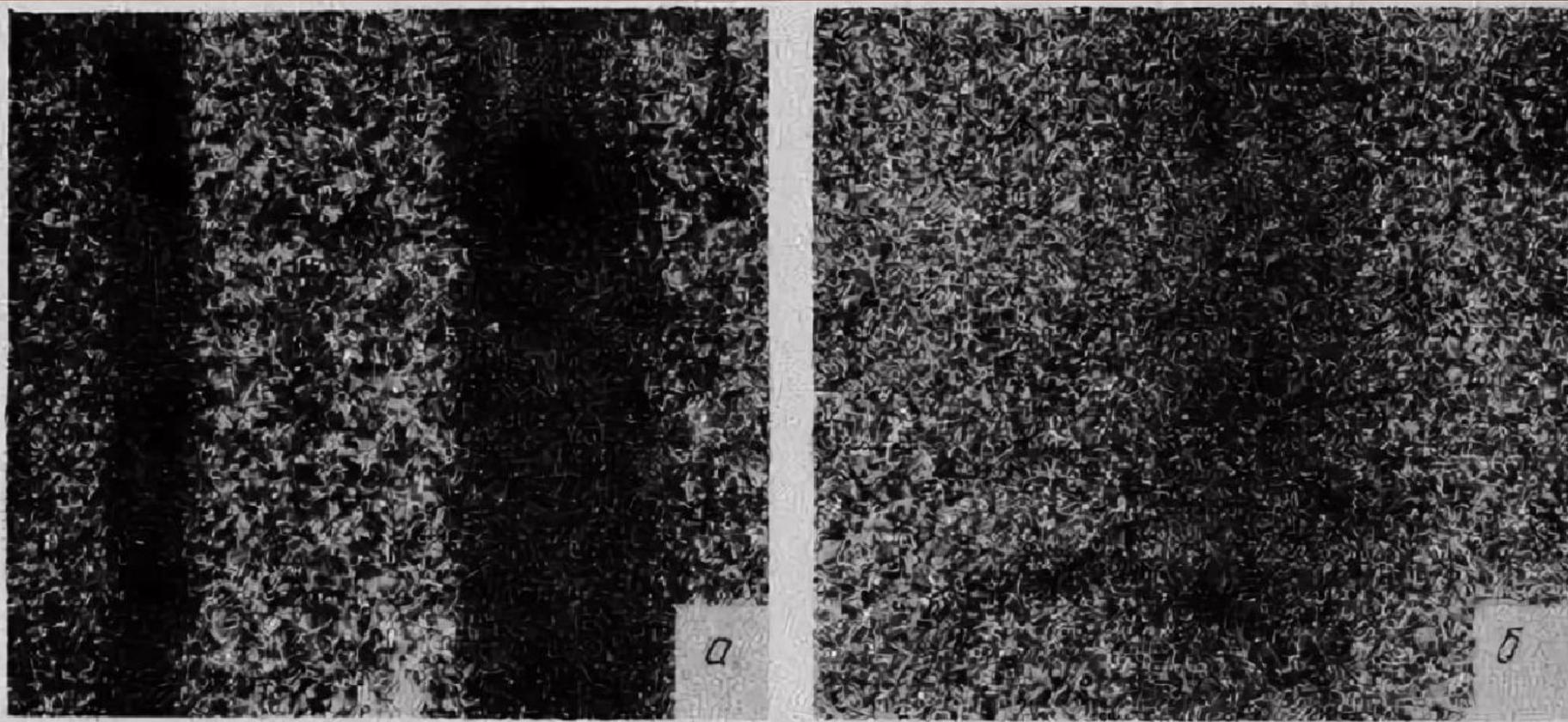


# Режим гомогенизационного отжига

Нагрев при диффузионном отжиге должен быть высоким (1100–1200 °С), так как только в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания состава в отдельных объемах стали.

В зависимости от состава стали и массы садки продолжительность выдержки составляет 8–20 ч. Общая продолжительность диффузионного отжига (нагрев, выдержка и медленное охлаждение) больших садок металла достигает 50–100 ч. и более.

# Результаты проведения гомогенизационного отжига



Микроструктура стали ШХ15 без гомогенизации (а) и после гомогенизации (б). X 100

# Рекристаллизационный отжиг

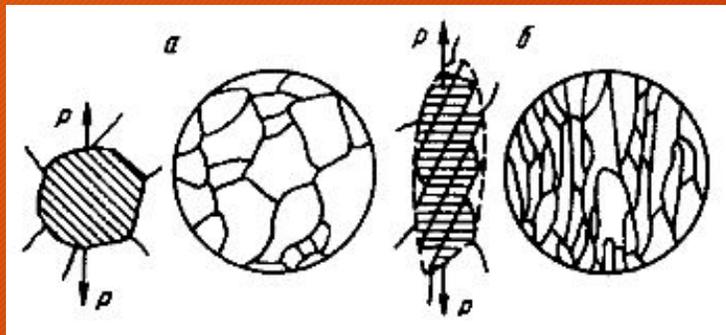
Это нагрев холоднодеформированной стали выше температурного порога рекристаллизации ( $T_p$ ), выдержку при этой температуре с последующим охлаждением.

Цель отжига—устранение наклепа и повышение пластичности. Этот вид отжига применяют перед холодной обработкой давлением и как промежуточную операцию для снятия наклепа между операциями холодные деформирования. В некоторых случаях рекристаллизационный отжиг используют и в качестве окончательной термической обработки.

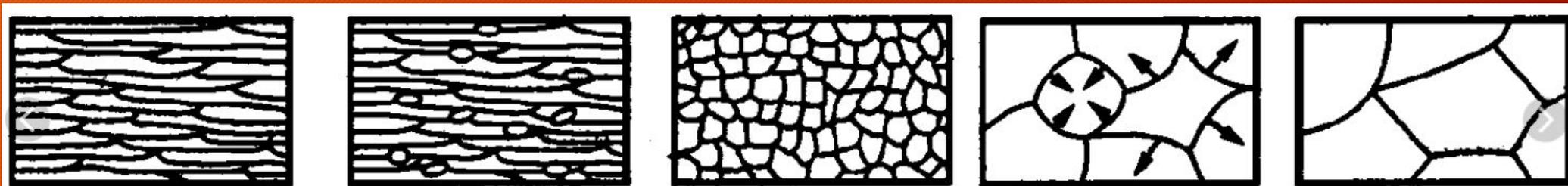


# Механизм рекристаллизационного отжига

С ростом степени деформации зерна постепенно вытягиваются в направлении пластического течения. Внутри зерен повышается плотность дефектов. При значительных деформациях образуется волокнистая структура, где границы зерен различаются с трудом.



С ростом температуры подвижность атомов растет, и образуются новые зерна вместо ориентированной волокнистой структуры. Образование новых равноосных зерен называется *рекристаллизацией*.



# Режим рекристаллизационного отжига

Температура рекристаллизационного отжига стали зависит от ее состава и чаще находится в пределах 650–760 °С. Увеличение в стали содержания углерода и легирующих элементов повышает температуру рекристаллизации. Температура отжига для достижения рекристаллизации по всему объему и для сокращения времени протекания процесса разупрочнения превышает температуру порога рекристаллизации. Для низкоуглеродистой (0,08–0,20 % С) листовой стали, подвергаемой холодной штамповке, температура рекристаллизационного отжига составляет 680–700°С, продолжительность отжига 8–12 ч.

# Отжиг для снятия напряжений

Применяется для отливок, сварных соединений, деталей после обработки резанием и др., в которых в процессе предшествующих технологических операций из-за неравномерного охлаждения, неоднородной пластической деформации и т.п. возникли остаточные напряжения. Они могут вызвать изменение размеров, коробление и появление трещин в деталях при их обработке, эксплуатации и хранении. Отжиг проводится при температуре 160...700 °С с последующим медленным охлаждением.

Так например после окончательной механической обработки детали высокой точности изготовления (ходовые винты, высоконапряженные зубчатые колеса, червяки и др.) для снятия шлифовочных напряжений подвергаются отжигу при температуре 160...180 °С 2...2,5 часа. Отжиг для снятия сварочных напряжений проводится при 650...700 °С.

Следует иметь ввиду, что остаточные напряжения также снимаются и при рекристаллизационном отжиге и при отпуске закаленной стали - особенно высоким

# Отжиг II рода

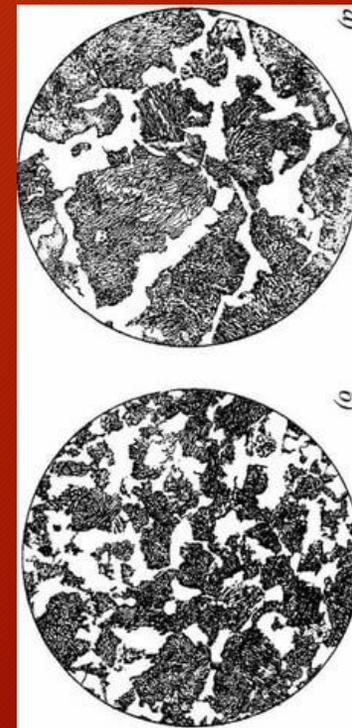
Полный, неполный, изотермический, сфероидизация,  
нормализация

# Понятие отжига II рода

Отжиг II рода (фазовая перекристаллизация) заключается в нагреве стали до температур выше точек  $A_{c3}$  или  $A_{c1}$  выдержке и последующем, как правило, медленном охлаждении, в результате которого протекающие фазовые превращения приближают сталь к практически равновесному структурному состоянию:

- феррит + перлит в доэвтектоидных сталях;
- перлит в эвтектоидной стали,
- перлит + вторичный цементит в заэвтектоидных сталях.

После отжига сталь обладает низкой твердостью и прочностью при достаточной пластичности. Фазовая перекристаллизация, происходящая при отжиге, измельчает зерно и устраняет строчечность, которая образуется при окончании горячей деформации и другие неблагоприятные (с точки зрения уровня механических свойств) структуры стали.



# Виды отжига II рода

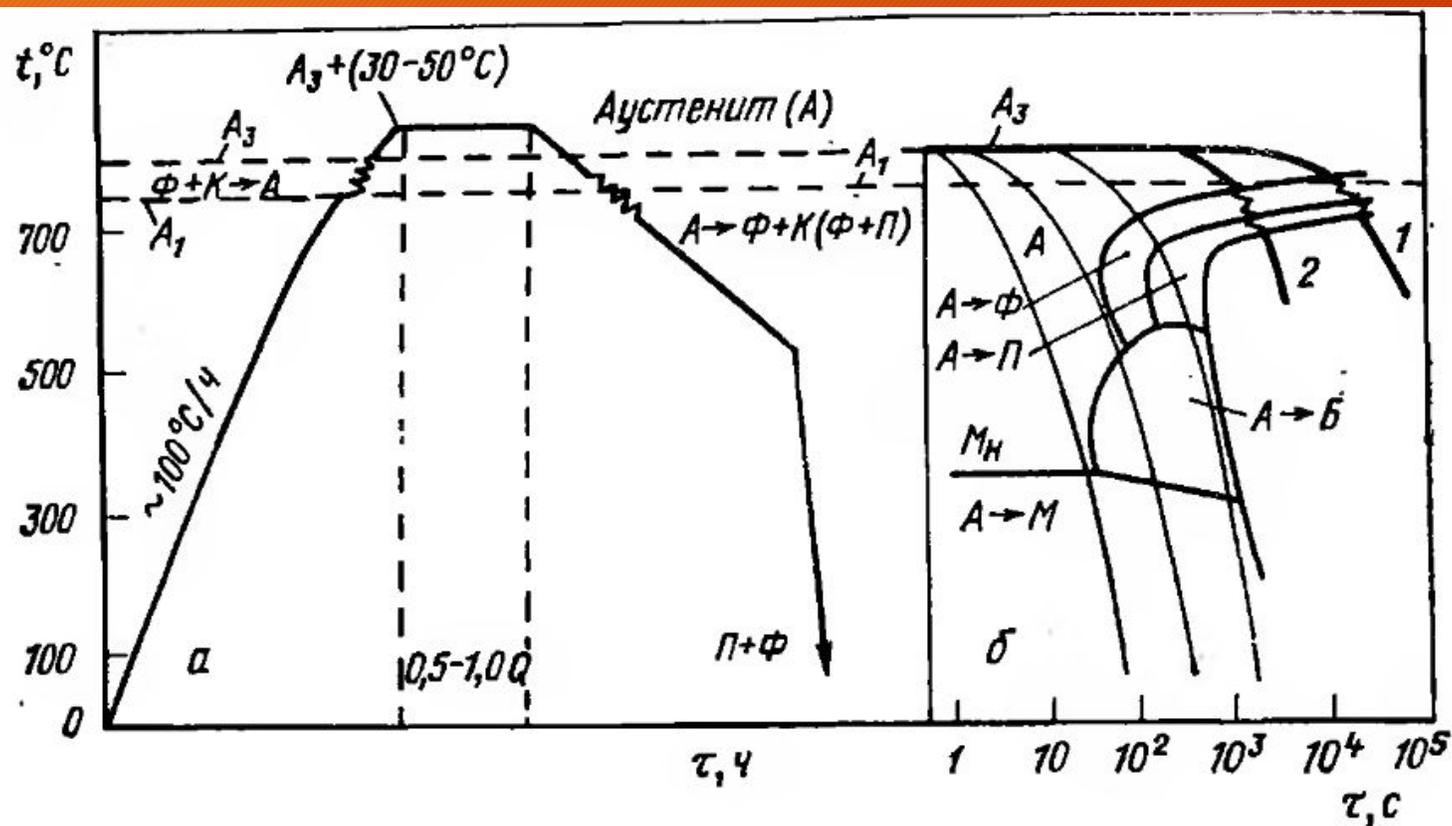


# Полный отжиг

Нагрев стали на 30–50 °С выше температуры, соответствующей точке  $A_{c3}$ , выдержке при этой температуре для полного прогрева и завершения фазовых превращений в объеме металла и последующем медленном охлаждении с печью.

