Направление подготовки бакалавров
«Химическая технология»

# Материаловедение и технология конструкционных материалов

Лихачев Владислав Александрович, к.х.н.,
доцент

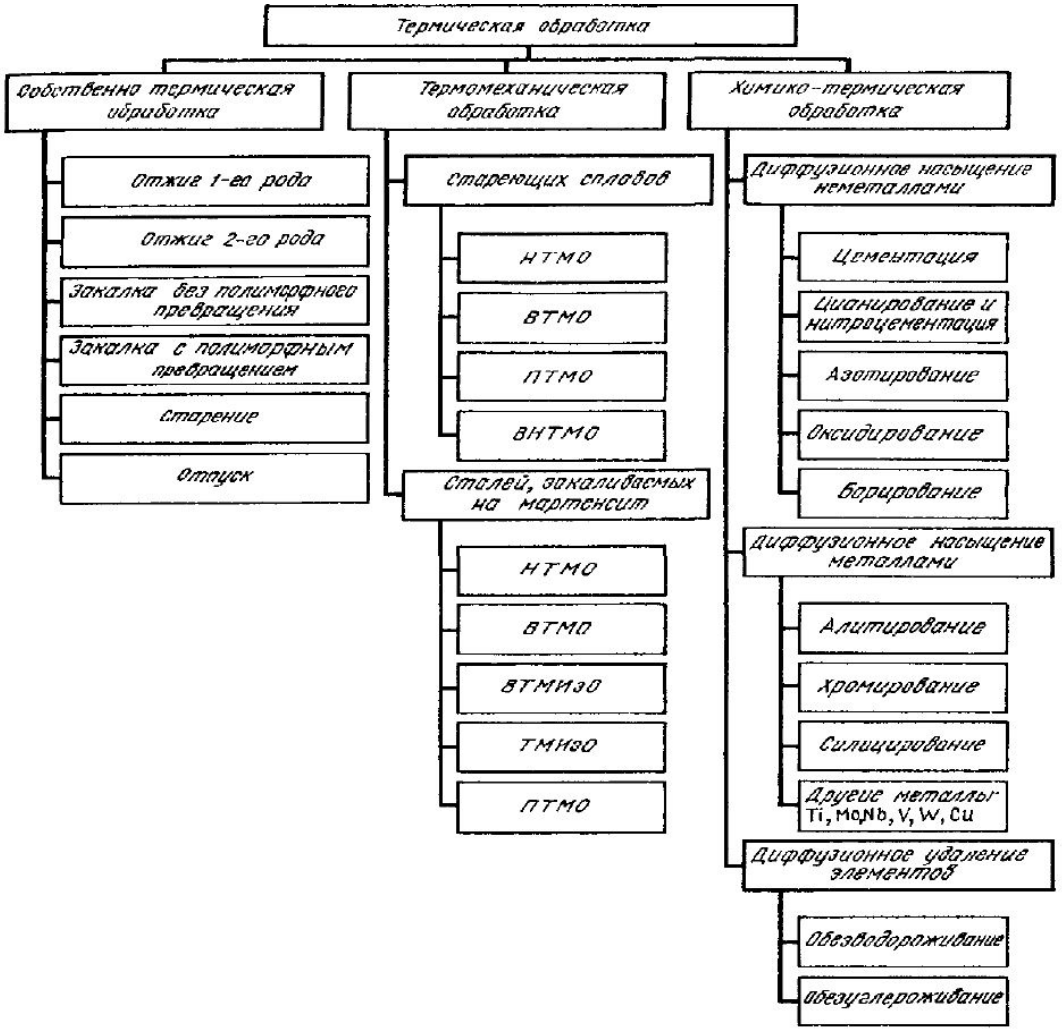



**Рис. 10.2. Схема классификации основных видов термической обработки сталей и сплавов**

# Тема 13. Термическая обработка сталей.

**1.1. Понятие термообработки.**

**1.2. Отжиг.**

**1.3. Нормализация.**

**1.3. Закалка.**

**1.3. Отпуск.**

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

## Определение термической обработки

***Термическая обработка***

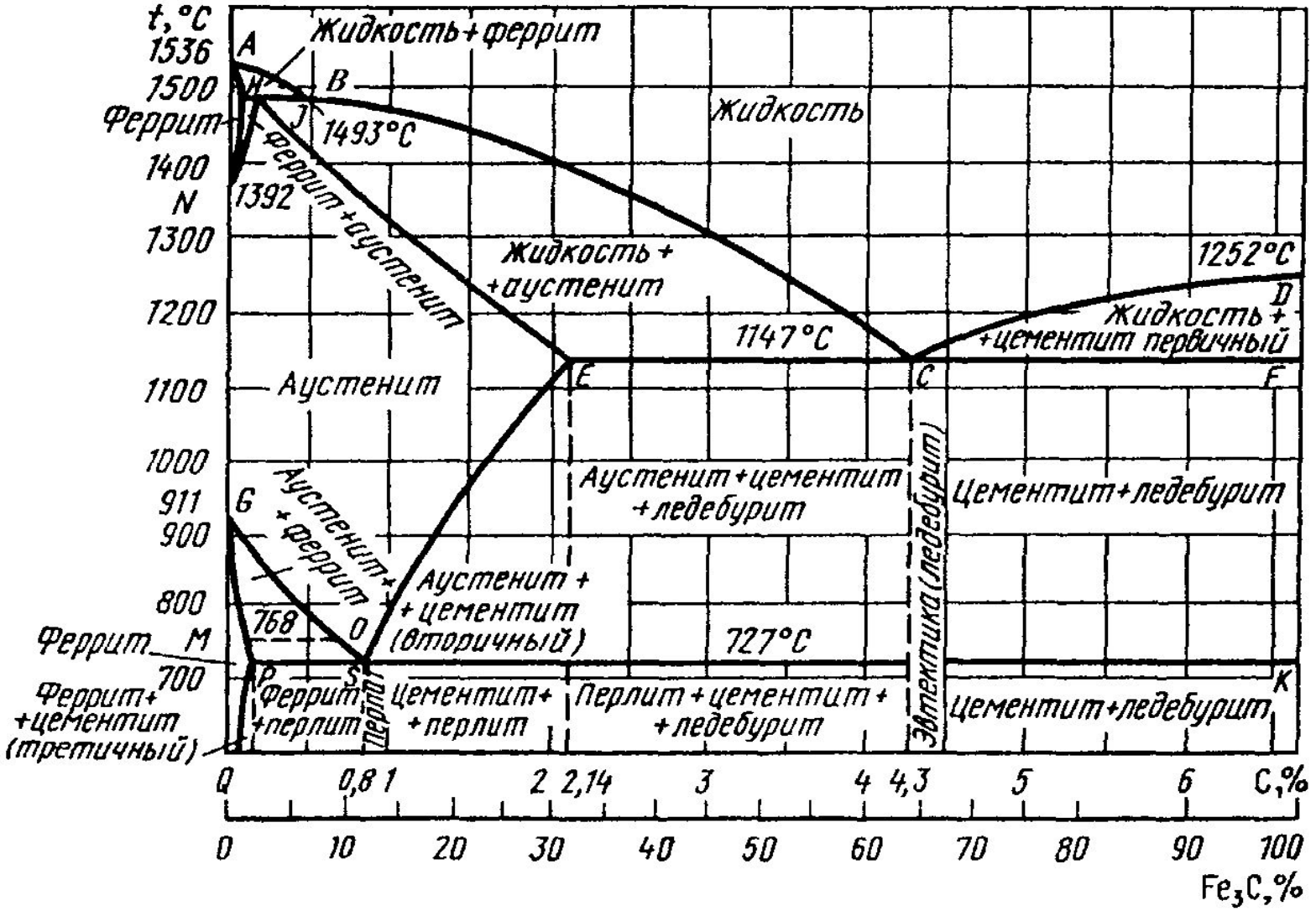
– технологический процесс, состоящий из совокупности операций нагрева, выдержки и охлаждения изделий из металлов и сплавов, с целью изменения их структуры, механических и технологических свойств в заданном направлении.

