



# **ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

## **«ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ»**

Блок 6 модуль 17

**Автор: доц. Глушкова Д.Б.  
Lect8\_1M\_TKMIM\_GDB\_24.03.15**

# ПЛАН

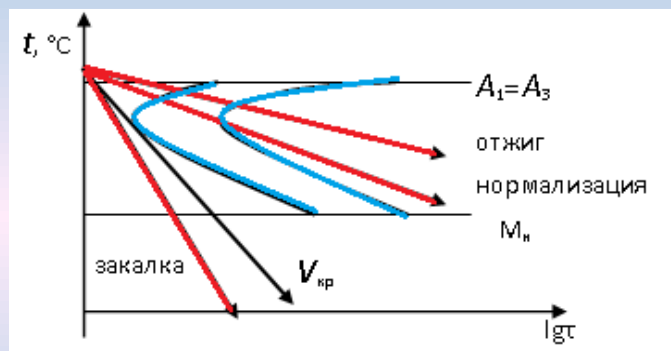
1. Виды отжига. Нормализация
2. Закалка стали. Специальные виды закалки
3. Отпуск
4. Закаливаемость
5. Прокаливаемость
6. Дефекты при термической обработке

# Основные виды термической обработки стали

Основными видами термической обработки стали являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

## Отжиг

заключается в нагреве до температур выше  $A_{с3}$  (или  $A_{с1}$  – неполный отжиг, ниже  $A_{с1}$  – низкий отжиг) и медленном охлаждении с печью.



Виды термической обработки стали

## Нормализация и закалка

закключаются в нагреве до температур выше критических  $A_{с1}$  или  $A_{с3}$  ( $A_{сm}$ ), выдержке при этих температурах и охлаждении с разной скоростью. Нормализация – охлаждение на воздухе, закалка – со скоростью больше или равной критической

**Отпуск** заключается в нагреве до температуры ниже критической  $A_{с1}$ , выдержке и, как правило, охлаждении на воздухе.

Отжиг и нормализация – это обычно предварительная термическая обработка заготовок и деталей с целью устранения дефектов предыдущей горячей обработки и подготовки для последующих технологических операций.

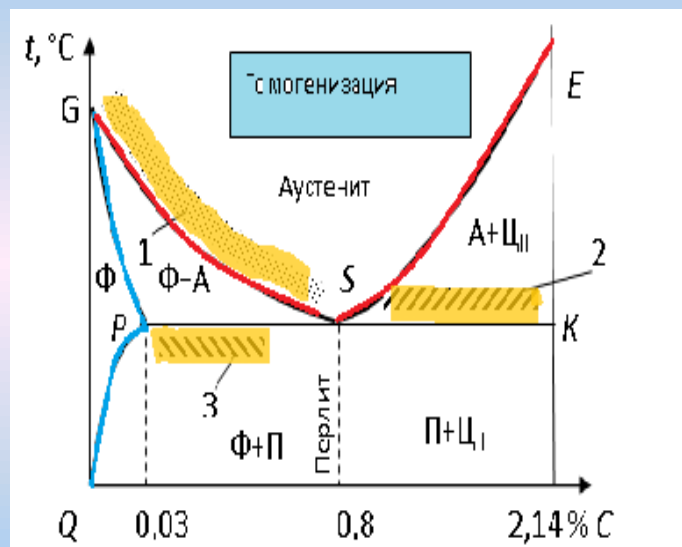


# Отжиг и нормализация

Отжиг – разупрочняющая термическая обработка, в результате которой повышается пластичность и снижаются остаточные напряжения. В зависимости от цели применяют различные виды отжига

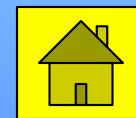
## Гомогенизацию (диффузионный отжиг)

применяют для стальных слитков с целью уменьшения или устранения неоднородности химического состава. Поскольку выравнивание химического состава происходит за счёт диффузии элементов, входящих в состав сплава, то изделие нагревают до высокой температуры (1000–1100 °С) и длительно выдерживают в этих условиях.



Интервалы рекомендуемых температур нагрева стали при отжиге: 1 – полный отжиг; 2 – неполный отжиг; 3 – рекристаллизационный отжиг

Рекристаллизационный отжиг используют для снятия наклепа холоднодеформированной стали. Температура рекристаллизационного отжига стали находится в пределах 650–700°С.



# Отжиг и нормализация

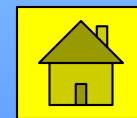
## Низкий отжиг.

**Температура отжига** находится в пределах 180–600 °С. подвергаются отливки, сварные соединения, детали после обработки резанием, давлением для снятия остаточных напряжений.