При этом отжиге происходит полная фазовая рекристаллизация стали. При нагреве выше точки  $A_{c3}$  образуется аустенит характеризующийся мелким зерном, поэтому при охлаждении возникает мелкозернистая структура, обеспечивающая высокую вязкость и пластичность и получение высоких свойств после окончательной термической обработки

# Режим полного отжига



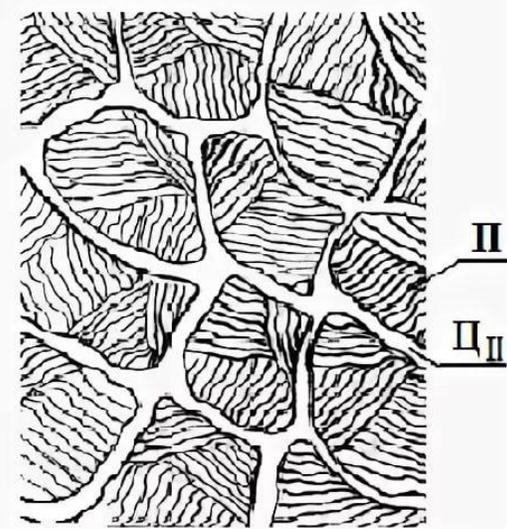
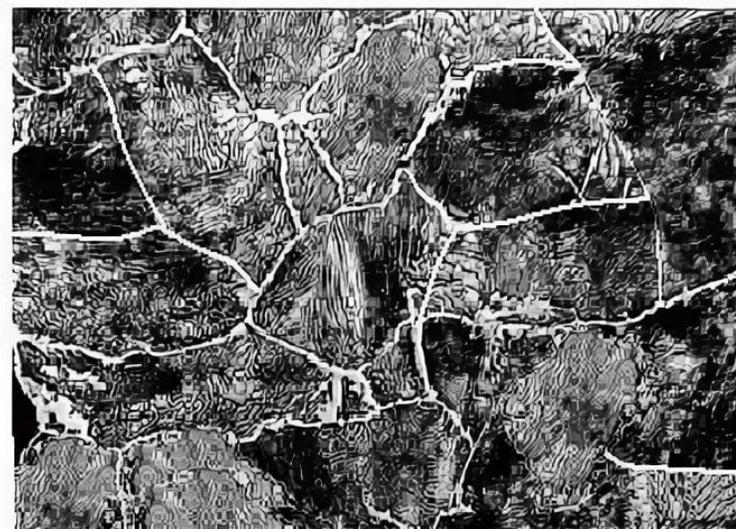
Медленное охлаждение должно обеспечить распад аустенита при малых степенях переохлаждения, чтобы избежать образования излишне дисперсной феррито-карбидной структуры и свойственной ей более высокой твердости.

Чрезмерное повышение температуры нагрева выше точки  $A_3$  вызывает рост зерна аустенита, что ухудшает свойства стали.

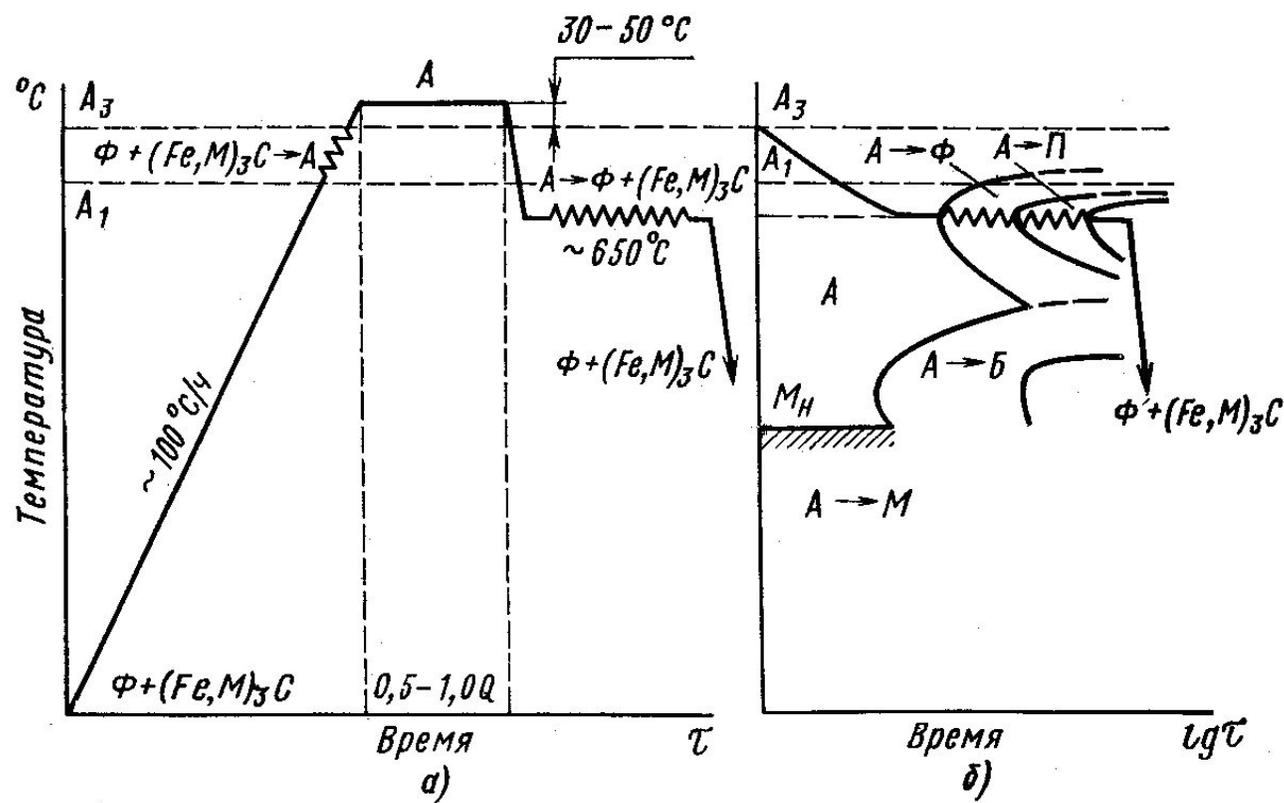
# Назначение полного отжига



Полному отжигу подвергают сортовой прокат, поковки и фасонные отливки. Полному отжигу подвергаются только доэвтектоидные стали, так как полный отжиг заэвтектоидных сталей вызывает образование грубой цементитной сетки. Это приводит к резкому снижению механических свойств стали и ухудшению ее обрабатываемости.



# Изотермический отжиг



В этом случае сталь, обычно легированную, нагревают до точки  $A_{c3} + (30...50^\circ C)$  и сравнительно быстро охлаждают (обычно переносом в другую печь) до температуры, лежащей ниже точки  $A_{c1}$  на  $100 - 150^\circ C$ , в зависимости от характера кривой изотермического распада аустенита. При этой температуре назначают изотермическую выдержку, необходимую для полного распада аустенита, после чего следует охлаждение на воздухе.

# Преимущества проведения изотермического отжига

1. Уменьшение длительности процесса, особенно для легированных сталей, которые приходится очень медленно охлаждать для требуемого снижения твердости.

2. Другое преимущество изотермического отжига заключается в получении более однородной структуры, так как при изотермической выдержке температура по сечению изделия выравнивается и превращение по всему объему стали происходит при одинаковой степени переохлаждения.

# Применение изотермического отжига

Изотермический  
отжиг



Штамповки



Заготовки  
инструмента



Другие  
небольшие  
детали



# Возможно ли применение изотермического отжига для массивных садок?



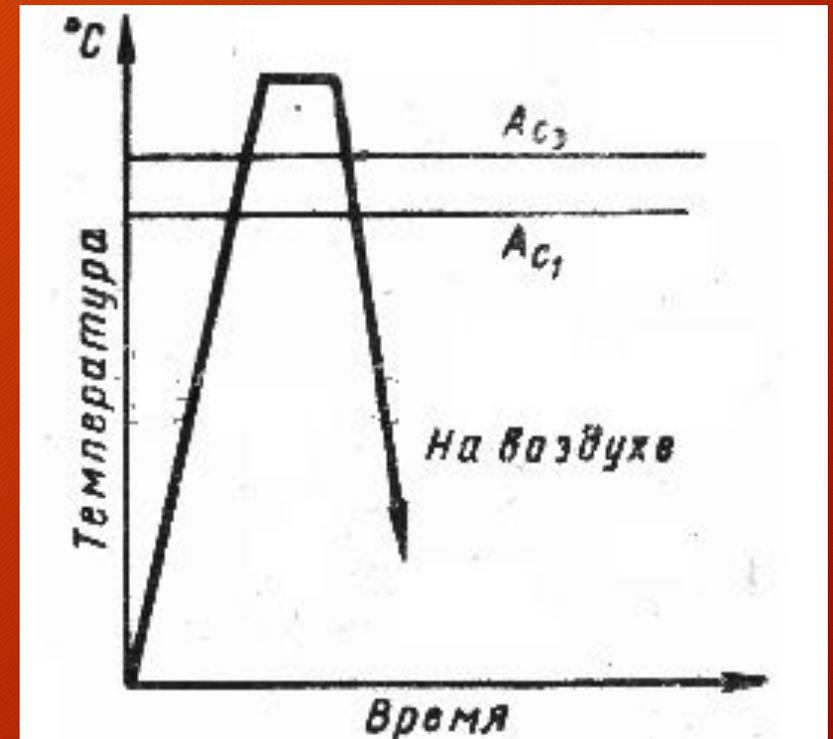
Большие садки изотермическому отжигу не подвергают из-за образования неравномерной структуры и твердости.

# Нормализационный отжиг (Нормализация)

Нормализация заключается в нагреве доэвтектоидной стали до температуры, превышающей точку  $A_{c3}$  на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , заэвтектоидной выше  $A_{cm}$  также на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  непродолжительной выдержки для прогрева садки и завершения фазовых превращений и охлаждении на воздухе.

Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию стали и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье или прокатке, ковке или штамповке.

Нормализацию широко применяют для улучшения свойств стальных отливок вместо закалки и отпуска

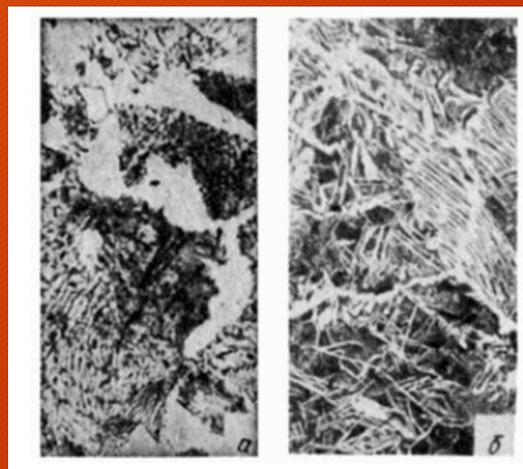


# Цель нормализации

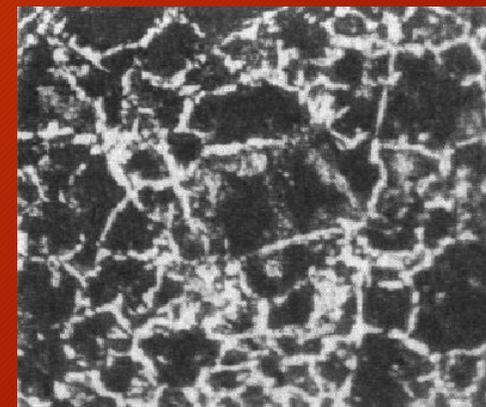
Цель нормализации — получение мелкозернистой структуры, выравнивание структурной неоднородности (в поковках, отливках или деталях после цементации), улучшение обрабатываемости резанием (для низкоуглеродистой стали), повышение твёрдости и механических свойств, устранение наклёпа после обработки резанием и подготовка структуры к последующей термообработке (закалке).



Строчечная структура конструкционной углеродистой стали (сернистые включения - центры кристаллизации доэвтектоидного феррита).  $\times 250$



Структура стали 50,  $\times 100$ :  
а - крупнозернистая;  
б — «видманштетт»;



Структура доэвтектоидной стали после нормализации

# Назначение нормализации

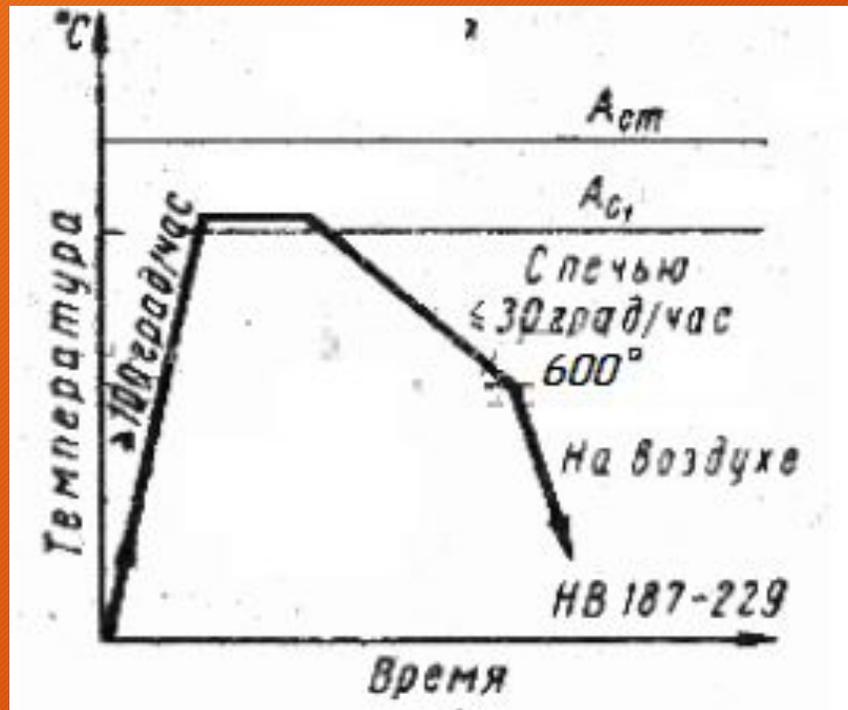
Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали.

Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. Нормализация обеспечивает большую производительность при обработке резанием и получение более чистой поверхности.

Для отливок из среднеуглеродистой стали нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска. Механические свойства в этом случае будут ниже, но изделия будут подвергнуты меньшей деформации по сравнению с получаемой при закалке, и вероятность появления трещин практически исключается.



# Неполный отжиг



В данном случае сталь нагревают до более низкой температуры (немного выше точки  $A_{c1}+30..50^{\circ}\text{C}$ ).

При неполном отжиге доэвтектоидной стали происходит частичная перекристаллизация стали, а именно лишь переход перлита в аустенит. Избыточный феррит лишь частично превращается в аустенит, поэтому значительная его часть не подвергается перекристаллизации.

Для доэвтектоидной стали неполный отжиг применяется лишь тогда, когда отсутствует перегрев, ферритная полосчатость, а требуется только снижение твердости.

Заэвтектоидные стали подвергают только неполному отжигу. В этих сталях нагрев несколько выше точки  $A_{c1}$  (обычно на 10–30 °С) вызывает практически полную перекристаллизацию металлической матрицы.

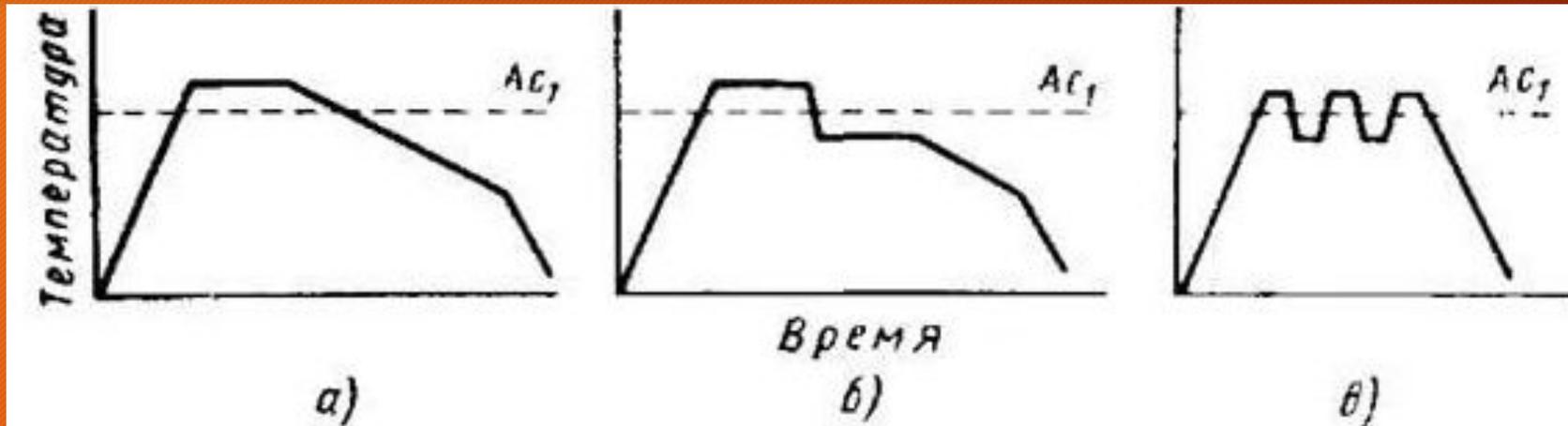
# Сфероидизирующий отжиг (отжиг на зернистый перлит)

Сфероидизирующий отжиг является разновидностью неполного отжига, когда сталь нагревают для аустенитизации до межкритических температур.

Сфероидизирующий отжиг - вид термической обработки сталей с нагревом выше  $A_{C1}$ , но ниже  $A_{C3}$ , изотермической выдержке с последующим очень медленным охлаждением (30-50 С/ч) до подкритической температуры (~650<sup>0</sup>С) для получения структуры зернистого перлита (сферодита).

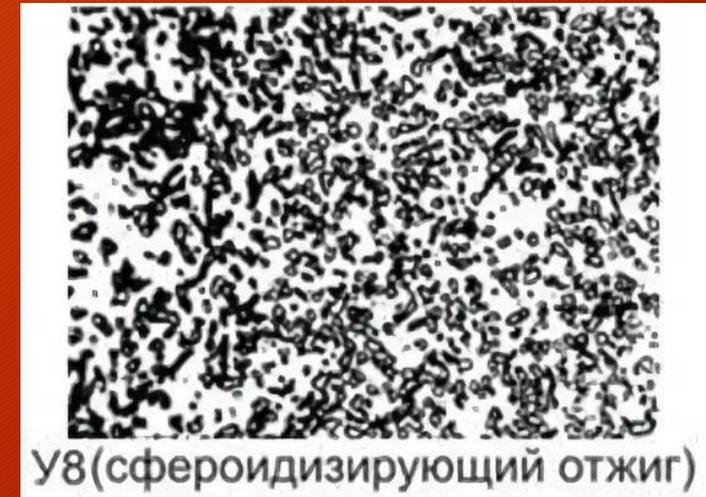
Стали, близкие к эвтектоидному составу, имеют узкий интервал температур нагрева (750—760 °С) для отжига на зернистый перлит, для заэвтектоидных углеродистых сталей интервал расширяется до 770—790 °С. Легированные заэвтектоидные стали для получения зернистых карбидов можно нагревать до более высоких температуры в более широком интервале (770—820 С).

# Режимы сфероидизирующего отжига



Графики отжига на зернистый перлит:

а — при непрерывном охлаждении; б — при изотермической выдержке;  
в — маятниковый (циклический)



Охлаждение при сфероидизации должно быть медленное, чтобы обеспечить распад аустенита на феррито-карбидную структуру, сфероидизацию и коагуляцию образовавшихся карбидов, при охлаждении до 620–680 °С. Чаще применяют изотермический отжиг, требующий меньше времени. В этом случае сталь медленно охлаждают (30-50 °С/ч) до 620–680 °С. Выдержка при постоянной температуре, необходимая для окончательного распада аустенита и коагуляции карбидов, составляет 1-3 часа в зависимости от массы отжигаемого металла. Далее охлаждение проводят на воздухе

# Преимущества и недостатки сфероидизирующего отжига

-

Длительность процесса

Трудности в соблюдении режимов, особенно при узких интервалах отжигаемости

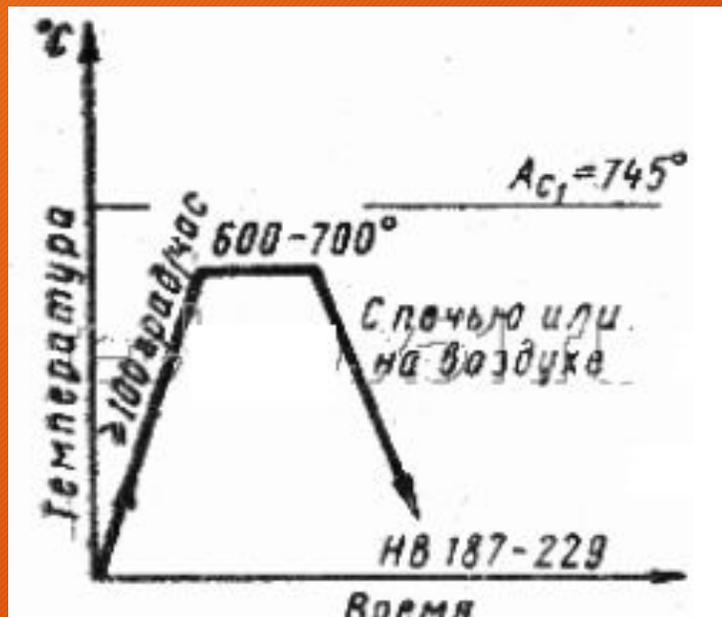
+

Сталь со структурой зернистого перлита имеет меньшую склонность к росту аустенитного зерна, более широкий допустимый интервал закалочных температур, меньшую склонность к растрескиванию при закалке, более высокие прочность и вязкость после закалки (мелкие глобулы равномерно распределены в мартенсите закаленной заэвтектоидной стали).

Зернистый перлит является оптимальной исходной структурой перед закалкой

Сталь со структурой зернистого перлита обладает наименьшей твердостью, легче обрабатывается резанием, что особенно важно, например, для работы автоматических линий в условиях массового подшипникового производства.

# Низкий отжиг (высокий отпуск)



После горячей пластической обработки сталь чаще имеет мелкое зерно и удовлетворительную микроструктуру, поэтому не требуется фазовой перекристаллизации (отжига). Но вследствие ускоренного охлаждения после прокатки или другой горячей обработки легированные стали имеют неравновесную структуру: сорбит, троостит, бейнит или мартенсит и, как следствие этого, высокую твердость.

Для снижения твердости на металлургических заводах сортовой прокат подвергают высокому отпуску при  $650-680^\circ\text{C}$  (несколько ниже точки  $A_1$ ). При нагреве до указанных температур происходят процессы распада мартенсита и (или) бейнита, коагуляция карбидов в троостите и в итоге снижается твердость.

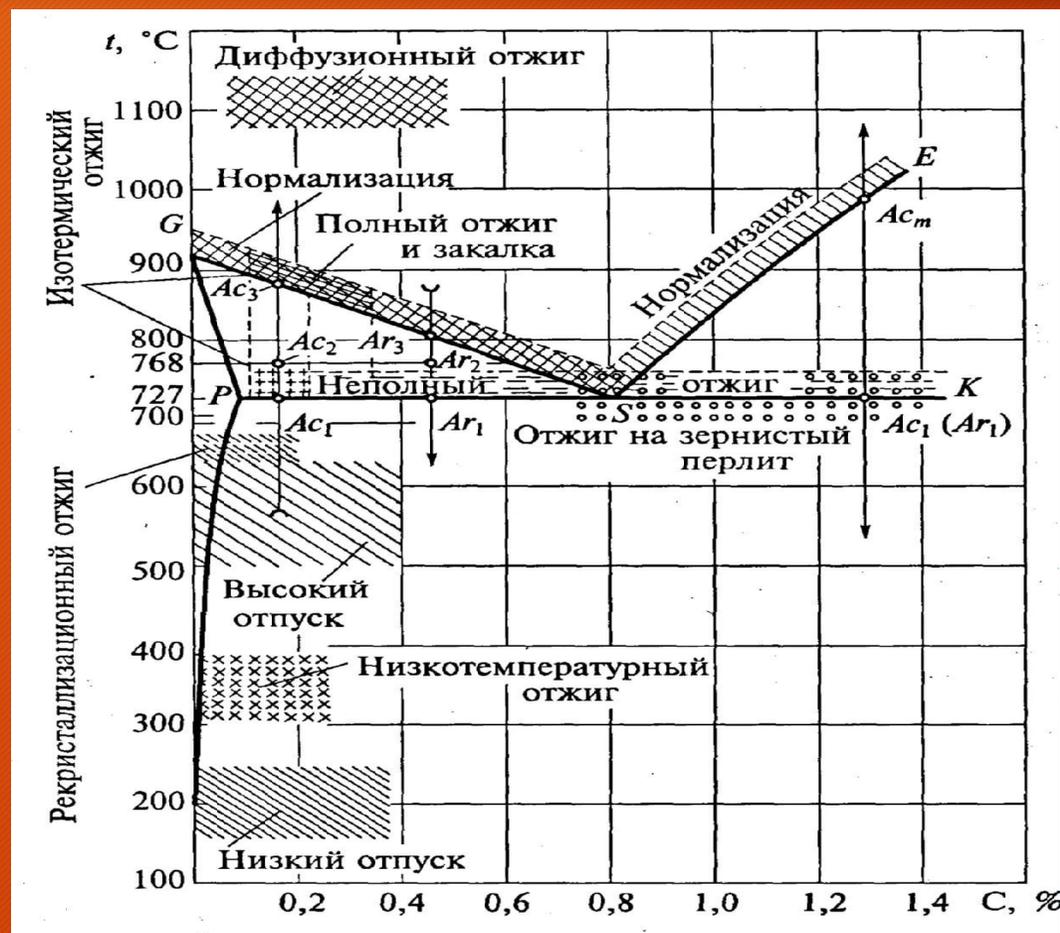
# Применение низкого отжига

Углеродистые стали подвергают высокому отпуску в тех случаях, когда они предназначены для обработки резанием, холодной высадки или волочения. После высокотемпературного отпуска доэвтектоидная сталь лучше обрабатывается резанием, чем после полного отжига, когда структура — обособленные участки феррита и перлита. Структурно свободный феррит налипает на кромку инструмента, ухудшает качество поверхности изделия, снижает теплоотдачу, и поэтому снижает скорость резания и стойкость инструмента.