# Параметры термической обработки

Существует 3 основных параметра термообработки:

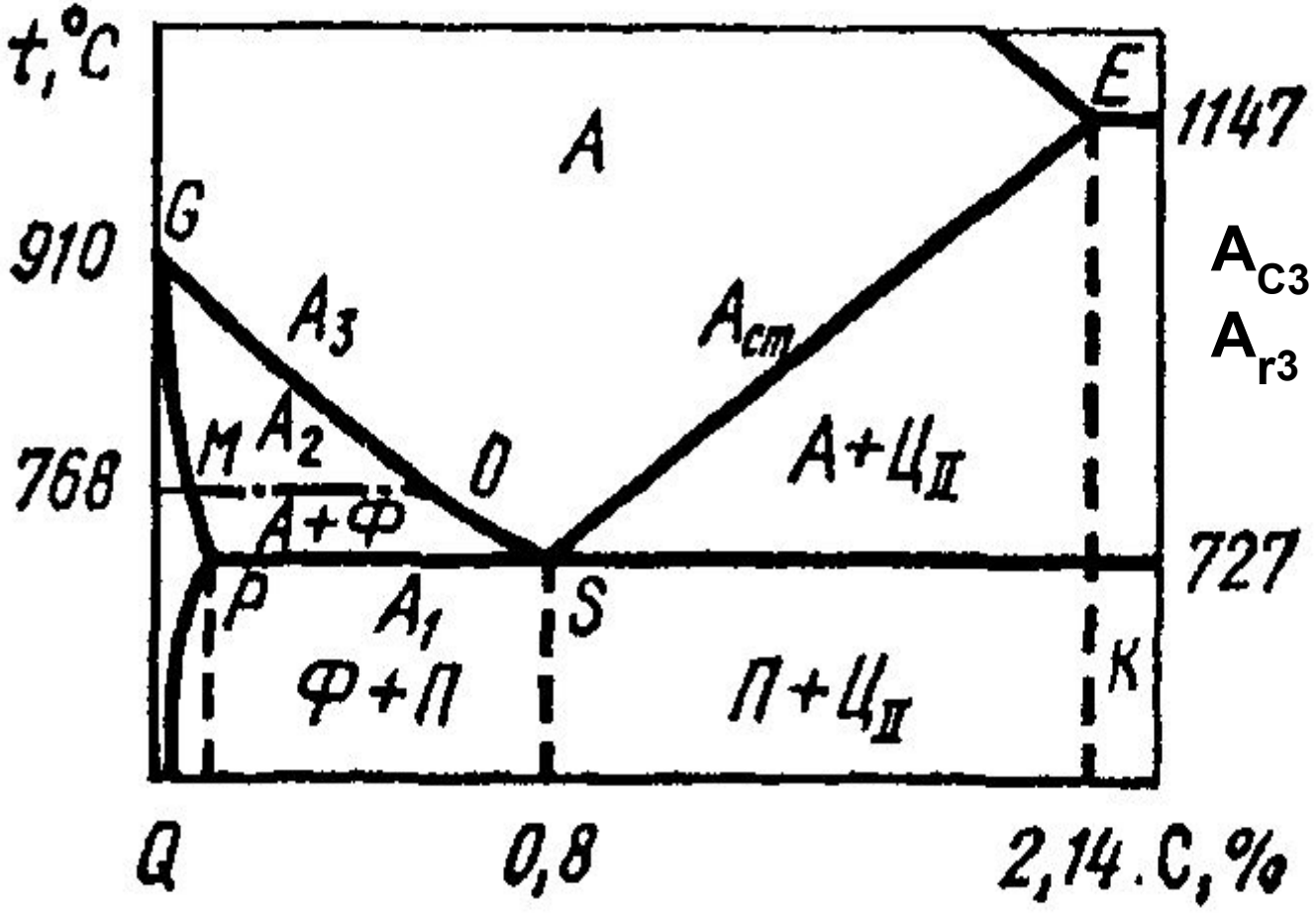
- **температура нагрева;**
- **продолжительность нагрева;**
- **скорость и ступечатость охлаждения.**