**Полный отжиг обеспечивает равновесное структурное состояние – полностью снимаются внутренние напряжения и исправляется структура.**

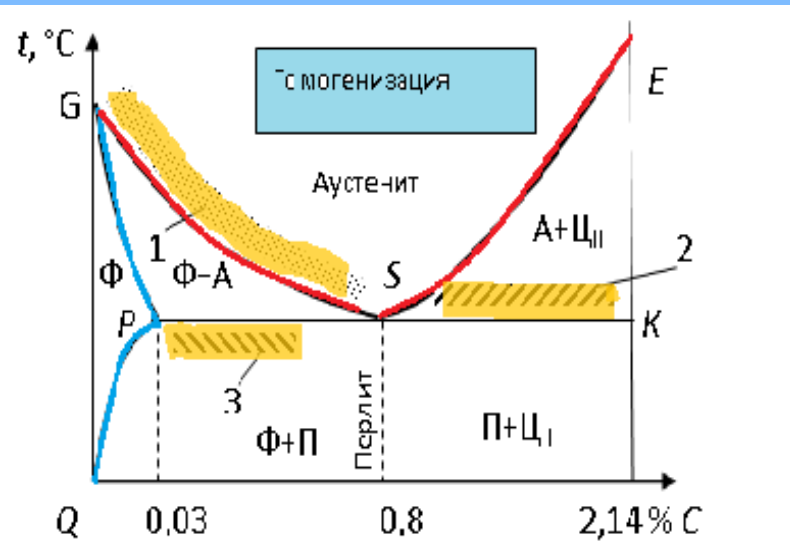
**Полный отжиг** проводится с целью полной фазовой перекристаллизации для измельчения зерна и заключается он в нагреве на 50–60 °С выше критической точки Ас3. Он проводится главным образом для доэвтектоидной стали.



# Отжиг и нормализация

## Неполный и изотермический отжиг

При **неполном отжиге** нагрев осуществляют до температур на 50–60 °С выше  $A_{c1}$ , что приводит к частичной перекристаллизации. Поэтому он применяется в случае, когда предварительная горячая обработка не способствовала образованию крупного зерна.

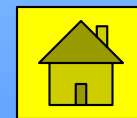


Интервалы рекомендуемых температур нагрева стали при отжиге: 1 – полный отжиг; 2 – неполный отжиг; 3 – рекристаллизационный отжиг



**Изотермический отжиг** заключается в том, что изделие нагревают выше точки  $A_{c3}$  (или  $A_{c1}$ ) и затем переносят в печь, температура которой на 50–150 °С ниже  $A_{c1}$  и выдерживают до полного распада аустенита. Изотермический отжиг позволяет значительно сократить длительность процесса и обеспечить получение более однородной структуры по сечению детали.

Используется такой отжиг для улучшения обрабатываемости.





# Отжиг и нормализация

## Циклический отжиг. Нормализация

**Циклический отжиг** предусматривает несколько циклов нагрева и охлаждения возле критической точки  $A_1$ . Циклический отжиг применяют для получения карбидов сферической формы, что необходимо для инструментальных сталей. Кроме того, такой отжиг используют и для доэвтектоидных сталей с целью улучшения штампуемости.

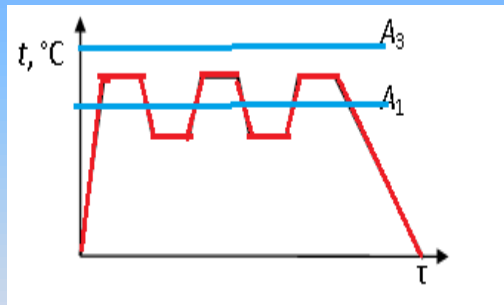


Схема циклического отжига стали для получения зернистого перлита



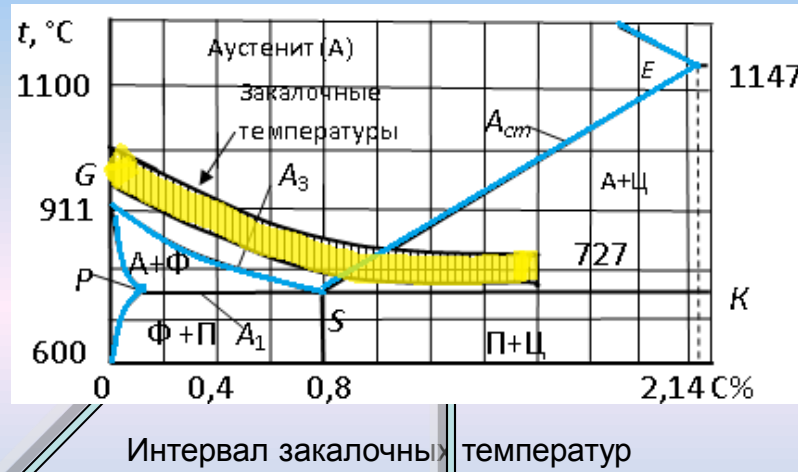
**Нормализация** заключается в нагреве на  $50\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}$  выше  $A_{c3}$ , выдержке и охлаждении на воздухе. Нормализация приводит к полной фазовой перекристаллизации. Это более экономичная операция, чем полный отжиг.



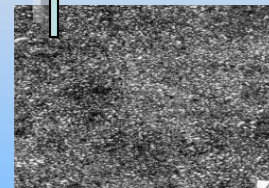
# Закалка

Закалка – это упрочняющая термическая обработка, которая проводится для повышения твёрдости и прочности. Температура нагрева при закалке определяется положением критических точек  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ . Скорость охлаждения должна быть равной или больше критической.

Доэвтектоидные стали нагревают под закалку до температуры на 50–60 °С выше  $A_{c3}$ . В этом случае сталь приобретает аустенитную структуру.



Интервал закалочных температур (заштрихованный)



При охлаждении аустенит превращается в мартенсит. Заэвтектоидные стали под закалку нагревают до температуры на 50–60 °С выше  $A_{c1}$ . В этом случае при нагреве формируется структура аустенита и цементита вторичного.