Для высоколегированных сталей, у которых практически не отмечается перлитного превращения, высокий отпуск является единственной термической обработкой, позволяющей понизить их твердость.



# Связь различных видов отжигов с диаграммой железо-цементит



# Закалка.

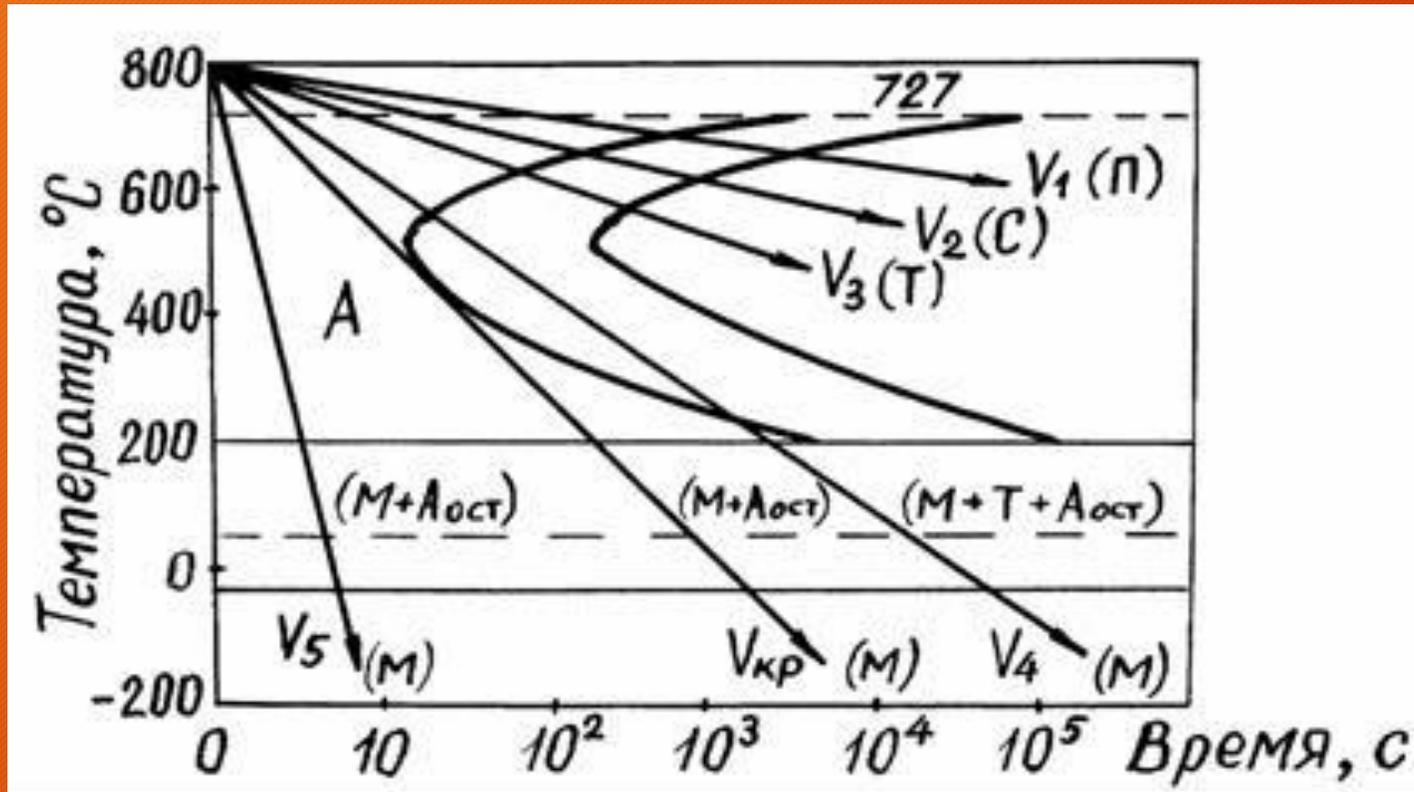
Назначение, виды и способы закалки.  
Охлаждение при закалке. Дефекты закалки



# Что такое закалка?



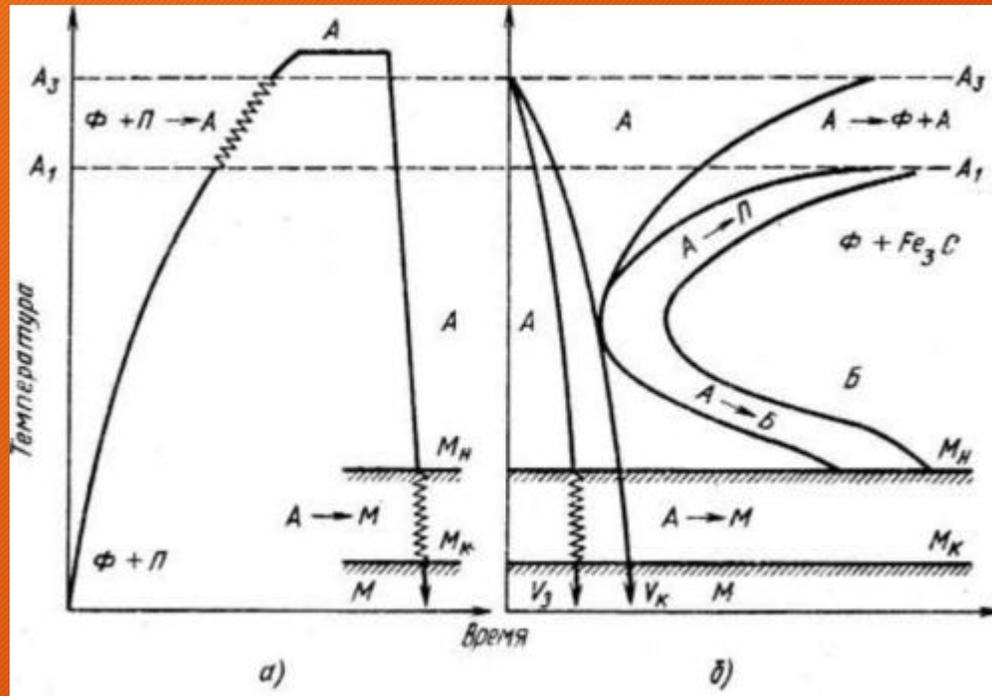
Закалка - процесс термической обработки, заключающийся в нагреве стали до температуры выше критической и последующим охлаждением со скоростью больше критической скорости охлаждения



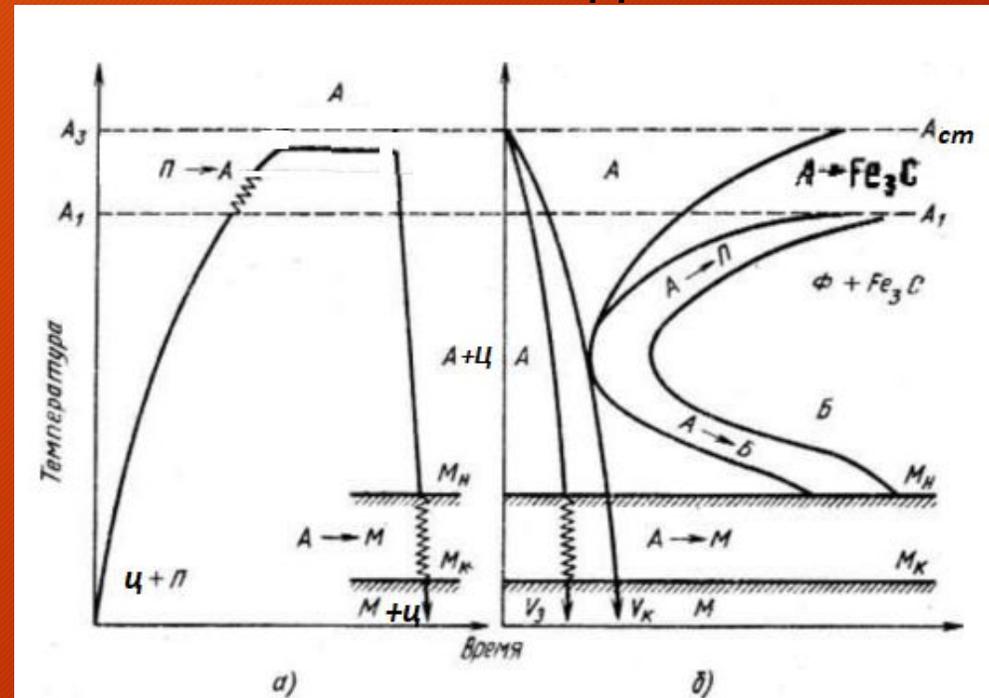
Минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до температуры  $M_n$  и превращается в мартенсит, называется критической скоростью закалики

# Выбор температуры нагрева при закалке

- Сталь доэвтектоидная



- Сталь заэвтектоидная



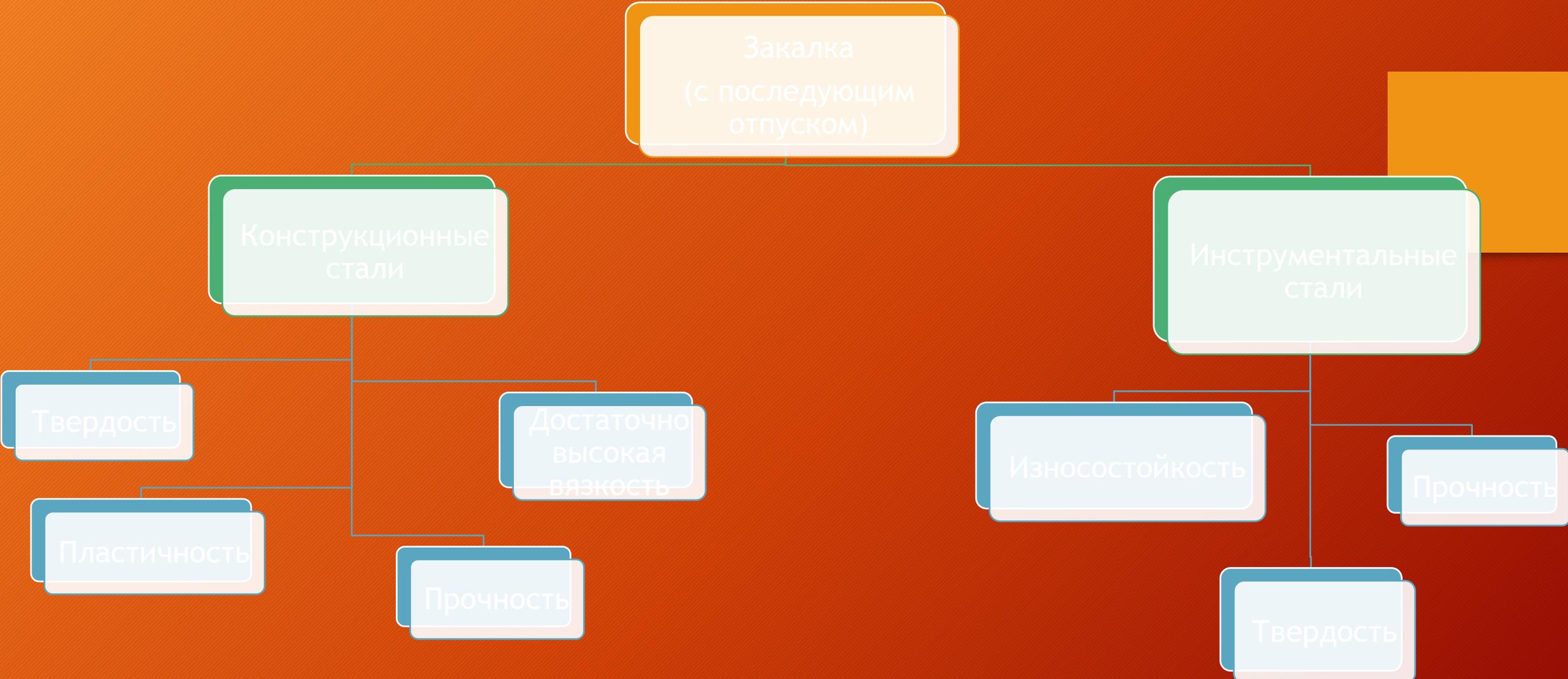
- Закалка заключается в нагреве стали на 30–50 °С выше  $A_{c3}$  для доэвтектоидных сталей или на 30–50 °С выше  $A_{c1}$  для заэвтектоидных сталей, выдержке для завершения фазовых превращений и последующем охлаждении со скоростью выше критической.

# Цель проведения закалки



Цель закалки с последующим отпуском\* — обеспечение работоспособности, длительной эксплуатационной стойкости изделий, получение высоких характеристик механических свойств или изменение физических свойств (электрических и магнитных).

\* Закалка сама по себе не является окончательной операцией термической обработки. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжения, вызванные закалкой, и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки подвергают отпуску.



Инструментальную сталь подвергают закалке и отпуску для повышения твердости, износостойкости и прочности, а конструкционную сталь – для повышения прочности, твердости, получения достаточно высокой пластичности, вязкости (параметров вязкости разрушения).