# Диаграмма железо-углерод



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

# Обозначение линий на диаграмме Fe - C

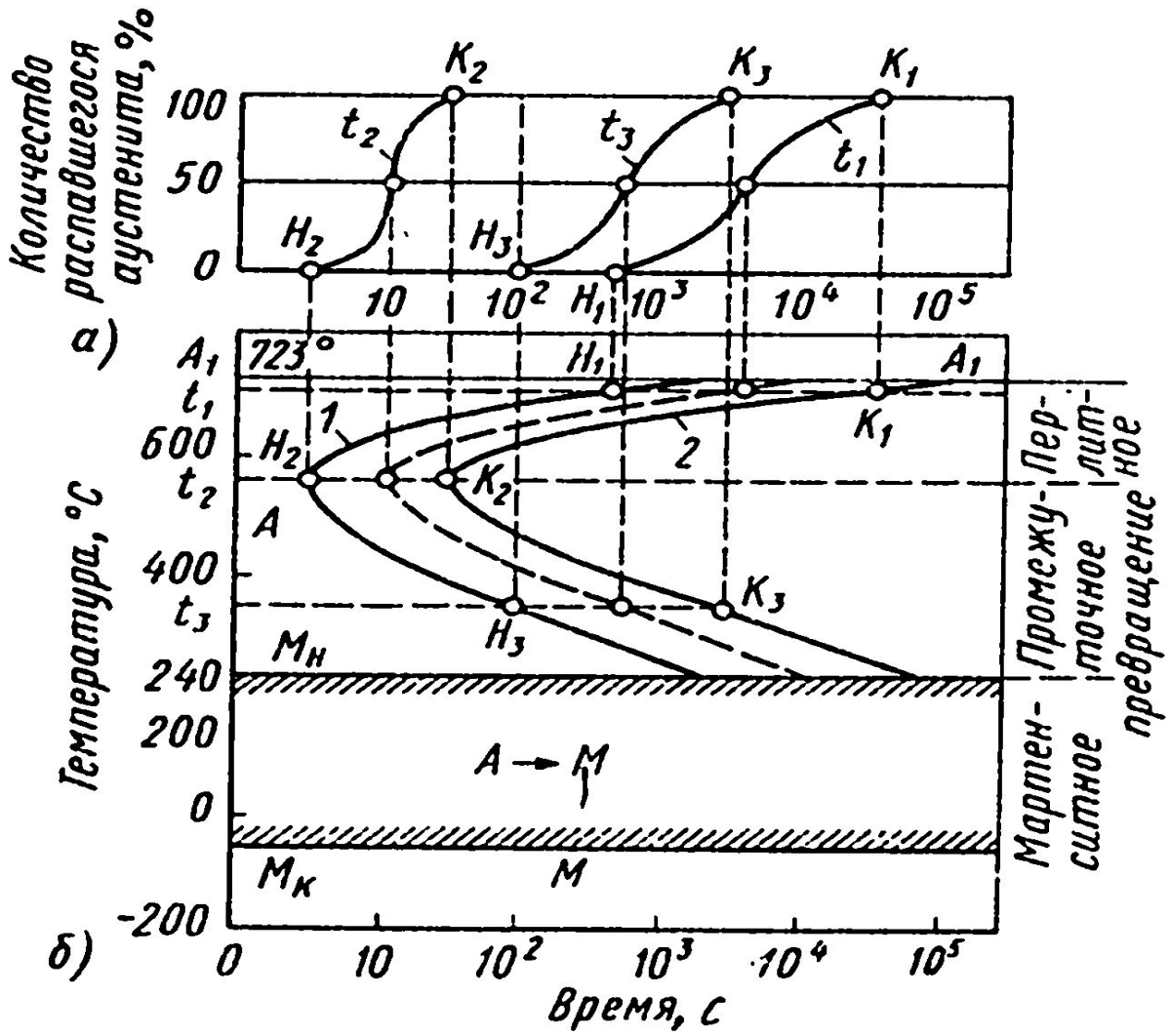



$A_{c3}$ - нагрев

$A_{r3}$ - охлаждение

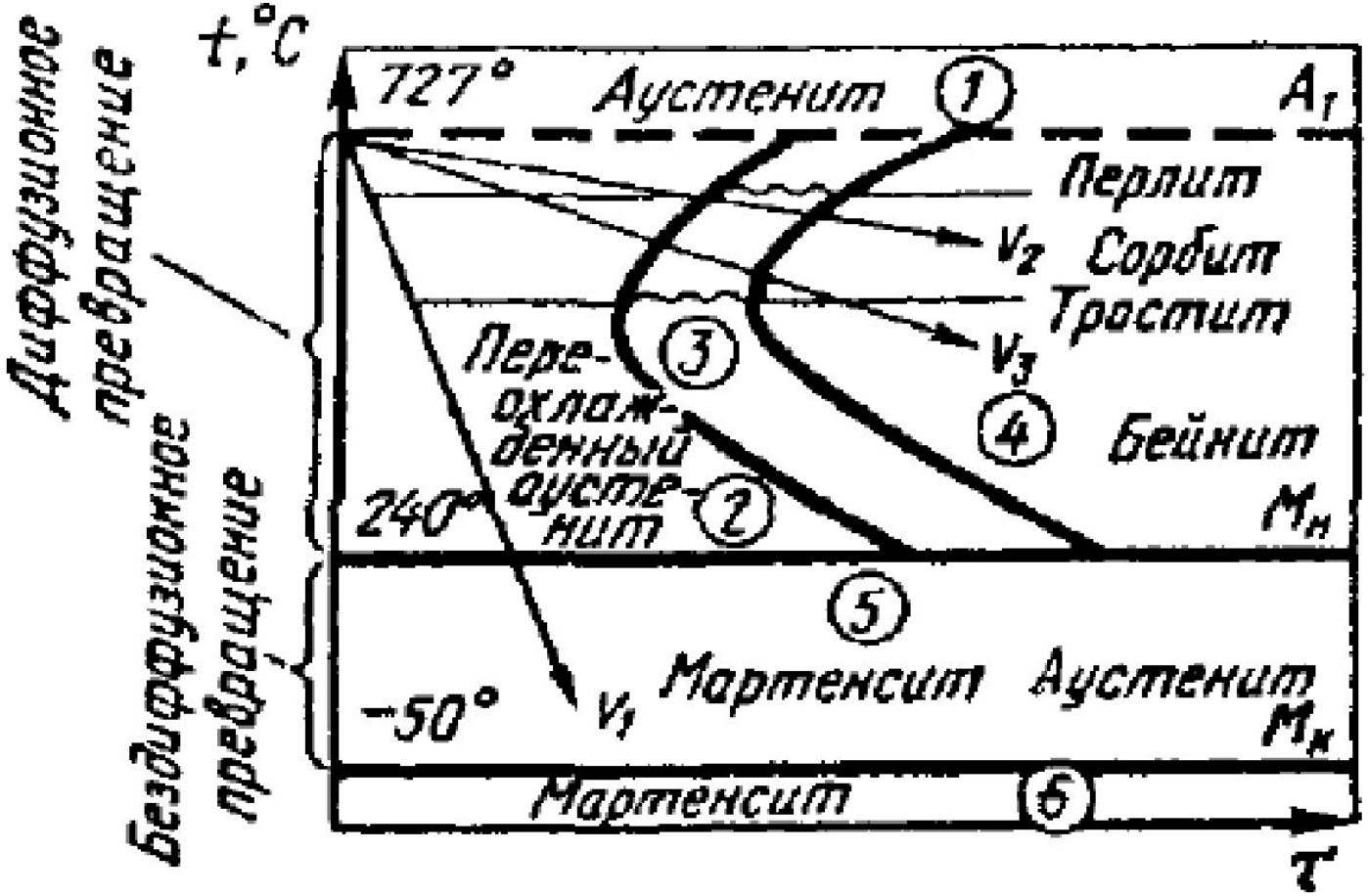
ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

# Диаграмма ТТТ для эвтектоидной стали



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

# Диаграмма ТТТ для эвтектоидной стали



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Превращения в стали

**Перлитное превращение:**

Перлит – размер зерен 0,6.- 1 мкм - эвтектоид

Сорбит – 0.25 - - 0,3 мкм

Троостит – 0.1- 0.15 мкм. квазиэвтектоиды.

**Мартенситное превращение**:

Мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в $Fe_{\alpha}$

**Бейнитное превращение (промежуточное)**

Бейнит – промежуточная структура содержащая троостит и мартенсит:

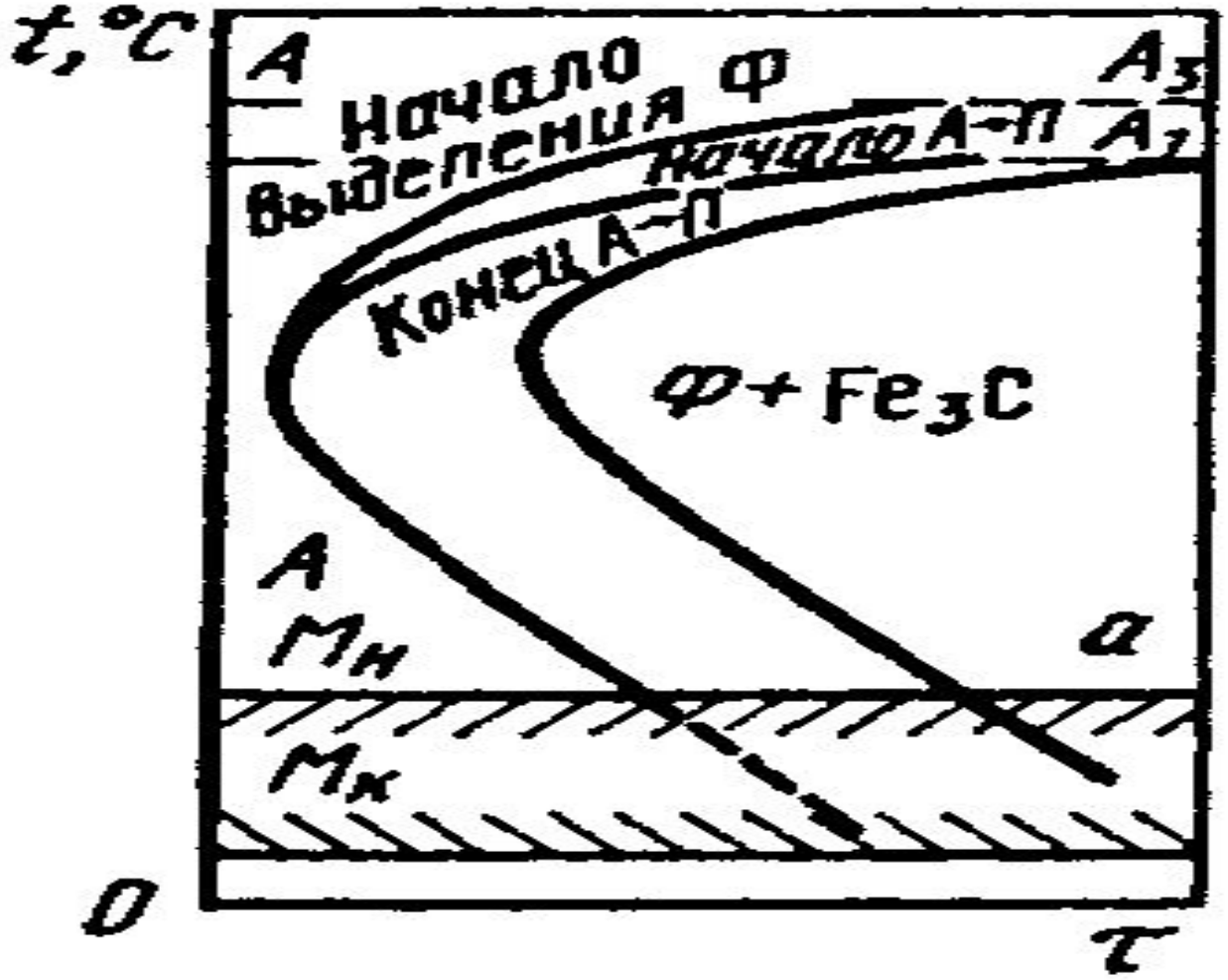
Верхний бейнит;

Нижний бейнит.