После охлаждения с критической скоростью структура состоит из мартенсита и цементита, обладающих высокой твёрдостью.

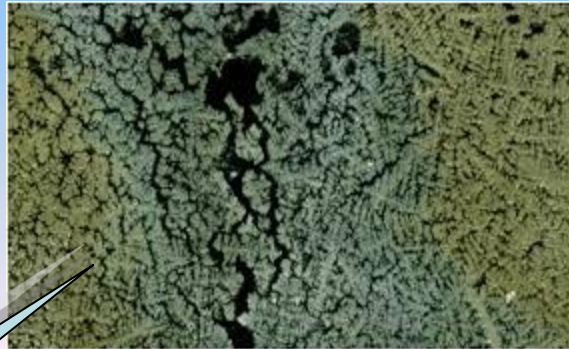




# Закалка

Наиболее распространёнными охлаждающими средами являются вода и масло. **Вода** охлаждает очень быстро, а **масло** – медленно.

При выборе охлаждающей среды для закалки необходимо учитывать тот факт, что возникают внутренние напряжения, которые могут привести к образованию трещин. Внутренние напряжения бывают термические и структурные



Термические напряжения связаны с перепадом температур по сечению при охлаждении. Структурные напряжения обусловлены следующими причинами: **1) природой мартенсита** (пересыщенный твёрдый раствор углерода в Fe $\alpha$ ), что приводит к искажению решётки; **2) разным удельным объёмом мартенсита и аустенита**

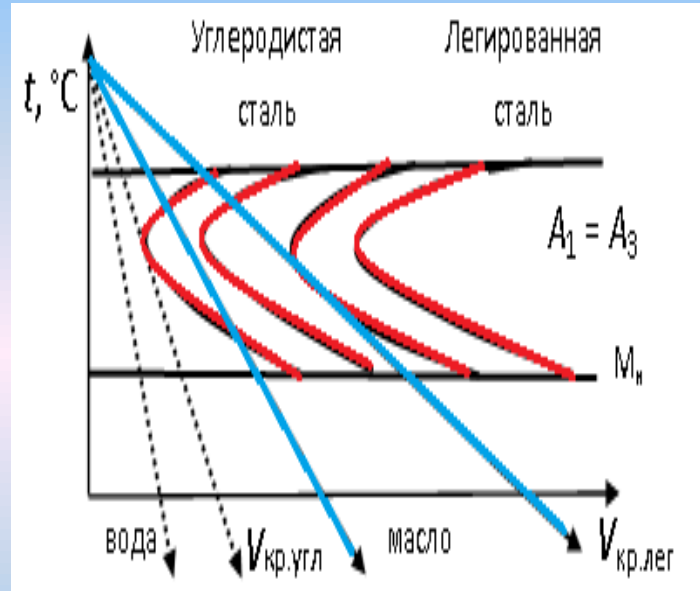
**удельный объём мартенсита больше, чем аустенита**



# Закалка

## Критические скорости углеродистых и легированных сталей

Для легированной стали критическая скорость охлаждения значительно меньше, чем для углеродистой, то легированную сталь для получения мартенсита можно охлаждать в масле, что снижает внутренние напряжения.



Скорости охлаждения в воде и масле, нанесённые на диаграмму изотермического распада аустенита

Углеродистые же стали, которые имеют большую критическую скорость охлаждения, необходимо охлаждать быстро, например, в воде. При этом могут возникнуть большие внутренние напряжения, приводящие к короблению изделия и появлению трещин.

Закалка

на C-образные диаграммы углеродистой и легированной стали нанесены скорости охлаждения в воде и масле.

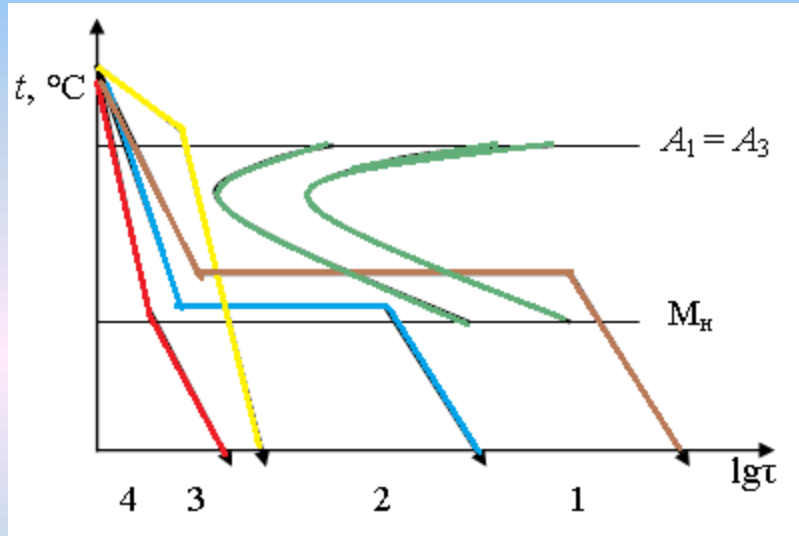
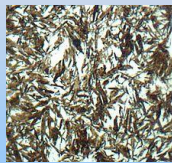
..mp4



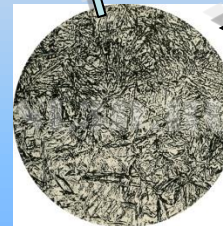
# Закалка

В практике термической обработки применяются специальные виды закалки, уменьшающие внутренние напряжения: с подстуживанием 3, прерывистая (в двух средах) 4, ступенчатая 2, изотермическая 1

При первых трёх видах закалки получают структуру мартенсита, но добиваются существенного уменьшения термических напряжений и некоторого уменьшения структурных.