1. В одном  
охладителе

2. Прерывистая  
закалка  
(в 2 средах)

Способы  
закалки

3. Ступенчатая  
закалка

6. Закалка с  
самоотпуском

5. Светлая  
закалка

4. Изотермическая  
закалка

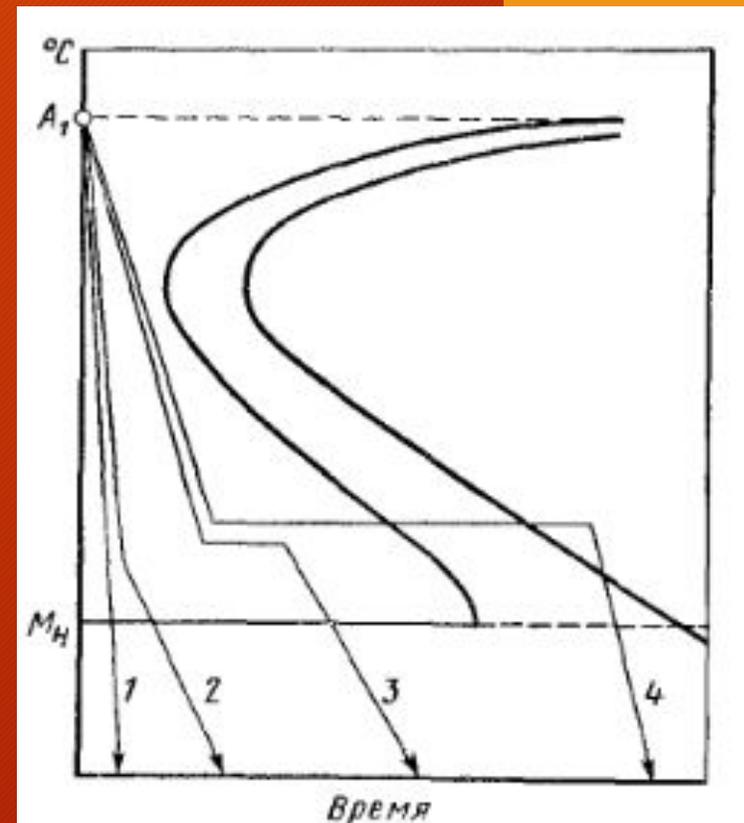


Рис. 66. Кривые охлаждения при различных способах закалки, нанесенные на диаграмму изотермического распада аустенита

# Закалка в одном охладителе

Распространена наиболее широко. Деталь нагревают до температуры закалки и охлаждение производят в одной среде. Если охлаждение производят в жидкой среде, то с целью повышения эффективности закалки, среду постоянно перемешивают, либо детали погружают строго вертикально. Если требуется закалить только часть поверхности изделия, в закалочный бак погружают только необходимую часть детали.

# Закалка в 2-х средах

Изделие, закаливаемое по этому способу, сначала быстро охлаждают в воде до температуры несколько выше точки  $M_n$ , а затем быстро переносят в менее интенсивный охладитель (например, в масло или на воздух), в котором оно охлаждается до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В результате охлаждения во второй закалочной среде уменьшаются внутренние напряжения, которые возникли бы при быстром охлаждении в одной среде (воде), в том числе и в области температур мартенситного превращения.

# Ступенчатая закалка

При выполнении закалки по этому способу сталь после нагрева до температуры закалки охлаждают в среде, имеющей температуру несколько выше точки  $M_n$  (обычно 180–250 °С), и выдерживают в ней сравнительно короткое время. Затем изделие охлаждают до комнатной температуры на воздухе. В результате выдержки в закалочной среде достигается выравнивание температуры по всему сечению изделия, но эта выдержка должна быть ограничена и не должна вызывать превращения аустенита с образованием бейнита.

Мартенситное превращение протекает при охлаждении на воздухе, но менее полно, чем при непрерывной закалке, вследствие чего сталь сохраняет больше остаточного аустенита. При ступенчатой закалке уменьшаются объемные изменения вследствие присутствия большего количества остаточного аустенита и возможности самоотпуска мартенсита; коробление в результате протекания мартенситного превращения почти одновременно во всех участках изделия и опасность появления трещин.

Ступенчатая закалка углеродистых сталей может быть применена лишь для изделий диаметром не более 8–10 мм. Скорость охлаждения более крупных изделий в среде с температурой выше точки  $M_n$  оказывается ниже критической скорости закалки, и аустенит претерпевает распад на не мартенсит, а на бейнит

# Изотермическая закалка

Закалку по этому способу выполняют в основном так же, как и ступенчатую, но в данном случае предусматривается более длительная выдержка выше точки  $M_n$ . При такой выдержке происходит распад аустенита с образованием нижнего бейнита. Для углеродистых сталей изотермическая закалка не дает существенного повышения механических свойств по сравнению с получаемыми обычной закалкой и отпуском.

У большинства легированных сталей распад аустенита в промежуточной области не идет до конца. Если аустенит, не распавшийся при изотермической выдержке, не претерпевает мартенситного превращения при дальнейшем охлаждении, то сталь получает структуру бейнит + 10-20 % остаточного аустенита, обогащенного углеродом. При такой структуре достигается высокая прочность при достаточной вязкости. Для многих сталей изотермическая закалка, обеспечивает значительное повышение конструктивной прочности, т. е. прочности образцов сложной формы.

Если же большая часть аустенита, не распавшегося после окончания промежуточного превращения, при последующем охлаждении претерпевает мартенситное превращение, то изотермической закалкой нельзя получить высокие механические свойства. В этом случае резко снижается пластичность.

# Охлаждающая среда и продолжительность выдержки при ступенчатой и изотермической закалке

Продолжительность выдержки в закалочной среде зависит от устойчивости аустенита при температурах выше точки  $M_n$ , определяемых диаграммой изотермического распада аустенита для данной стали.

В качестве охлаждающей среды, при ступенчатой и изотермической закалке чаще применяют расплавленные соли в интервале температур 150-500 °С, например 55 %  $KNO_3$  и 45 %  $NaNO_2$  (или  $NaNO_3$ ), а также расплавленные щелочи (20 %  $NaOH$  и 80 %  $KOH$ ). Чем ниже температура соли (щелочи), тем выше скорость охлаждения в ней. Поскольку расплавленные соли охлаждаются только вследствие теплоотдачи, то охлаждающая способность их возрастает при перемешивании: Добавление воды (3-5 %) в расплавы едких щелочей (с помощью специального приспособления) при погружении в них нагретого для закалки изделия вызывает кипение и увеличение скорости охлаждения в области температур перлитного превращения. Скорость охлаждения возрастает при 400-450 °С в 4-5 раз, а при 300 °С - в 2 раза.

# Светлая закалка

Разновидность ступенчатой закалки. Если детали предварительно нагревались в жидких солях (т. е. солях, не вызывающих окисления), то охлаждение в расплавах едких щелочей, позволяет получить чистую поверхность светло-серого цвета. Закалку по этому способу называют **светлой**

# Закалка с самоотпуском

В этом случае охлаждение изделия в закалочной среде прерывают с тем, чтобы в сердцевине изделия сохранилось еще некоторое количество тепла. Под действием теплообмена температура в более сильно охладившихся поверхностных слоях повышается и сравнивается с температурой сердцевины — происходит отпуск поверхности стали (самопуск). Нередко в сердцевине остается больший запас тепла, чем это требуется для самопуска. Тогда во избежание излишнего разогрева поверхности изделие вновь погружают в закалочную среду. Сердцевина в случае закалки с самопуском имеет более низкую твердость, чем поверхностные слои.

# Отпуск стали, его назначение и виды.

Изменение свойств стали с увеличением температуры отпуска.

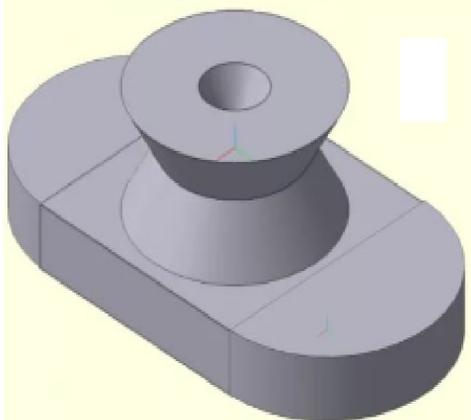
Улучшение стали

# Что такое отпуск?

Отпуск - операция термической обработки, заключающаяся в нагреве закаленной стали до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью.

Скорость охлаждения после отпуска оказывает большое влияние на величину остаточных напряжений. Чем медленнее охлаждение, тем меньше остаточные напряжения. Быстрое охлаждение в воде от  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  создает новые тепловые напряжения.

# Выбор оптимальной скорости охлаждения после отпуска



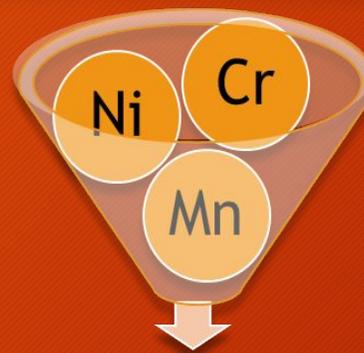
## Деталь простой формы

После отпуска скорость охлаждения принимается любая (вода, масло, воздух)



## Деталь, сложной конфигурации

После отпуска медленное охлаждение на воздухе во избежание коробления и образования трещин



Сталь легированная

## Cr-Ni, Cr-Mn стали

Обязательно быстрое охлаждение после отпуска (в районе 450-650°C) во избежание отпускной хрупкости II рода



## Пружины

Охлаждение после отпуска при 400–450 °С следует проводить в воде, для образования на поверхности сжимающих остаточных напряжений

# Виды отпуска закаленной стали

## Отпуск

```
graph TD; A[Отпуск] --> B[Низкий до 250°C]; A --> C[Средний 350–500°C]; A --> D[Высокий 500–680 °C];
```

**Низкий**  
до 250°C

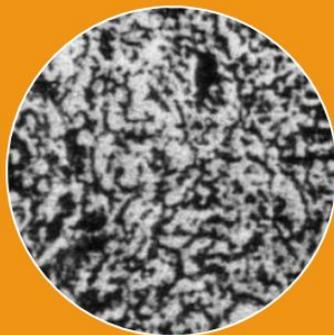
**Средний**  
350–500 °C

**Высокий**  
500–680 °C

# Микроструктура стали после различных видов отпуска



Низкий отпуск  
(мартенсит отпуска)



Средний отпуск  
(Троостит отпуска)



Высокий отпуск  
(сорбит отпуска)



# Применение и свойства, приобретаемые сталью после проведения различных видов отпуска

## Низкий отпуск

- Повышение прочности, износостойкости и незначительное улучшение вязкости без заметного снижения твердости, HRC  $\approx$  58– 63
- Низкотемпературному отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали, претерпевшие поверхностную закалку, цементацию, цианирование или нитроцементацию



## Средний отпуск

- Обеспечивает высокие пределы упругости и выносливости и релаксационную стойкость
- Применяют главным образом для пружин и рессор, а также для штампов



## Высокий отпуск

- Наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.
- Термическую обработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют улучшением.
- Улучшению подвергают среднеуглеродистые (0,3–0,5 % C) конструкционные стали, к которым предъявляются высокие требования по пределу выносливости и ударной вязкости



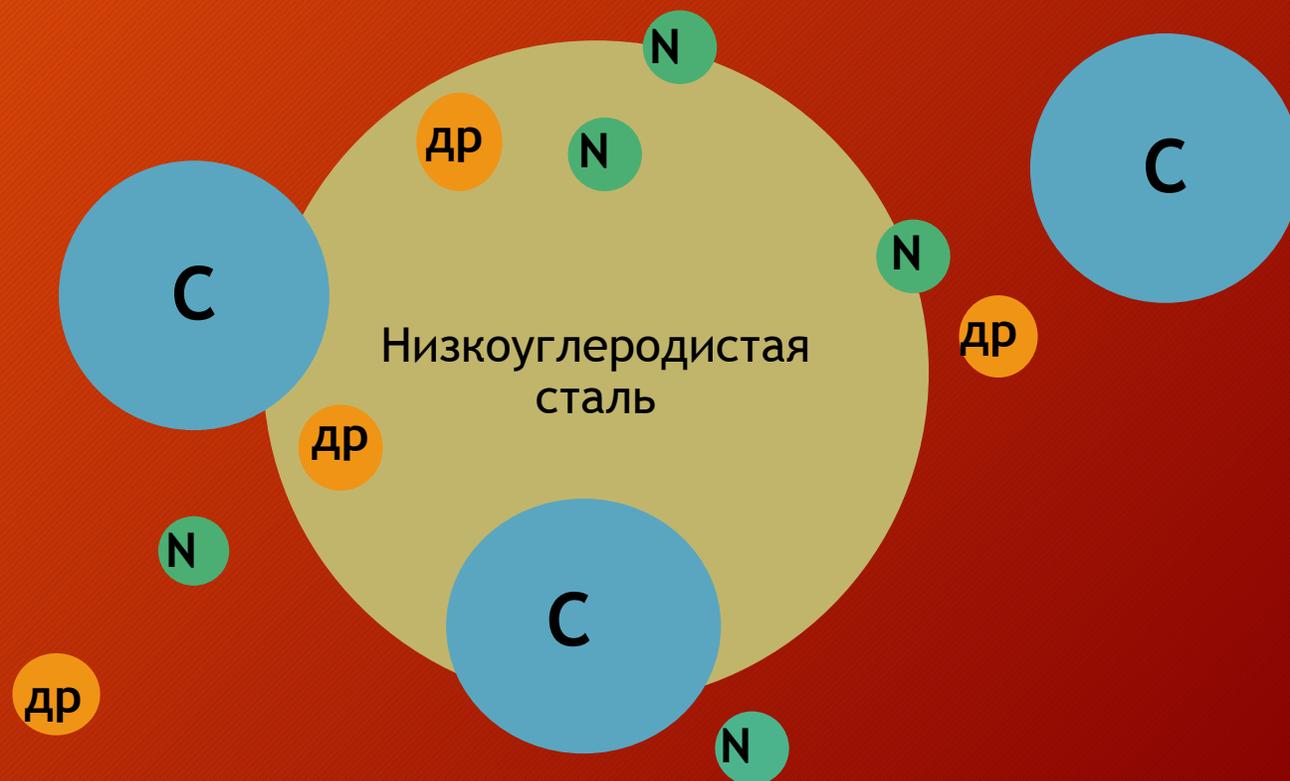
# Химико-термическая обработка

Ее назначение и виды

# Определение химико-термической обработки (ХТО)

Химико-термической обработкой называют процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев и металла.