**Переохлажденный аустенит**

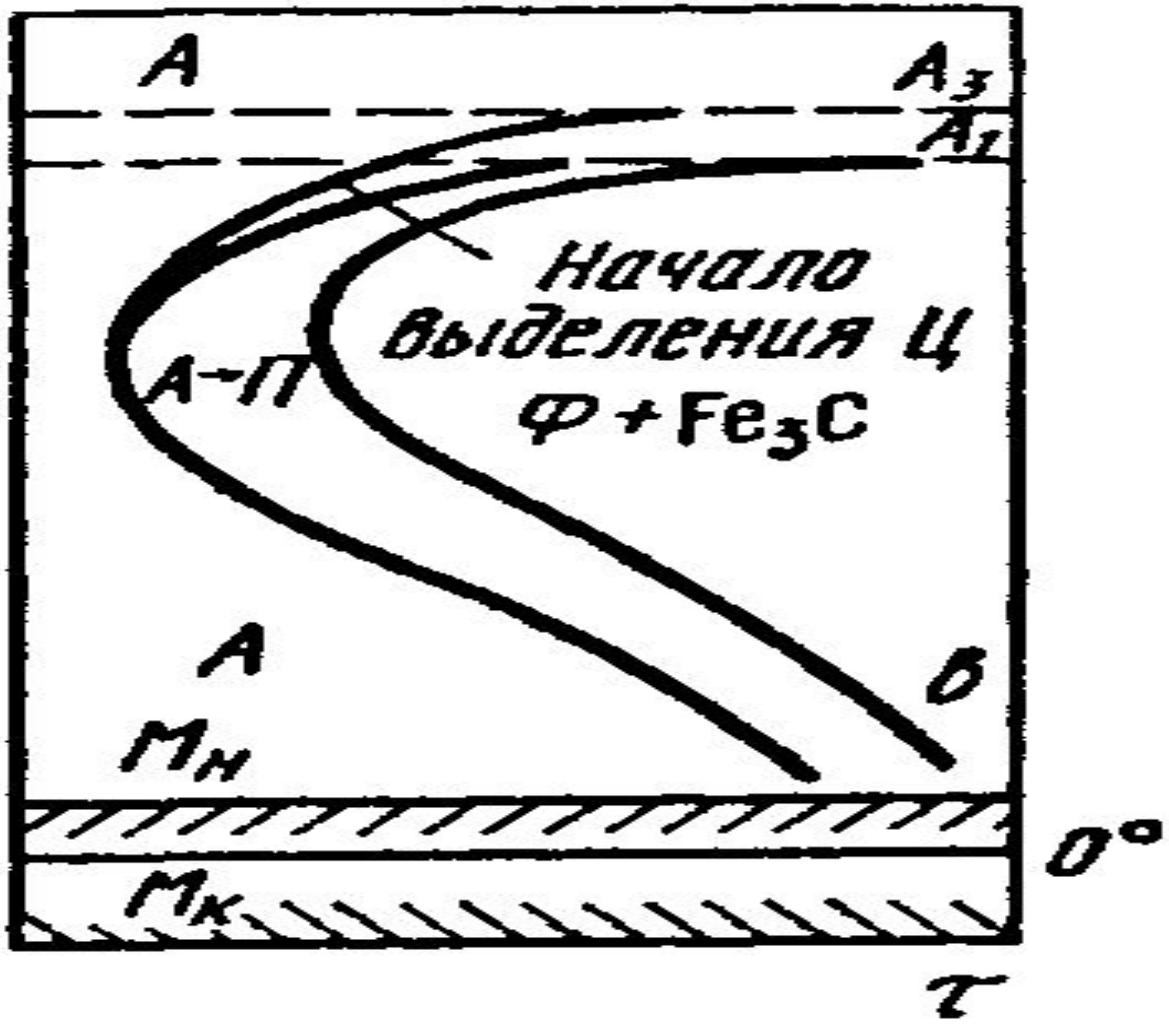
ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

# Диаграмма ТТТ для доэвтектоидных сталей



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

# Диаграмма ТТТ для заэвтектоидных сталей



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

# Виды термической обработки стали

1. **Отжиг;**
2. **Нормализация;**
3. **Закалка;**
4. **Отпуск.**

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Виды отжига

1. **Отжиг I рода** – отжиг, не связанный с полиморфными превращениями. Устраняет химическую или физическую неоднородность, созданную предшествующими обработками.

Существует 3 вида отжига первого рода:

- **Диффузионный (гомогенизационный) отжиг**.
- **Рекристаллизационный отжиг**.
- **Отжиг для снятия внутренних напряжений**.

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# 1.1. Диффузионный (гомогенизационный) отжиг.

Такому отжигу подвергается **легированная сталь** с целью уменьшения **дендритной или внутрикристаллитной ликвации**.

Дендритная ликвация – неоднородность слитка по составу

Дендритная ликвация приводит к неоднородности отливки по свойствам снижает пластичность и вязкость легированной стали. Также она повышает склонность стали к излому и к возникновению флокенов.

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Параметры диффузионного отжига

- **Температура 1100-1200 °С,**

  Так как только при высокой температуре более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания в отдельных объёмах состава стали.

- **Время нагрева - обычно 15-20 ч. иногда до 100 час.**

  Чем меньше время, тем меньше расходы на отжиг.

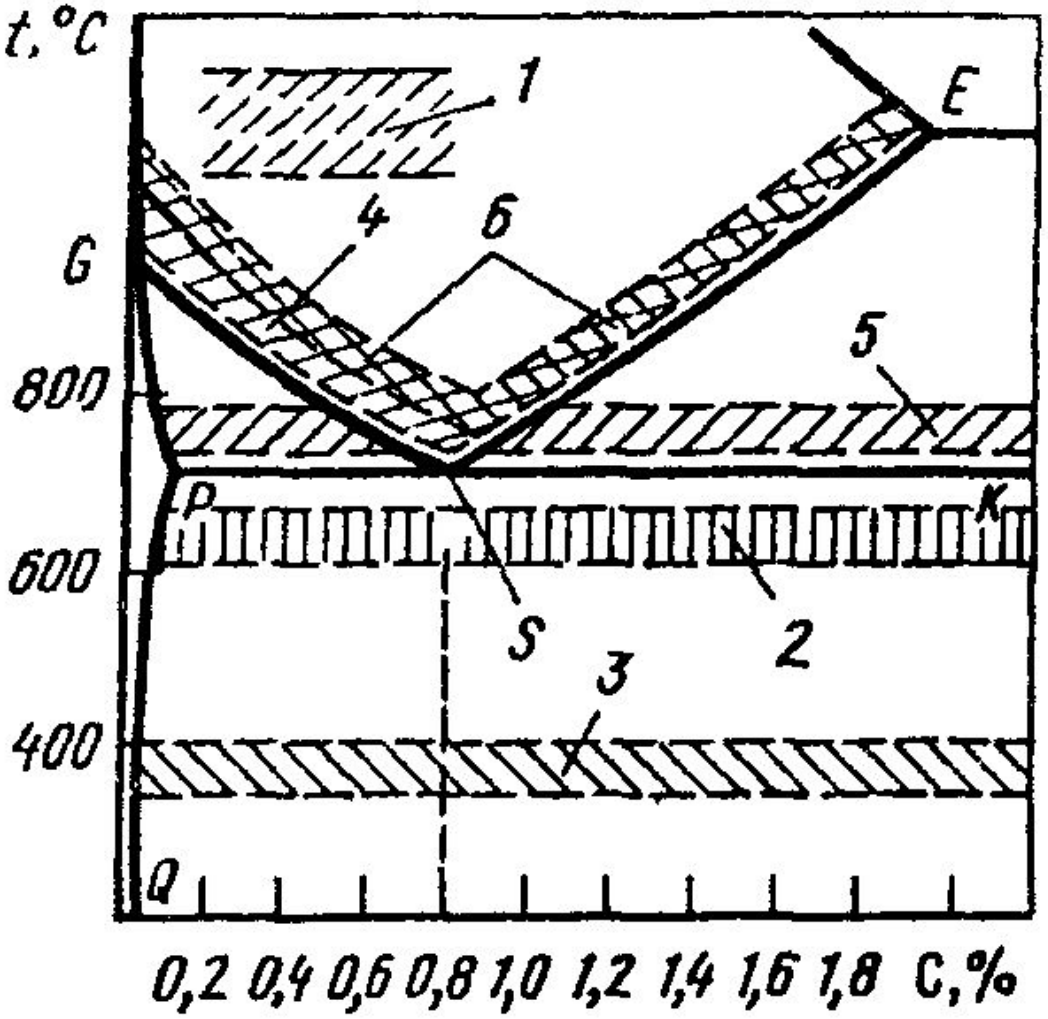
- **Медленное охлаждение вместе с печью.**

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Температура нагрева стали при отжиге и нормализации

1. Диффузионный отжиг.
2. Рекристаллизационный отжиг.
3. Отжиг для снятия напряжений.
4. Полный отжиг.
5. Неполный отжиг.
6. Нормализация.

1-3 – отжиг I рода; 4-6 – отжиг II рода.



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# 1.2. Рекристаллизационный отжиг.