Специальные виды закалки



После изотермической закалки получают структуру бейнита, при формировании которой внутренние напряжения значительно меньше, чем при мартенситном превращении, поскольку феррит, входящий в состав бейнита, меньше пересыщен углеродом, чем мартенсит.



# Отпуск

Сталь в результате закалки получает высокую твёрдость, но при этом возникшие внутренние напряжения приводят к увеличению хрупкости.

Поэтому после закалки обязательно необходимо провести такую термическую обработку как отпуск, который заключается в нагреве до температуры ниже критической точки  $A_{c1}$ , выдержке при этой температуре и последующем охлаждении, в основном, на воздухе.



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

Отпуск является окончательным видом термической обработки и проводится с целью:

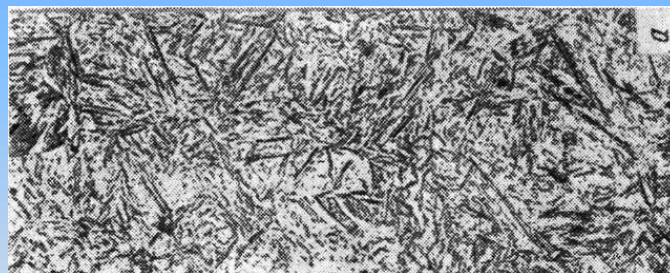
- частично или полностью снять внутренние напряжения, возникшие при закалке;
- получить необходимый комплекс механических свойств.



# Отпуск

Низкий отпуск проводится в интервале температур 150–220 °С.

Мартенсит закалки превращается в мартенсит отпуска, для которого характерна меньшая степень тетрагональности решетки мартенсита за счет перемещения атомов (ионов) углерода к вакансиям и дислокациям.



Мартенсит отпуска



Это приводит к уменьшению внутренних напряжений на 1/3. Твердость и прочность после низкого отпуска практически не меняются. Низкий отпуск применяют в тех случаях, когда необходима высокая твердость и износостойкость изделия.

Такой отпуск используют для инструмента, а также для деталей, которые работают в условиях трения и износа после поверхностной закалки и после цементации или нитроцементации.



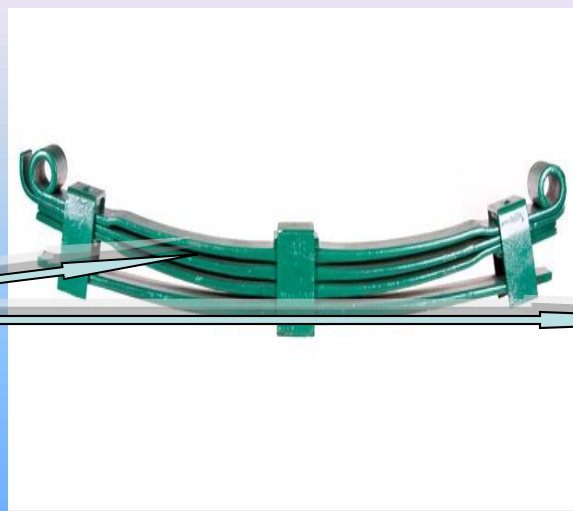
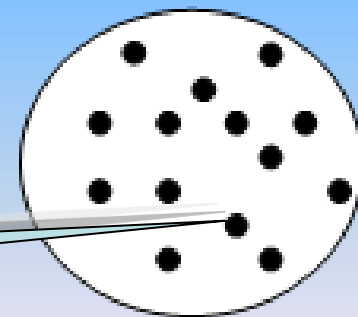
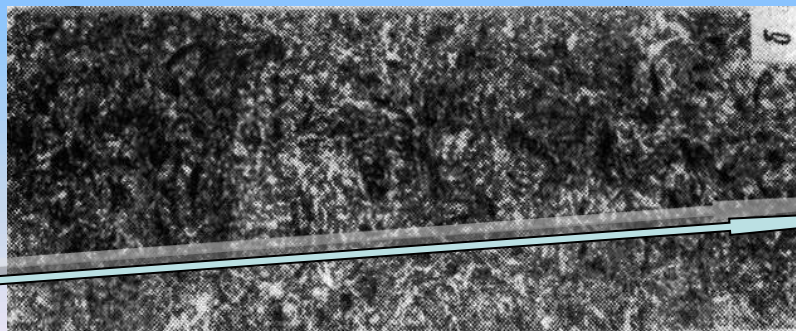


# Отпуск

Средний отпуск выполняют в интервале температур 350–500 °С.

Мартенсит распадается на феррито-цементитную смесь, называемую троститом отпуска, в котором цементитные включения имеют зернистую форму. На 2/3 уменьшаются внутренние напряжения.

Существенно повышается предел текучести. Поэтому применяют средний отпуск, главным образом, для рессор и пружин.