Основной движущий механизм- диффузия атомов



# Основные виды ХТО



# Цементация

Цементацией (науглероживанием) называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагреве в соответствующей среде – карбюризаторе. Как правило, цементацию проводят при температурах выше точки  $A_{c3}$  (930–950 °С), когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в большом количестве.

Окончательные свойства цементованные изделия приобретают в результате закалки и низкого отпуска, выполняемых после цементации.

# Назначение цементации и последующей термической обработки



Назначение цементации и последующей термической обработки – придать поверхностному слою высокую твердость и износостойкость, повысить предел контактной выносливости и предел выносливости при изгибе и кручении.

\*В качестве окончательной термической обработки после цементации всегда применяется закалка +низкий отпуск, с целью сохранения высокой поверхностной твердости

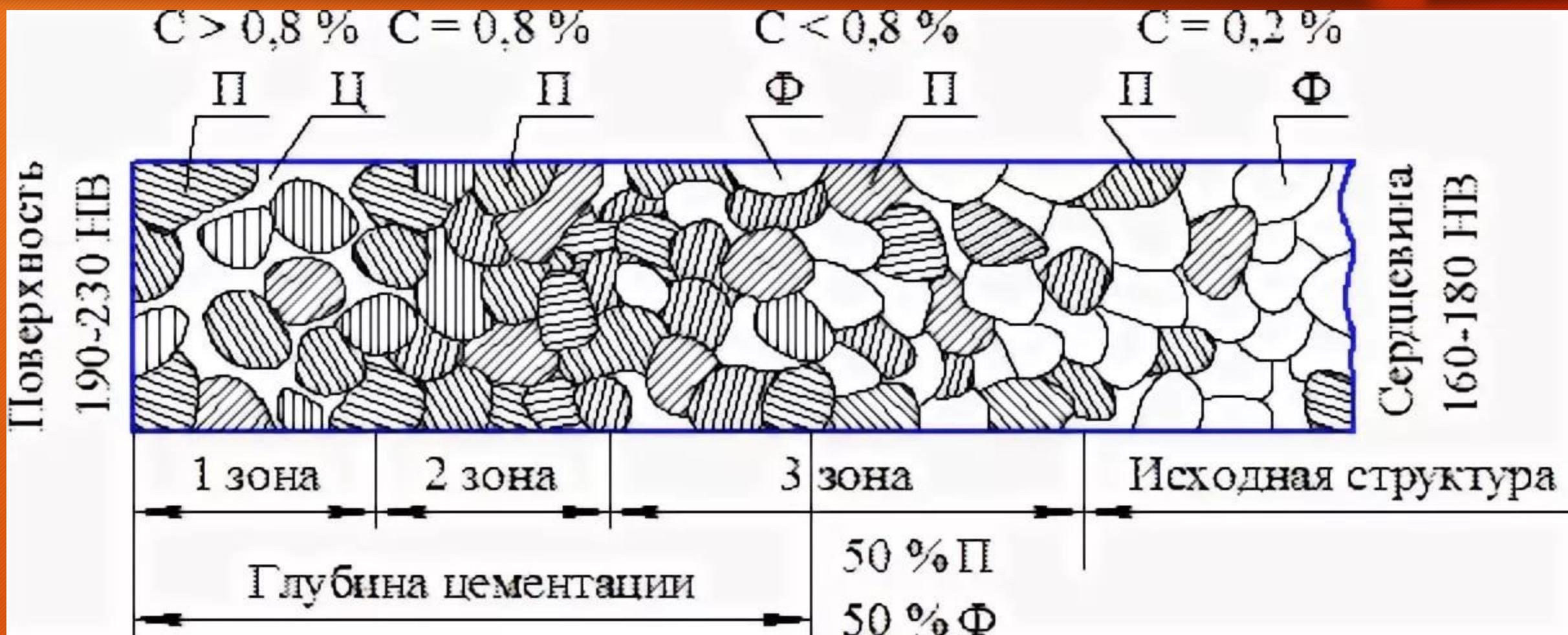
# Выбор марки стали для цементации



Сталь для цементации обычно используют низкоуглеродистые легированные, с содержанием углерода 0,1-0,2%, для крупных изделий допускается применение сталей с содержанием углерода до 0,3%

Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом при цементации, сохраняла высокую вязкость после заковки.

# Микроструктура цементованного слоя



# Графики цементации и последующей ТО

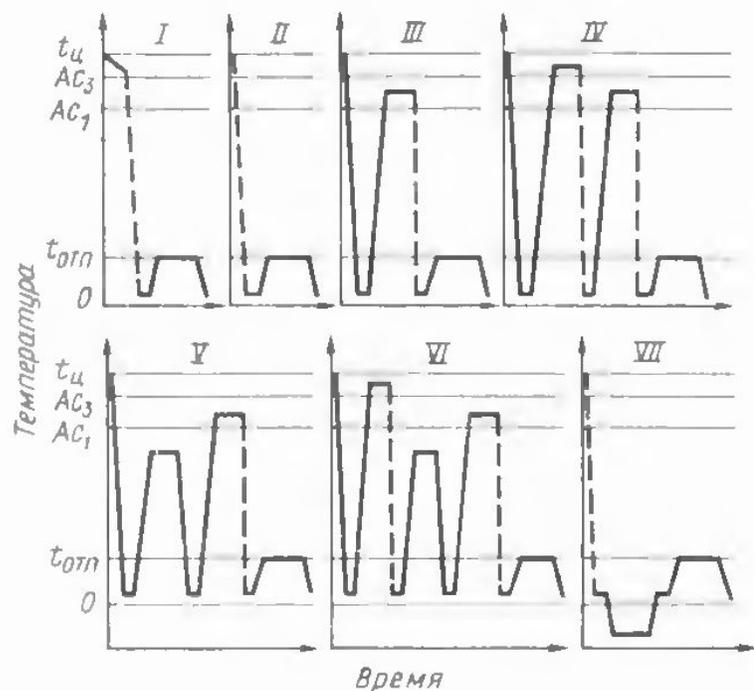


Рис. 38. Схема режимов термической обработки деталей после цементации (значения  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  приведены для сердцевины):

$t_{ц}$  — температура цементации; штриховые линии — закалочное охлаждение в масле

1 и 2 режимы свойственны сталям наследственно мелкозернистым Ц/З+о

3 режим - детали с крупным зерном после Ц и мелкозернистые легированные стали Ц+З+о

4 режим - ответственные детали Ц+Н/З+З+о. Первая закалка или нормализация устраняет цементитную сетку и измельчает зерно сердцевины, вторая - зерно поверхности и упрочняет.

5 режим - хромоникелевые стали подвергаю после цементации высокому отпуску перед закалкой для устранения Ауст.

6 режим - для ответственных деталей с очень высокой степенью устойчивости аустенита (18Х2Н4ВА), Н+ВО+З+о

7 режим - обработка холодом для устранения Ауст.

# Нитроцементация

При нитроцементации легированных конструкционных сталей проводится насыщение поверхности не только углеродом, но и азотом, в результате добавок к эндотермической атмосфере 2–5% аммиака; температура насыщения 830–860° С; дополнительное подстуживание перед закалкой не проводится.

При нитроцементации эффективная толщина слоя не должна превышать 1,0 мм, так как при толщине слоя выше этого предела в структуре стимулируется образование различных дефектов, которые значительно снижают прочность.

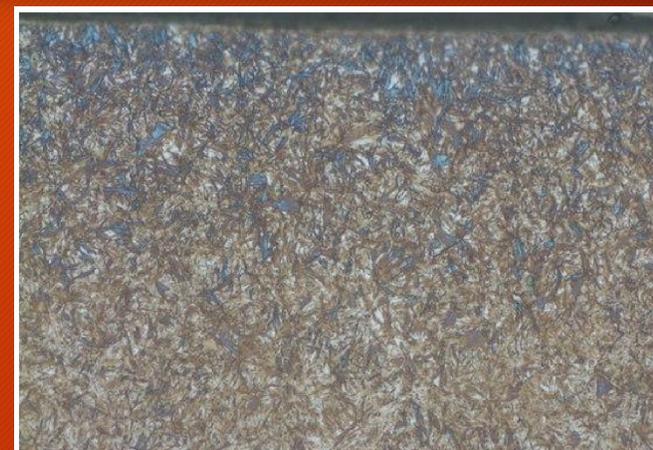
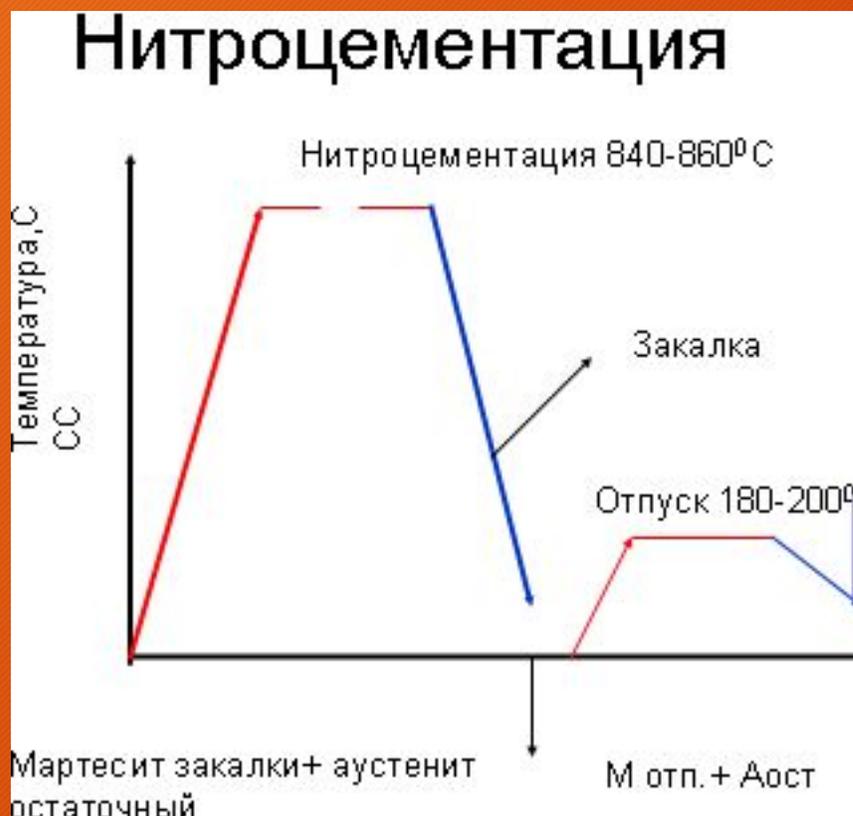
# Особенности процесса нитроцементации по сравнению с цементацией

- Следует учитывать, что совместное насыщение углеродом и азотом приводит к повышению скорости диффузии углерода, вследствие чего длительность насыщения при нитроцементации ( $850^{\circ}\text{C}$ ) для получения толщины слоя до 0,5 мм не отличается от длительности при цементации ( $930^{\circ}\text{C}$ ).

Снижение температуры насыщения позволяет сохранить в стали мелкое зерно аустенита и проводить непосредственную закалку (с температуры насыщения или с подстуживанием), что уменьшает деформацию деталей (особенно при охлаждении в горячих средах по способу ступенчатой закалки).

- Кроме того, при нитроцементации за счет образования в слое дисперсных карбонитридов значительно повышается износостойкость, теплостойкость и коррозионная стойкость стали; равнозначная с цементованными деталями прочность достигается меньших толщинах слоев. За счет легирования твердого раствора азотом снижается критическая скорость закалки, что создает условия для применения ступенчатой закалки.

# Графики термической обработки нитроцементация



После насыщения структура нитроцементованного слоя состоит из мелкокристаллического мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25-30 % остаточного аустенита. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска составляет 58-64 HRC.

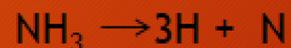
Высокое содержание остаточного аустенита обеспечивает хорошую прирабатываемость

# Азотирование



Азотированием называют процесс насыщения поверхности стали азотом. Толщина азотированного слоя находится в пределах от 0,01-0,2 мм. Впервые процесс азотирования был исследован и практически применен профессором Н. П. Чижевским в 1913 г.

Суть процесса: В печь с находящимися в ней деталями подается газ - преимущественно аммиак, который при нагреве распадается по следующей реакции:



Получающийся атомарный азот проникает на поверхность стали и диффундирует в решетку  $\alpha$ -железа, образуя при этом азотистый феррит.