*Это нагрев холоднодеформированной стали выше температуры начала рекристаллизации, выдержка при этой температуре с последующим охлаждением.*

*Применяют как промежуточную операцию для снятия наклёпа между операциями холодного деформирования.*

*Применяется главным образом* ***для углеродистых сталей****.*

*Температура отжига* ***680-700 °С****, время* ***0,5-1,5 ч****.*

*Зона 2*

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# 1.3. Отжиг для снятия остаточных напряжений..

*Этот вид отжига применяют для отливок, сварных изделий, клепаных изделий, деталей после обработки резанием и др., в которых в процессе предшествующих технологических операций возникли остаточные напряжения.*

*Остаточные напряжения могут вызвать изменение размеров, коробление и поводку изделия в процессе его обработки, эксплуатации или хранения.*

*Такой вид отжига проводится при температуре* ***160-700 °С,*** ***Время 2-3 часа*** *с последующим медленным охлаждением.*
***Зона 3***

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Отжиг 2 - го рода

**2.1. Полный;**

**2.2 Неполный;**

**2.3. Изотермический**.

Нагрев выше линий полиморфных превращений $\mathbf{A_{C1}}$ , $\mathbf{A_{C3}}$, после отжига структура соответствует диаграмме состояния Fe – C. При этом сталь получается с низкой твердостью , но высокой пластичностью.

**2.1. Полный отжиг:**

Применяется для доэвтектоидных сталей. Нагрев на 30-50$^{o}$ выше линии начала полиморфного перехода $\mathbf{A_{C3}}$, выдержка 0,5-1час в результате получается мелкое зерно аустенита.

Далее медленное охлаждение вместе с печью 100-150 град/час – Углеродистые стали, 40 – 60 град/час легированные стали.

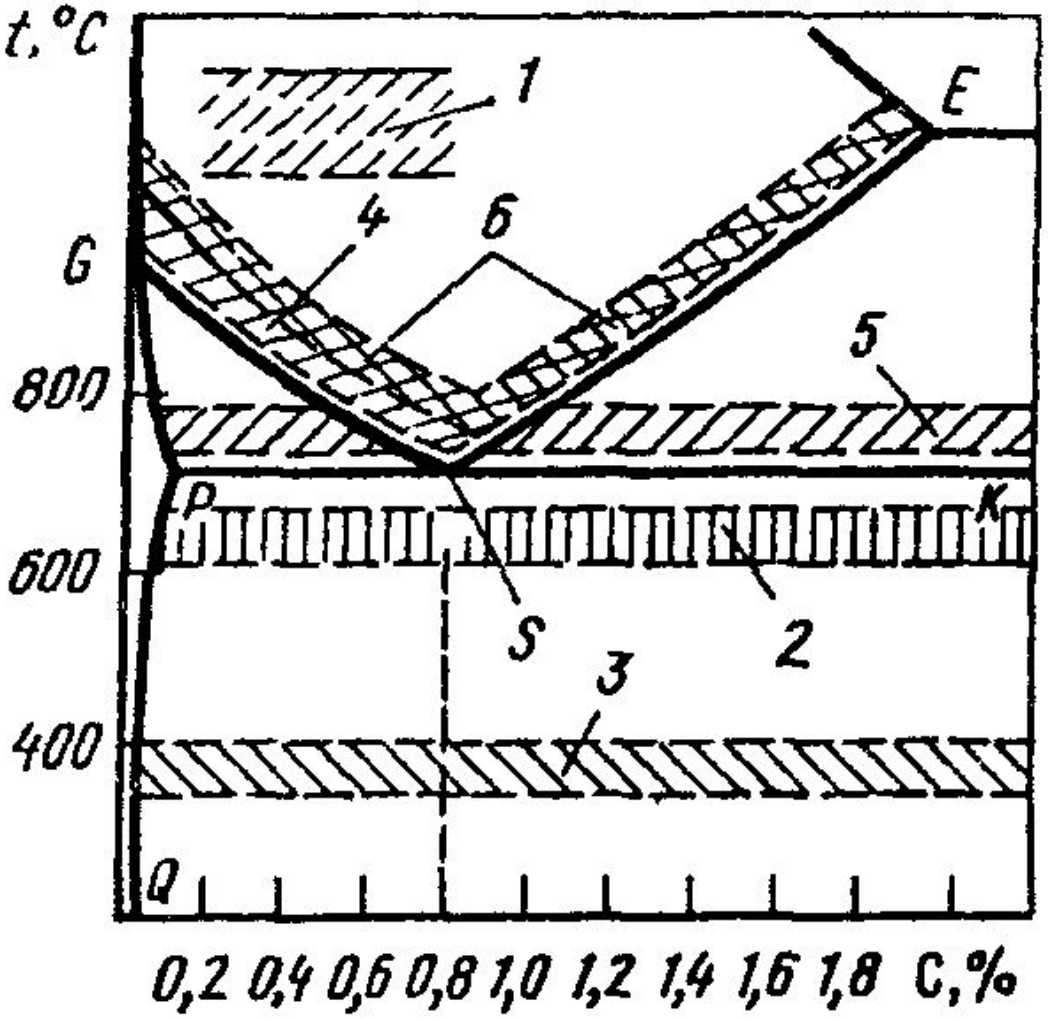
Далее охлаждение на воздухе. Если удаляются и остаточные напряжения, то охлаждение вместе с печью до цеховых температур.

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Температура нагрева стали при отжиге и нормализации

1. Диффузионный отжиг.
2. Рекристаллизационный отжиг.
3. Отжиг для снятия напряжений.
4. Полный отжиг.
5. Неполный отжиг.
6. Нормализация.

1-3 – отжиг I рода; 4-6 – отжиг II рода.



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Отжиг 2 - го рода

**2.1. Полный отжиг. Применение**: обработка, отливок, поковок, фасонного проката перед обработкой резанием, или окончательная обработка.

**2.2. Неполный отжиг**

Применяется для доэвтектоидных и для заэвтектоидных сталей.

**Нагрев на 10-50º** выше линии $A_{C1}$ конца полиморфных превращений, **выдержка 1-3 часа**.

**Охлаждение** вместе с печью со скоростью **30-60 град/час**, далее охлаждение на воздухе.

**Назначение:** перед волочением, перед резанием, тонкие листы перед холодной штамповкой.

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Отжиг 2 - го рода

**2.3. Изотермический**

Применяется для улучшения обрабатываемости легированных сталей.

Нагрев на 30-50$^{o}$ выше линии $\mathbf{A_{c3}}$ начала полиморфных превращений, выдержка 0,5 – 1час.

Быстрое охлаждение до 660-680$^{o}$ С, выдержка 3-6 час для полного разложения аустенита и получения равновесной перлитной структуры, далее охлаждение на воздухе.

Изотермическому отжигу подвергают поковки (штамповки) и сортовой прокат небольших размеров из легированной цементируемой стали.

# Нормализация

***Нормализационный отжиг (нормализация)*** *– это отжиг, при котором охлаждение после нагрева и выдержки проводится на воздухе.*

*Нормализацию иногда называют жестким отжигом иногда мягкой закалкой.*

***Нагрев*** *на 40-50°С выше линии* **$A_{C3}$ – доэвтектоидные стали;**

***Нагрев*** *на 40-50°С выше линии* **$A_{Cm}$ – заэвтектоидные стали;**

*Небольшая выдержка для прогрева садки и охлаждение на воздухе.*

*Назначение: устранение наклепа, получающегося при прокате. ковке, штамповке. При этом получается приличная пластичность и хорошая твердость*

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

## Нормализация

*Нормализацию чаще всего применяют как промежуточную операцию перед резанием для **смягчения стали** и **устранения крупных зёрен**.*

*Также нормализацию используют в качестве окончательной термообработки средне- и высокоуглеродистых сталей, вместо закалки и отпуска. (меньше вероятность трещин и коробления).*

*Нормализация и высокий отпуск вместо полного отжига для легированных сталей. Поскольку нормализация более выгодна.*

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Закалка

**Закалка** заключается в нагреве металла выше линии полиморфных превращений и в резком охлаждении с целью получения структуры, обладающей высокой твёрдостью и прочностью.

**Охлаждение при закалке** должно обеспечить получение необходимой структуры в пределах заданного сечения изделия и не должно вызывать закалочных дефектов: трещин, деформаций, коробления и высоких растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях.