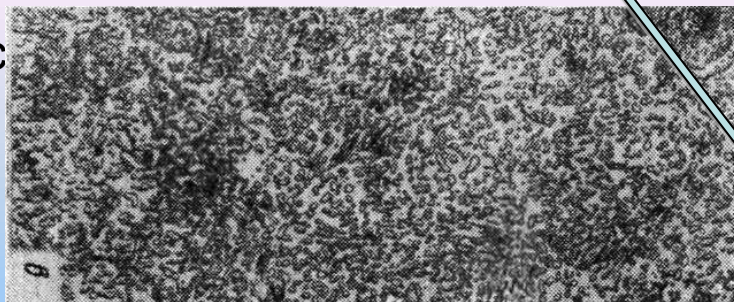
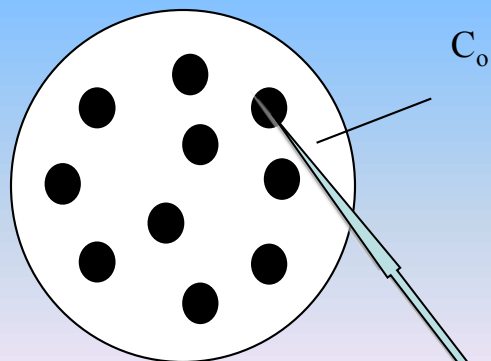




# Отпуск

Высокий отпуск проводят в интервале температур 500–680 °С.

При этой температуре происходит два процесса: распад мартенсита на феррито-цементитную смесь и процесс укрупнения карбидных (цементитных) частиц сферической формы. Этот процесс называется **коалесценцией**. В результате получают структуру зернистого строения, которая называется сорбит отпуска



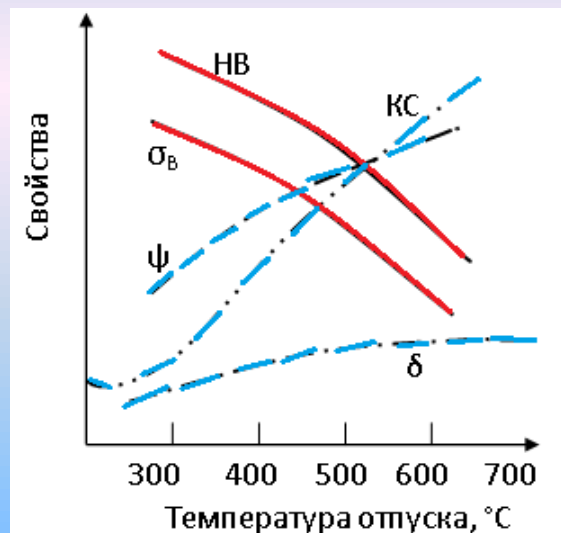
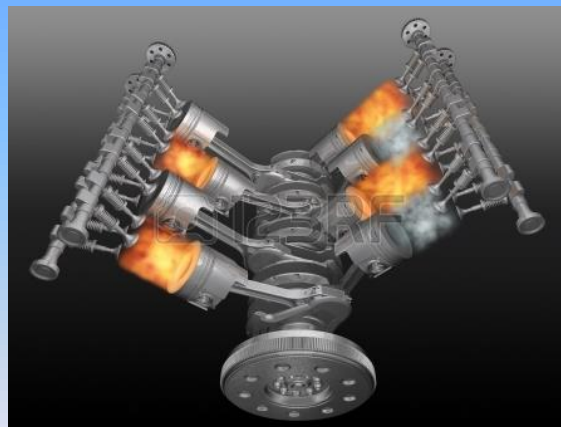
Полностью снимаются внутренние напряжения. Резко повышаются пластичность и ударная вязкость, сохраняется на достаточно высоком уровне условный предел текучести. При высоком отпуске получают более крупные карбиды зернистой формы, чем при среднем отпуске

**Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется улучшением.**



## УЛУЧШЕНИЕ

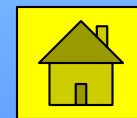
Улучшение по сравнению с нормализацией или отжигом одно-временно повышает все прочностные характеристики, пластичность и особенно ударную вязкость. Это обусловлено тем, что в результате распада аустенита при нормализации или отжиге формируется фер-рито-цементитная смесь пластинчатого строения – сорбит закалки (тростит закалки).



зависимость механических свойств закаленной стали 40 от температуры отпуска

С увеличением температуры отпуска твёрдость и прочность снижаются, а пластичность и ударная вязкость возрастают.