# Микроструктура азотированного слоя (на примере железа)

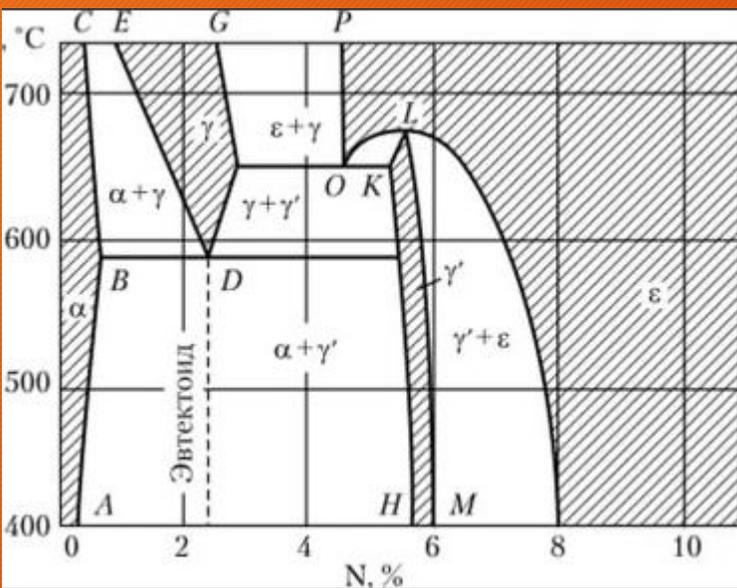


Диаграмма состояния железо-азот

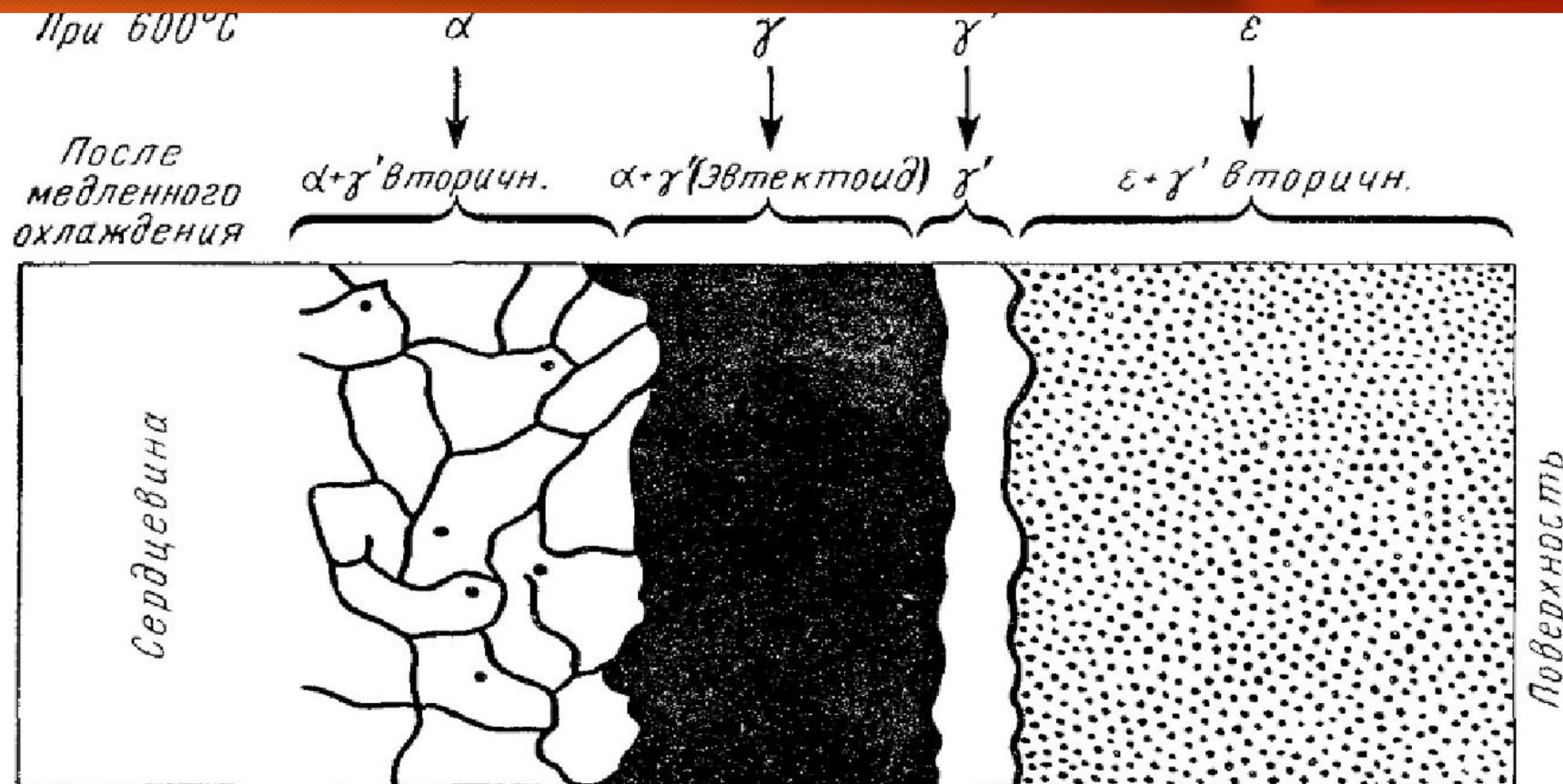


Рис. Азотированный слой железа; температура азотирования 600° С (схема микроструктуры)

# Назначение азотирования



Назначение азотирования - получить высокую поверхностную твердость и износостойкость, повысить предел выносливости (прочностное азотирование), или повысить стойкость против коррозии (антикоррозийное азотирование).

| Стали            | Твердость, HV |
|------------------|---------------|
| Углеродистые     | 200–250       |
| Легированные     | 600–800       |
| <u>Нитраллои</u> | $\geq 1200$   |

Азотирование является окончательной операцией термической обработки, после которой проводят лишь отпуск для снятия напряжений.

Поэтому предварительно следует обеспечить структуру и механические свойства сердцевины путем проведения улучшения. Температура отпуска не должна быть ниже температуры последующего азотирования, обычно ее выбирают в пределах 525- 580 °С.

Основной недостаток азотирования – большая длительность процесса.

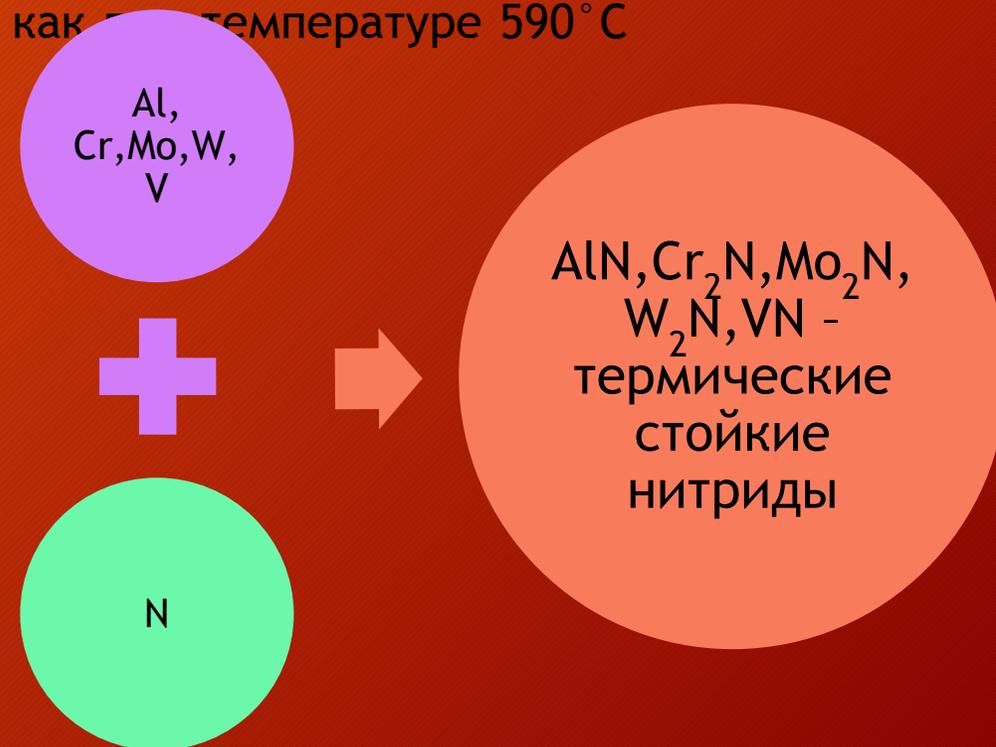
# Выбор марки стали для азотирования



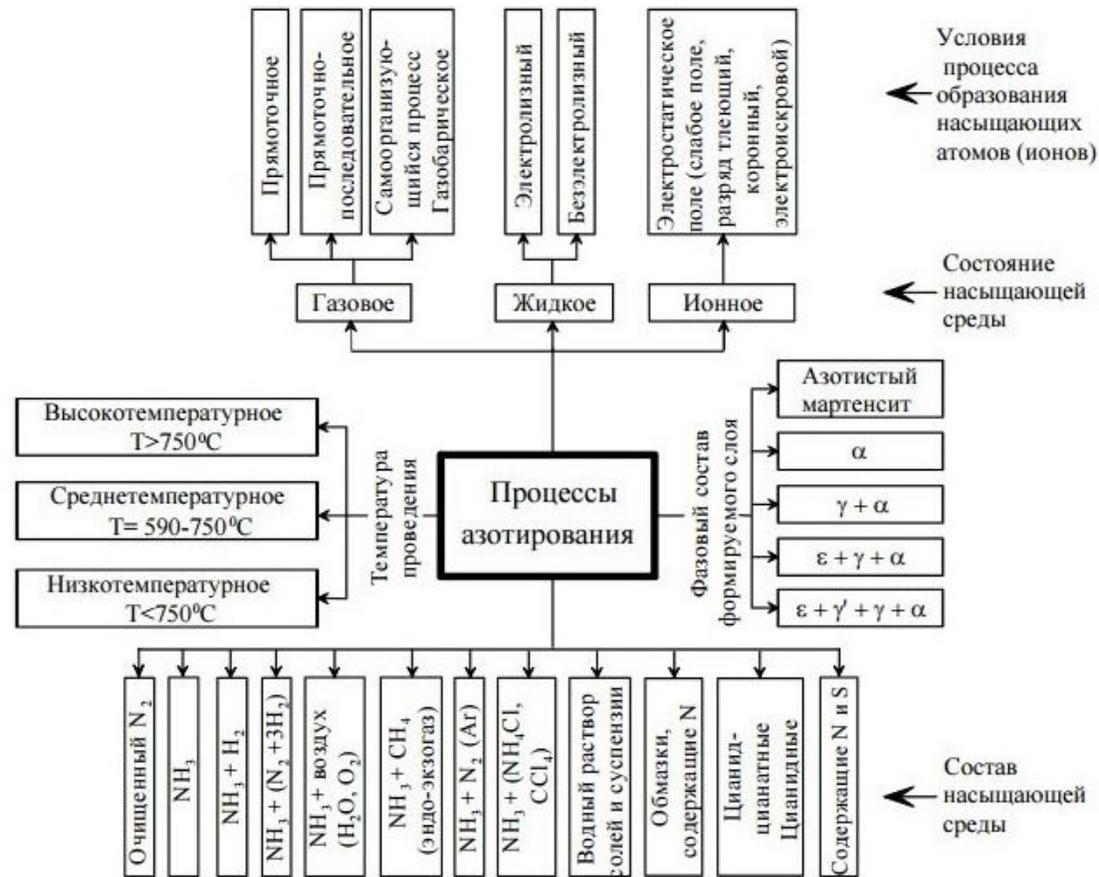
При азотировании стали в азотированном слое образуются те же фазы ( $\alpha$ ,  $\gamma'$  и  $\epsilon$ ), но они содержат, кроме азота, также и углерод, т. е. являются не азотистыми (нитридными) фазами, а углеродоазотистыми (карбонитридными) –  $Fe_2(N, C)$ ,  $Fe_4(N, C)$ . Кроме того, образуется азотистый цементит  $Fe_3(C, N)$ . После азотирования железа и углеродистых сталей твердость повышается незначительно (до HV 300), так как при температуре  $590^\circ C$  происходит коагуляция карбонитридов железа.

Для получения высокой твердости (до HV 1200) и износостойкости азотированного слоя применяют стали, легированные алюминием, хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием. Эти элементы образуют с азотом твердые, дисперсные, термически-стойкие, т. е. не склонные к коагуляции нитриды, являющиеся препятствиями при передвижении дислокаций, в результате чего и получается высокая твердость азотированного слоя.

Типичные представители азотируемой стали - **38ХМЮА;**  
**18Х2Н4ВА**



# Классификация процессов азотирования



Классификация процессов азотирования

# Диффузионная металлизация, её назначения, виды.

Свойства изделий после различных видов  
диффузионной металлизации.

# Диффузионная металлизация

Химико-термическую обработку, заключающуюся в насыщении поверхности стали отдельными элементами: металлами (Ал, Сг, W, V, Nb, Zn и др.), применяют с целью придания стали отдельных свойств, являющихся определяющими в эксплуатации. Наиболее часто эту обработку проводят для повышения жаростойкости (алитирование), износостойкости (хромирование), коррозионной стойкости в различных средах и т. п. (хромирование, цинкование и др.)

# Методы диффузионной металлизации

## Твердая

При диффузионной металлизации в твердых средах применяют порошкообразные смеси, состоящие обычно из ферросплавов с добавлением хлористого аммония.

## Жидкая

Жидкая диффузионная металлизация осуществляется погружением детали в расплавленный металл (например, цинк, алюминий).

## Газовая

Применяют летучие хлористые соединения металлов, образующиеся при взаимодействии хлора с металлами при высоких температурах. Хлориды диссоциируют на поверхности железа и выделяющийся в атомарном состоянии металл диффундирует в железо.