Для закалки используют жидкости – **воду, водные растворы щелочей и солей, масла.**

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Закалка

При охлаждении закаливаемой стали в жидкой среде разливают **три периода**, характеризующиеся разной скоростью охлаждения:

- период **плёночного** кипения, когда теплопередаче препятствует образование паровой рубашки, из-за чего скорость охлаждения сравнительно невелика.
- период **пузырчатого (пузырькового)** кипения, при котором паровая рубашка разрушается, и интенсивность охлаждения резко возрастает.
- период **конвективного теплообмена**, когда температура детали ниже температуры кипения жидкости, а скорость охлаждения резко падает.

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# *Закалочные среды*

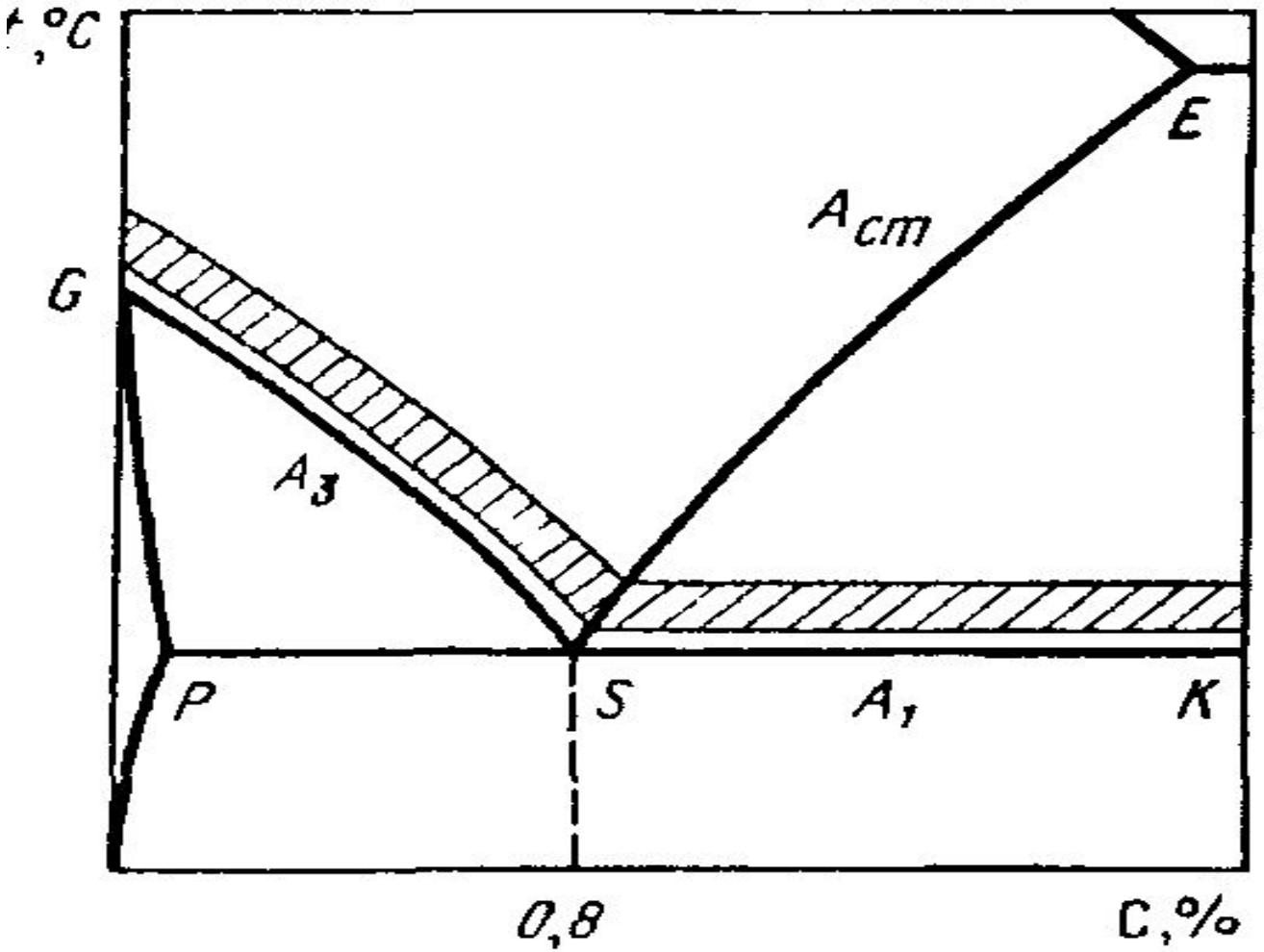
| Охлаждающая среда | Температура, °С | | Интенсивность охлаждения в интервале температур пузырькового кипения |
|---|---|---|---|
| | Охлаждающей среды | Пузырькового кипения | |
| Вода | 20<br>40<br>80 | 400-100<br>350-100<br>250-100 | 1,0<br>0,7<br>0,2 |
| 10% - ный раствор NaCl в воде | 20 | 650-100 | 2,0 |
| Раствор NaOH в воде<br>10% - ный<br>50% - ный | <br>20<br>20 | <br>650-100<br>650-100 | <br>2,0<br>2,0 |
| Масло минеральное | 20-200 | 500-250 | 0,3 |

**Скорость охлаждения сталей в различных закалочных средах, С/с**

| Закалочная среда | Интервал температур, °С | |
|---|---|---|
| | 650–550 | 300–200 |
| Вода, 18 °С (water) | 600 | 270 |
| Вода, 50 °С | 100 | 270 |
| 10 %-й раствор NaOH в воде | 1200 | 300 |
| 10 %-й раствор NaCl | 1100 | 300 |
| Минеральное масло (oil) | 100–150 | 20–50 |
| Спокойный воздух (air) | 3 | 1 |
| Полимерная закалочная среда ПК-2 | 300–550 | 50–100 |
| Полимерная закалочная среда ВП-3 | 300–550 | 50–100 |

ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

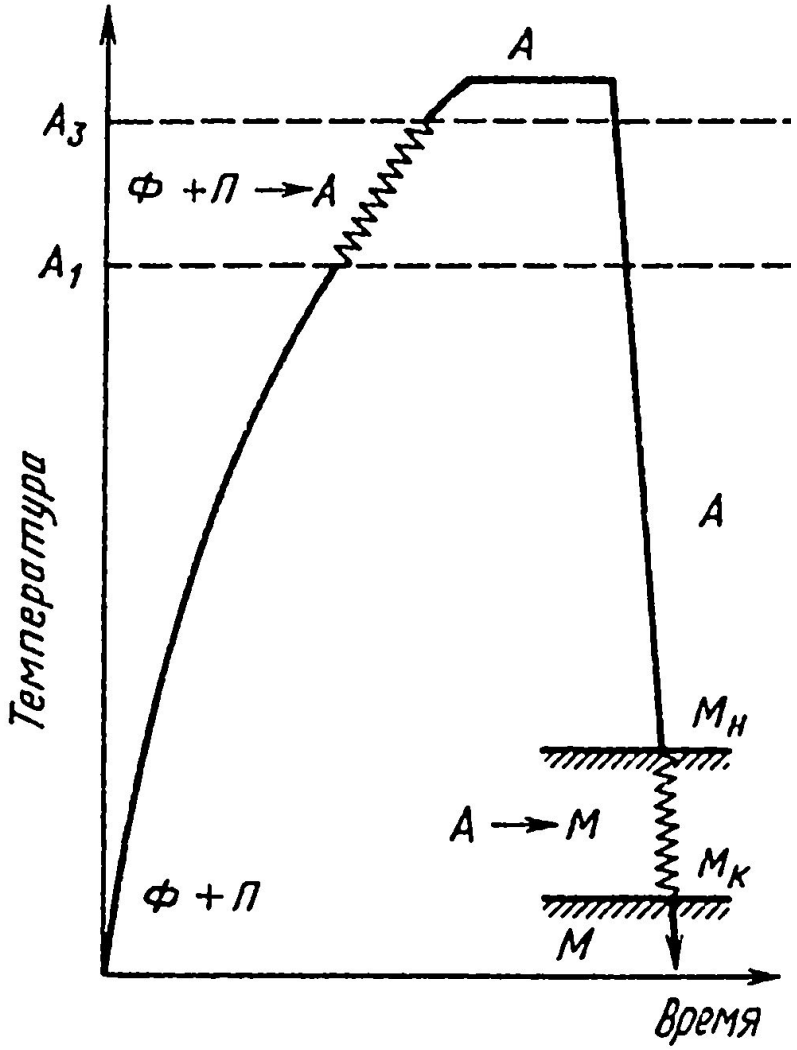
# Зоны нагрева при закалке



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Схема закалки доэвтектоидной стали:

А – аустенит;
П – перлит;
Ф – феррит;
М – мартенсит.