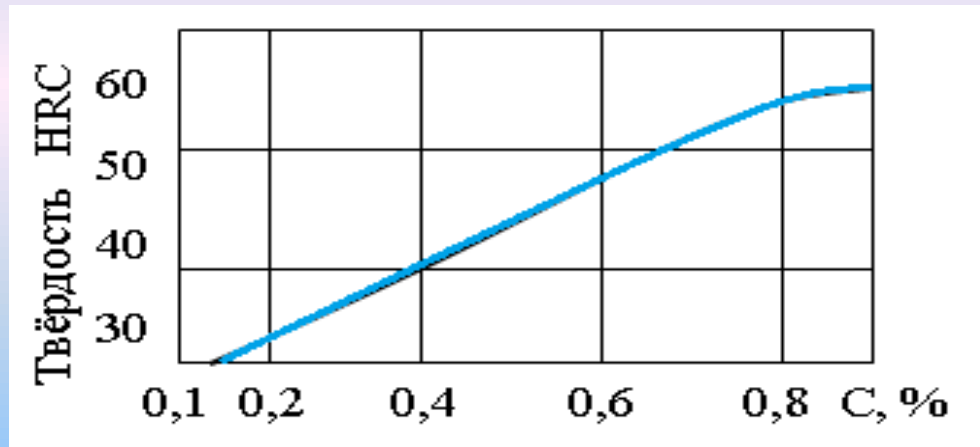
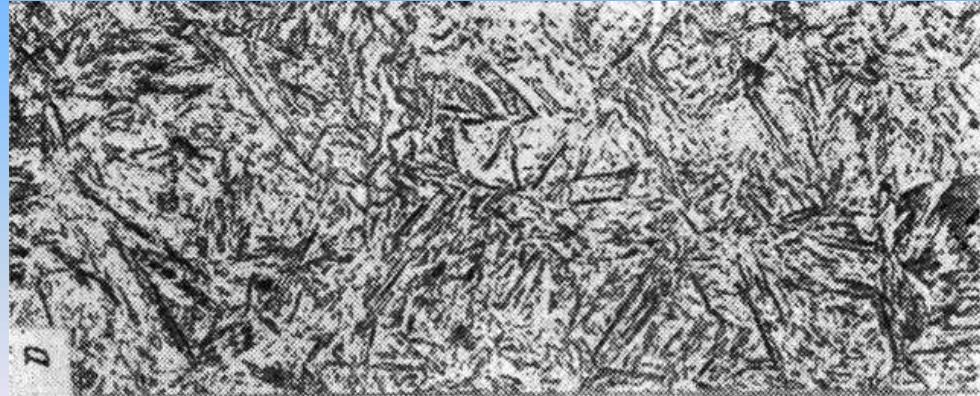
Улучшению подвергают среднеуглеродистые конструкционные стали, к которым предъявляются высокие требования по пределу выносливости и ударной вязкости. Примерами деталей, которые подвергаются улучшению, являются шатуны, коленвалы, клапаны и др. в результате распада мартенсита при отпуске – зернистого строения – сорбит отпуска (тростит отпуска) где значительно меньше концентраторов напряжений.



## ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ

**Закаливаемость** – это способность стали повышать твердость при закалке.

После закалки структура – мартенсит. Твердость мартенсита зависит от содержания углерода. Чем больше мартенсит пересыщен углеродом, тем выше его твердость. представлена зависимость твердости полумартенситной зоны (50 % мартенсита + + 50 % тростита) от содержания углерода. Таким образом закаливаемость зависит от содержания углерода.



Твердость полумартенситной зоны в зависимости от содержания углерода

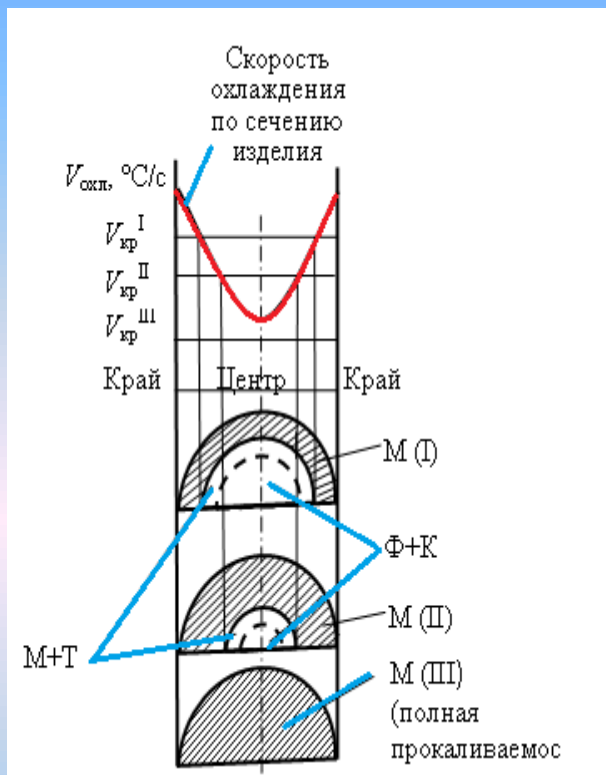
**Легирующие элементы на закаливаемость практически не влияют.**



# ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ

Под **прокаливаемостью** понимают способность стали закаливаться на определенную глубину.

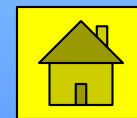
В процессе заковки максимальная скорость охлаждения достигается на поверхности детали. По мере удаления от поверхности скорость охлаждения уменьшается. Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения  $V_{кр}$ , зависящей от состава стали



Зависимость прокаливаемости стали от критической скорости охлаждения  $V_{кр}$ :  
 $V_{крI} > V_{крII} > V_{крIII}$ ; Ф + К – пластинчатая феррито-карбидная структура (тростит, сорбит или перлит); М – мартенсит; Т – тростит

Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия равна или больше критической скорости  $V_{кр}$  то изделие получит мартенситную структуру по всему сечению и, следовательно, будет иметь место полная (сквозная) прокаливаемость.

Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия меньше критической скорости, то деталь прокалится только на определённую глубину и прокаливаемость будет несквозной

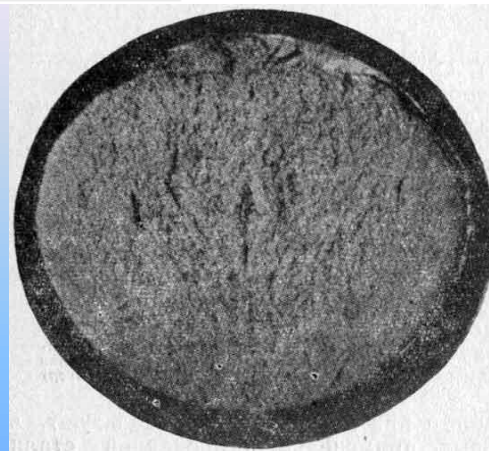
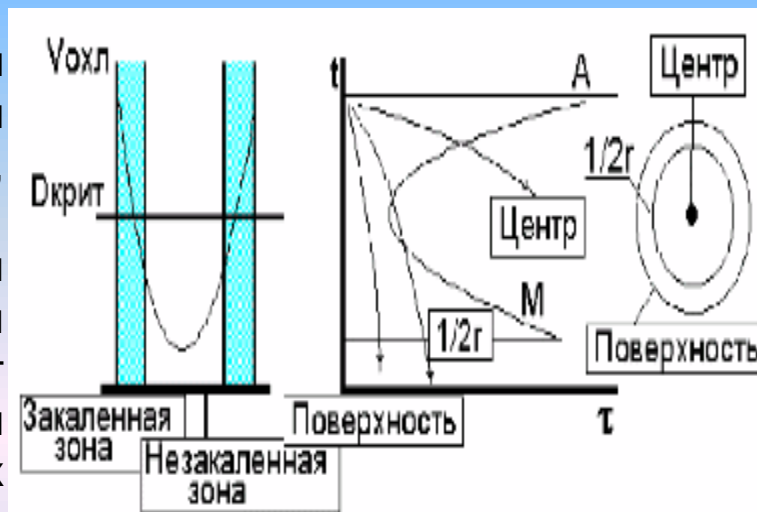




# ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ

Для количественной оценки прокаливаемости используют *критический диаметр*  $D_{кр}$ , который является максимальным диаметром цилиндрического образца, прокаливающегося насквозь в данном охладителе.

Он является максимальным диаметром цилиндрического образца, прокаливающегося насквозь в данном охладителе. Критический диаметр зависит от химсостава стали (наличия легирующих элементов) и от охлаждающей среды. Чем интенсивнее охлаждает закалочная среда, тем больше величина  $D_{кр}$  ( $D_{кр.вода} > D_{кр.масла}$ ).



Прокаливаемость определяет выбор стали для деталей. Чем больше сечение детали, тем более легированную сталь следует выбирать. Сложные по конфигурации детали, особенно если они подвергаются ударным нагрузкам, рекомендуется изготавливать из сталей, содержащих никель. Для крупных деталей, которые нельзя быстро охлаждать при отпуске, следует использовать стали, содержащие 0,15–0,30 % Mo.

**Критический диаметр – важная характеристика при выборе марки стали для изготавливаемых изделий**



# ДЕФЕКТЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

К основным дефектам при термической обработке относятся:

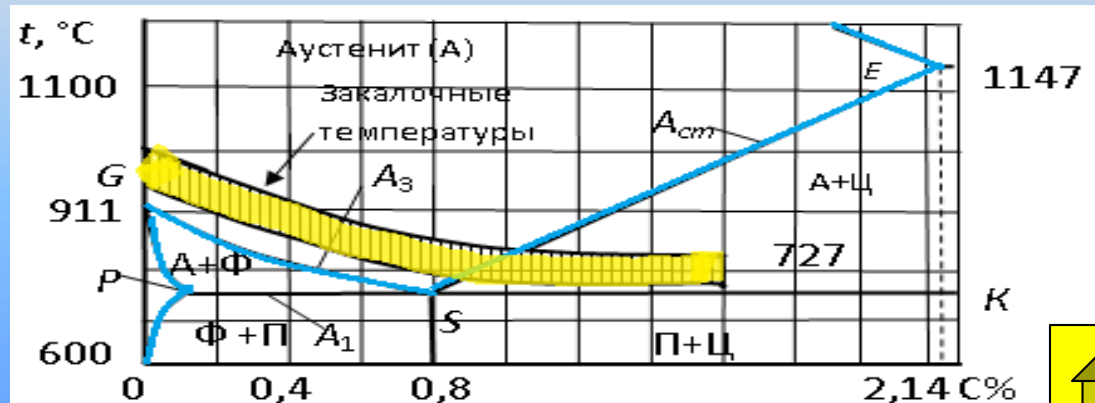
- недостаточная твердость;
- завышенная твердость;
- коробление и образование трещин;
- окисление и обезуглероживание.

*Недостаточная твердость* может быть вызвана следующими причинами:

- скорость охлаждения при закалке была меньше критической скорости охлаждения (углеродистую сталь охладили в масле, а не в воде);
  - температура нагрева под закалку ниже необходимой температуры (доэвтектоидную сталь необходимо греть выше температуры  $A_{c3}$ , а нагрели выше  $A_{c1}$ );
  - завышенная температура отпуска.
- Этот вид брака можно исправить, проводя повторную термообработку в соответствии с правильным режимом.