# Преимущества и недостатки процесса металлизации

- ❖ Поверхность диффузионно-металлизированной детали обладает высокой жаростойкостью, поэтому жаростойкие изделия изготавливают из простых углеродистых сталей с последующим алитированием, хромированием и силицированием.
- ❖ Исключительно высокой твёрдостью (до HV 2000) и высоким сопротивлением абразивному износу обладают борированные слои, вследствие образования на поверхности высокотвёрдых боридов железа -  $FeB$  и  $Fe_2B$ ; однако борированные слои очень хрупкие.
- ❖ Сульфидирование - поверхностное насыщение стали серой. Для режущего инструмента стойкость повышается в 2-3 раза.



- ❖ Диффузия хрома, алюминия и других металлов протекает значительно медленнее, чем углерода и азота, потому что углерод и азот образуют с железом растворы внедрения, а металлы - растворы замещения. При одинаковых температурных и временных условиях диффузионные слои при металлизации в десятки, а то и в сотни раз более тонкие, чем при цементации. Такая малая скорость диффузии препятствует широкому распространению процессов диффузионного насыщения в промышленности, так как процесс является дорогостоящим, и его проводят при высоких температурах (1000-1200 °C) длительное время

# Термомеханическая обработка стали

Назначение, виды, режимы проведения, влияние на свойства.

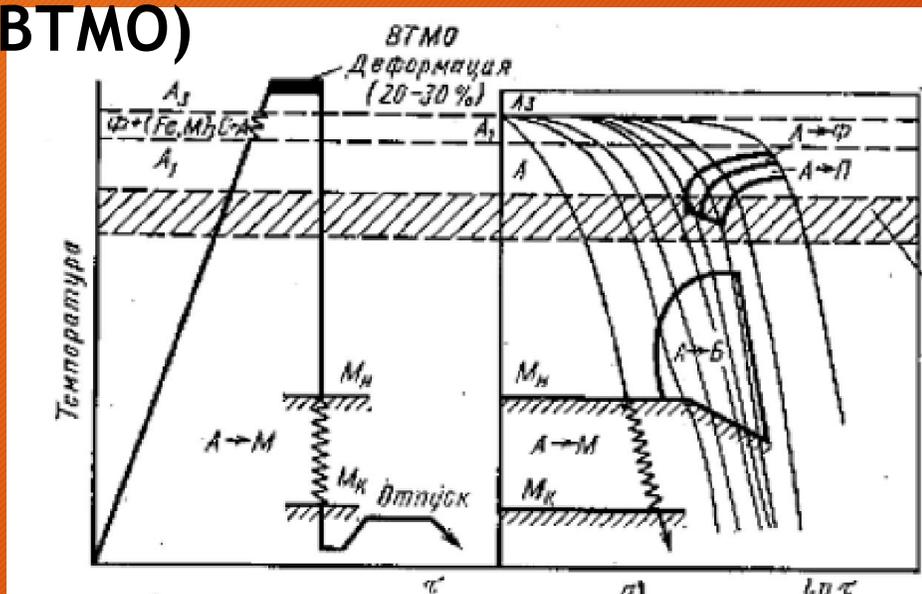
# Термомеханическая обработка стали

Термомеханическая обработка заключается в сочетании пластической деформации стали в аустенитном состоянии с ее закалкой.

**Принцип упрочнения:** Формирование структуры закаленной стали при ТМО происходит в условиях повышенной плотности дислокаций, обусловленных наклепом.

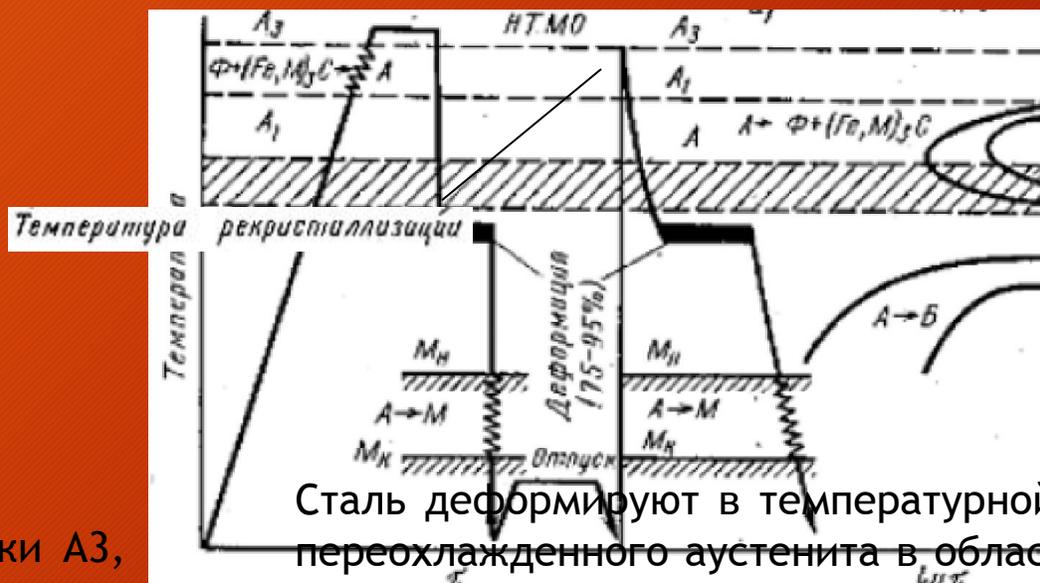
# Виды ТМО

## Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО)



Сталь деформируют при температуре выше точки  $A_3$ , при которой сталь имеет аустенитную структуру. Степень деформации составляет 20-30%. После деформации следует немедленная закалка во избежание развития процесса рекристаллизации.

## Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО)



Сталь деформируют в температурной зоне существования переохлажденного аустенита в области его относительной устойчивости ( $400-600^\circ C$ ); температура деформации выше точки  $M_n$ , но ниже температуры рекристаллизации. Степень деформации обычно составляет 75-95%. Закалку осуществляют сразу после деформации.

# Упрочнение стали методом пластической деформации (наклепом).

Назначение и виды упрочнения.

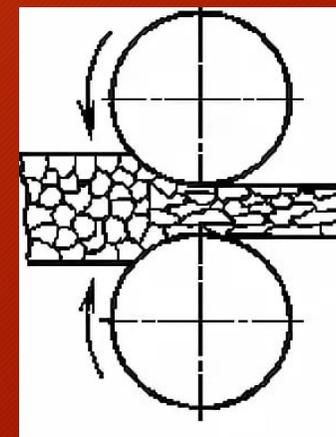
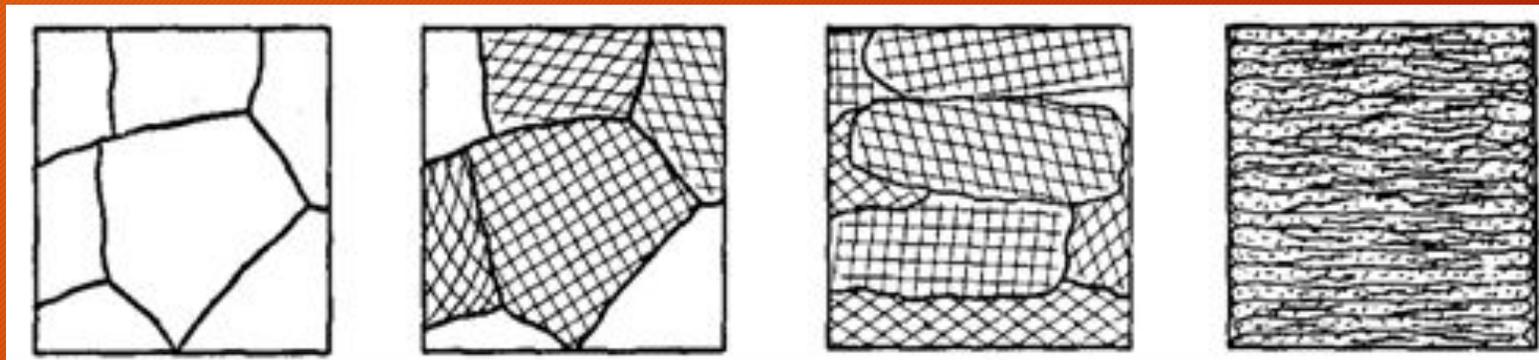
# Смысл в деформационном упрочнении стали

Поверхностное пластическое деформирование используют для повышения сопротивления усталости и твердости поверхностного слоя металла, а также для формирования в этом слое направленных внутренних напряжений (преимущественно напряжений сжатия) и образования регламентированного рельефа микронеровностей на поверхности. Эффективно применение упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием на финишных операциях технологического процесса изготовления деталей машин взамен операций окончательной обработки резанием лезвийным или абразивным инструментом.

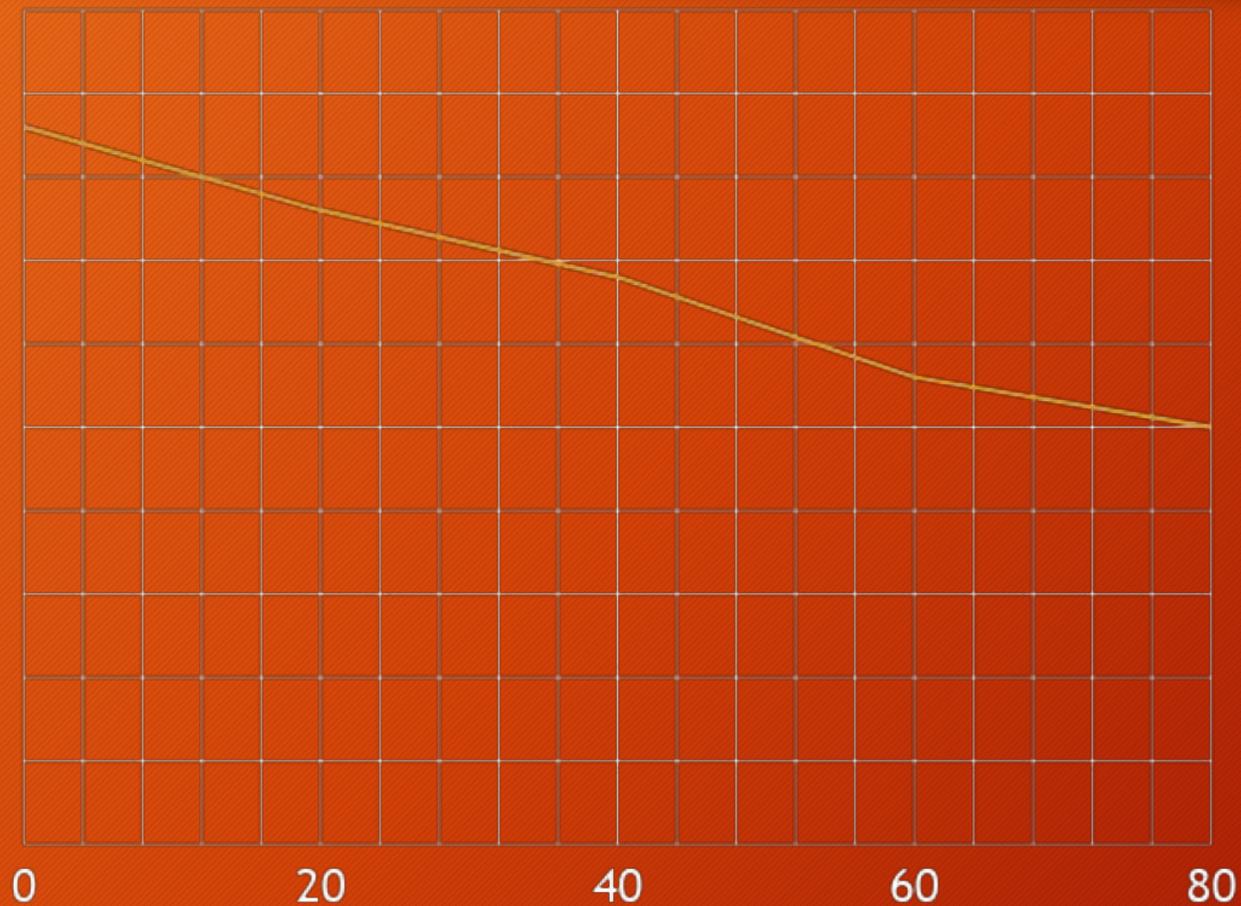
Пластическое деформирование, выполняемое без использования внешней теплоты для обеспечения нужного комплекса свойств поверхностного слоя, называют **наклепом**, а слой металла, в котором проявляются эти свойства, соответственно - **наклепанным**

# Механизм наклепа

Упрочнение незакаленной стали происходит в результате изменения структурных несовершенств (плотности, качества и взаимодействия дислокаций, количества вакансий и др.), дроблением блоков и созданием микронапряжений. При упрочнении закаленных сталей, помимо этого, происходит частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит и выделение дисперсных карбидных частиц. Поверхностная деформация приводит к образованию сдвигов и упругому искажению кристаллической решетки, изменению формы и размеров зерен.



# Зависимость свойств стали от степени деформации



Axis Title  
100  
90  
80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0

# Методы наклепа

## 1. Дробеструйный наклеп

- Бомбардирование стали суспензией с абразивными частицами
- Обработка стальной или чугунной дробью

## 2. Обкатка роликами или шариками

- Осуществляют с помощью различных приспособлений, устанавливаемых на токарных или строгальных станках
- Давление роликов или шариков создают механическим (пружинным) или гидравлическим способом.

## 3. Наклеп непосредственно при операциях ХПД

- Осуществляется путем обжатия металла между валками при ХПД

# Приложение

## Диаграмма железо-цементит