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

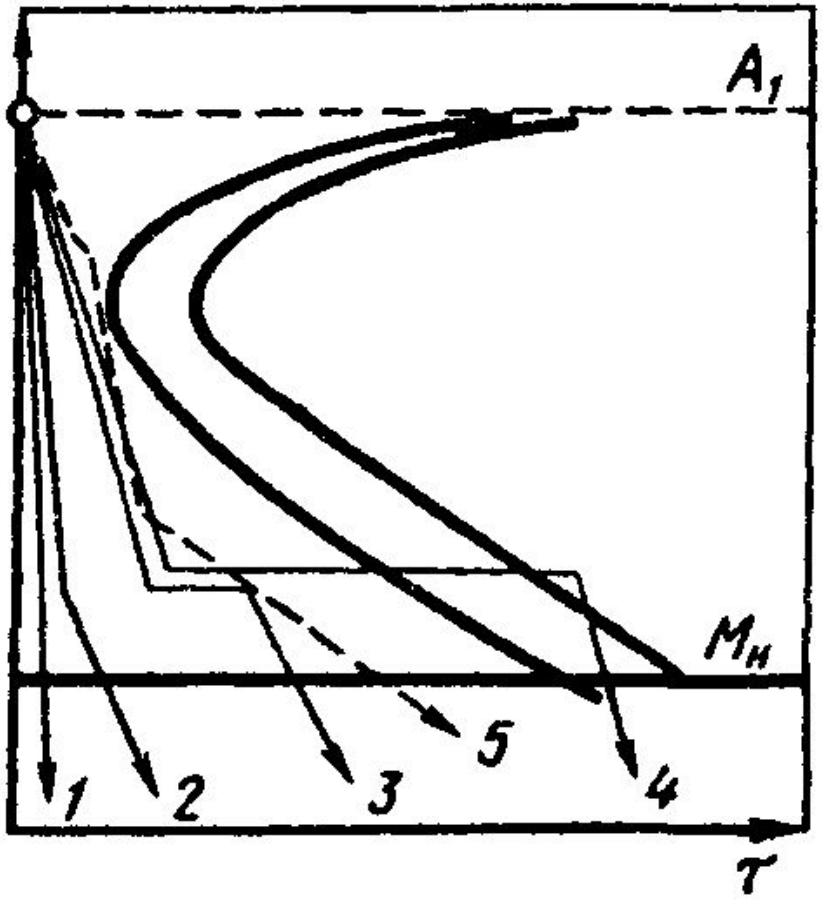
# Виды закалки

- Непрерывная закалка в одной среде;
- Прерывистая закалка в двух средах;
- Изотермическая закалка;
- Закалка с самоотпуском;
- Поверхностная закалка (токами высокой частоты ТВЧ).

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Схема режимов при разных способах закалки:

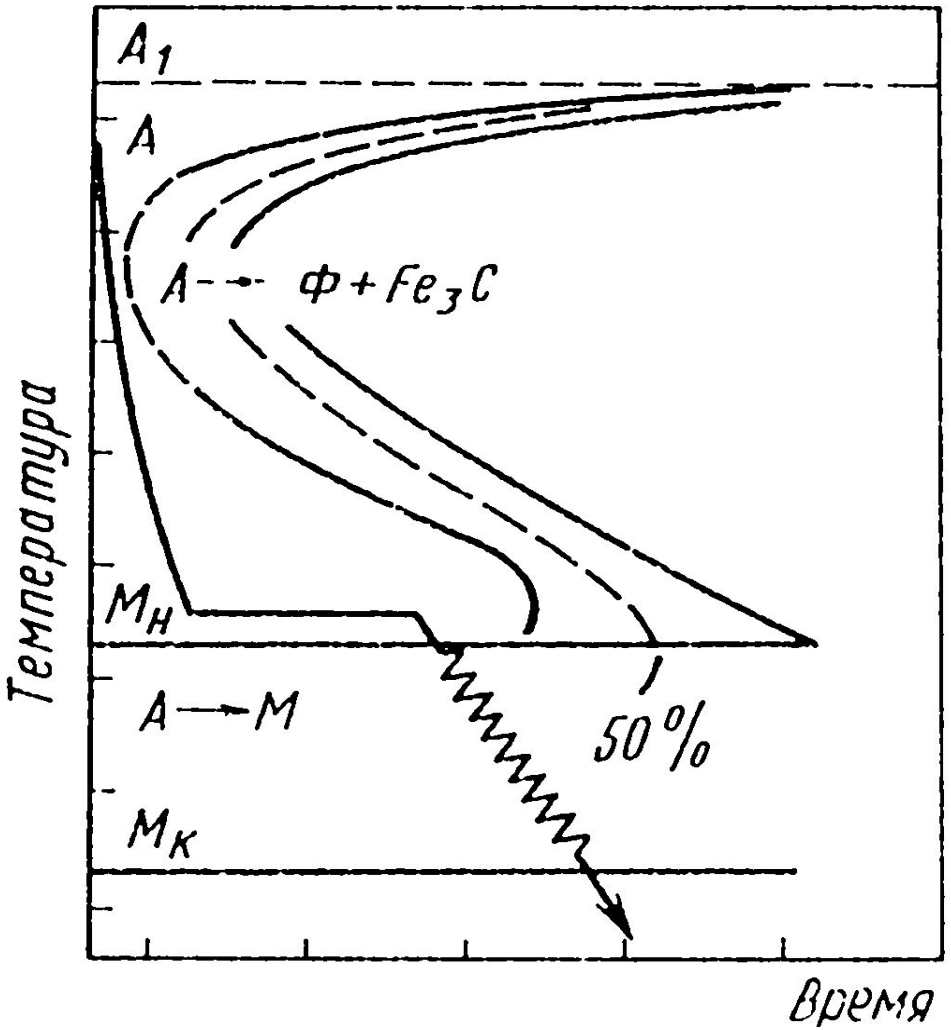
1. Закалка в одном охладителе.
2. Закалка в двух средах.
3. Ступенчатая закалка.
4. Изотермическая закалка.
5. Идеальный режим охлаждения.



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Схема ступенчатой закалки заэвтектоидной стали с 0,8 % углерода:

А – аустенит;
Б – бейнит;
Ф – феррит;
М – мартенсит.



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Отпуск

***Отпуск*** *применяется для удаления недостатков закалки (снятия внутренних напряжений). Заключается в нагреве закалённой стали до температур ниже* $A_{C1}$ *, выдержке и последующем охлаждении с определённой скоростью.*