*Завышенная твердость*, как правило, связана с тем, что температура отпуска была ниже требуемой. Повторным отпуском можно исправить этот вид брака.

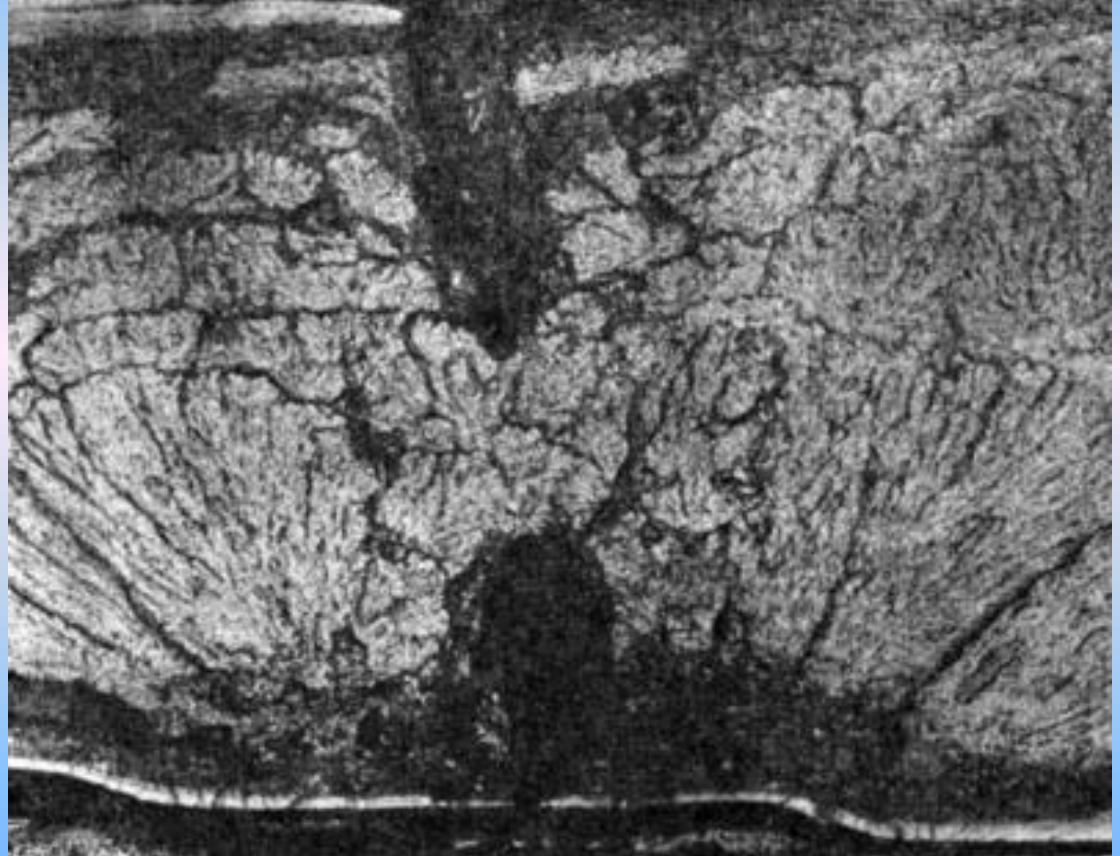




## ДЕФЕКТЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*Коробление и образование трещин.* Коробление представляет собой несимметричную деформацию деталей, которая появляется при неравномерном нагреве в процессе закалки, при неправильном расположении детали в охлаждающей среде.

Трещины представляют собой неисправимый вид брака. Склонность к образованию трещин возрастает с увеличением в стали количества углерода, с повышением температуры закалки и увеличением скорости охлаждения в температурном интервале мартенситного превращения.



Причиной этих видов брака являются термические структурные напряжения



## ДЕФЕКТЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Для избежания коробления и образования трещин необходимо: применять специальные виды закалки; после механической обработки перед закалкой проводить отжиг для снятия напряжений; длинные изделия нагревать и охлаждать в вертикальном положении и другие способы.



Чтобы избежать окисления и обезуглероживания, следует проводить нагрев в защитной газовой среде, вакууме, расплавах металлов, соляных ваннах.



# На самостоятельную работу выносятся :

- 1.Высокотемпературная термомеханическая обработка.
- 2.Низкотемпературная термомеханическая обработка.  
Преимущества и недостатки.



# Литература

Гладкий И.П. Технология конструкционных материалов и материаловедение /И.П. Гладкий,В.И.Мощенок,В.П.Тарабанова - Х.:ХНАДУ,2014.-576с.

Лахтин Ю.М. Материаловедение: учебн. для машиностроительных вузов/Ю.М.Лахтин,В.П.Леонтьева.-М.:Машиностроение,1990.-528с.

<http://dl.khadi.kharkiv.edu/course/view>.    Логин: glushkova639





# Кафедра технології металів і матеріалознавства

E-mail [diana.borisovna@gmail.com](mailto:diana.borisovna@gmail.com)

**Автор: доц. Глушкова Д.Б.**

Lect8\_1M\_TKMIM\_GDB\_24.03.15