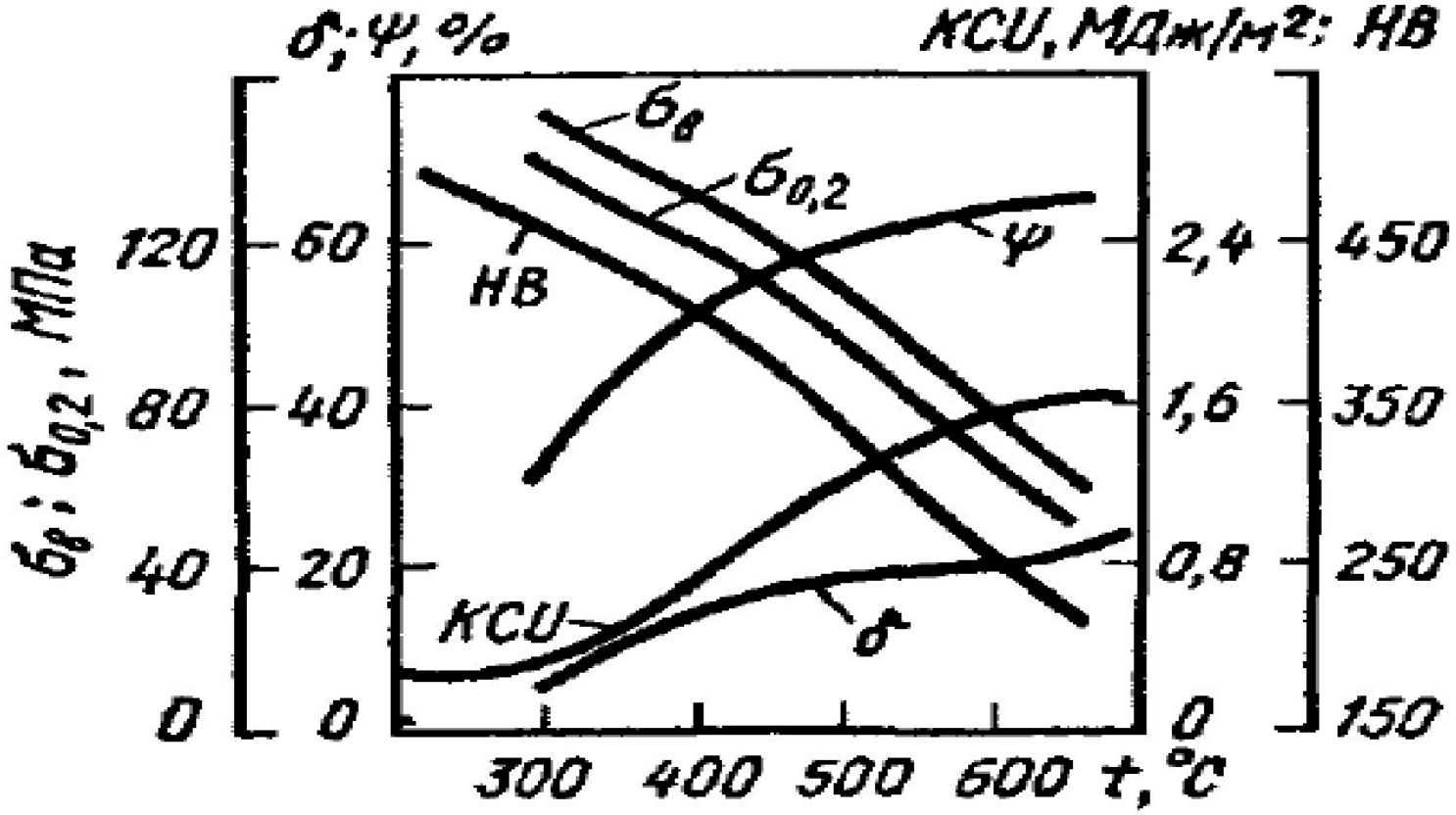
*Скорость охлаждения после отпуска также оказывает большое влияние на остаточные напряжения. Чем медленнее охлаждение, тем меньше остаточные напряжения. Ускоренное охлаждение повышает предел выносливости, но изделия сложной формы следует охлаждать медленно во избежание их коробления.*

Существует три вида отпуска:

1. *Низкий отпуск.*
2. *Средний отпуск.*
3. *Высокий отпуск.*

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Изменение механических характеристик закаленной стали от температуры отпуска




Сталь с содержанием углерода 0,4%

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

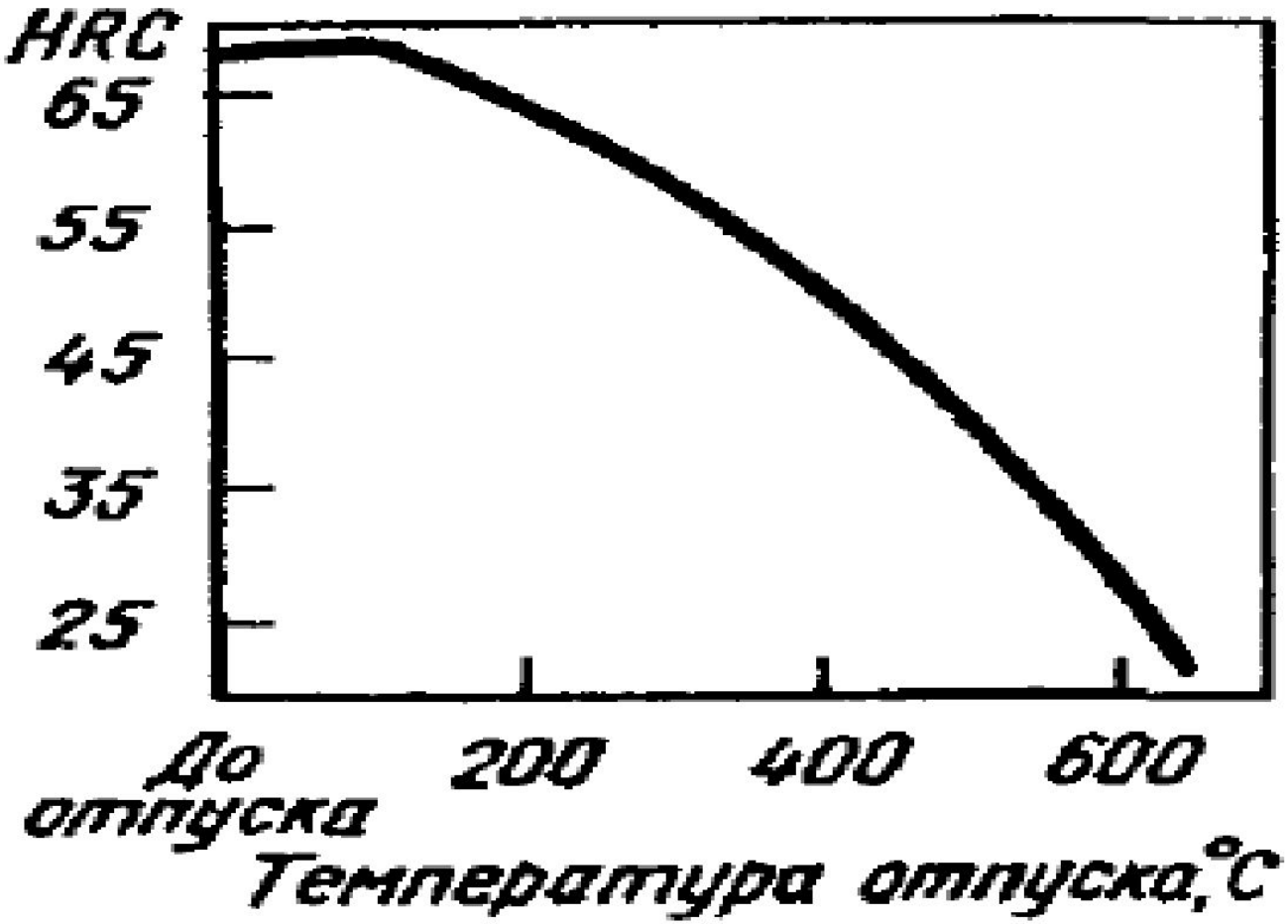
# Низкий отпуск

**Низкий отпуск** проводят при нагреве **150 - 250 °** С. Продолжительность **1-2,5 ч.** При этом снижаются закалочные макронапряжения, мартенсит закалки переводится в отпущенный мартенсит, повышается прочность и немного улучшается вязкость без заметного снижения твердости.

Закаленная сталь (**0,6-1,3** %С) после низкого отпуска сохраняет твердость **58-63 HRC**

ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

# Зависимость твердости закаленной эвтектоидной стали от температуры отпуска



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Низкий отпуск

Такой обработке подвергают режущий и мерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали, претерпевшие поверхностную закалку, цементацию, цианирование или нитроцементацию.

Для изделий больших сечений и измерительных инструментов назначают более длительный отпуск.

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Средний отпуск

**Средний отпуск** проводят при нагреве до 350-500 °С. Цель среднего отпуска состоит в некотором снижении твердости при значительном увеличении упругости Применяют главным образом для пружин и рессор, а также для штампов. Такой отпуск обеспечивает высокие пределы упругости и выносливости. Структура стали после среднего отпуска – **троостит отпуска** или **верхний бейнит (троосто-мартенсит)**.

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Средний отпуск

Твердость стали после среднего отпуска

**40-50 HRC**

Охлаждение после отпуска при 400-450 °С следует проводить в воде, что способствует образованию на поверхности сжимающих остаточных напряжений, которые увеличивают предел выносливости пружин.

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Высокий отпуск

***Высокий отпуск*** *проводят при нагреве до 550-650 °С. Структура стали после высокого отпуска –* ***сорбит отпуска****. Высокий отпуск создаёт* ***наилучшее соотношение прочности и вязкости стали****. Применяется для конструкционных сталей, детали из которых подвергаются воздействию высоких напряжений и ударным нагрузкам.*

*Твердость после высокого отпуска* ***280-255HV***

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

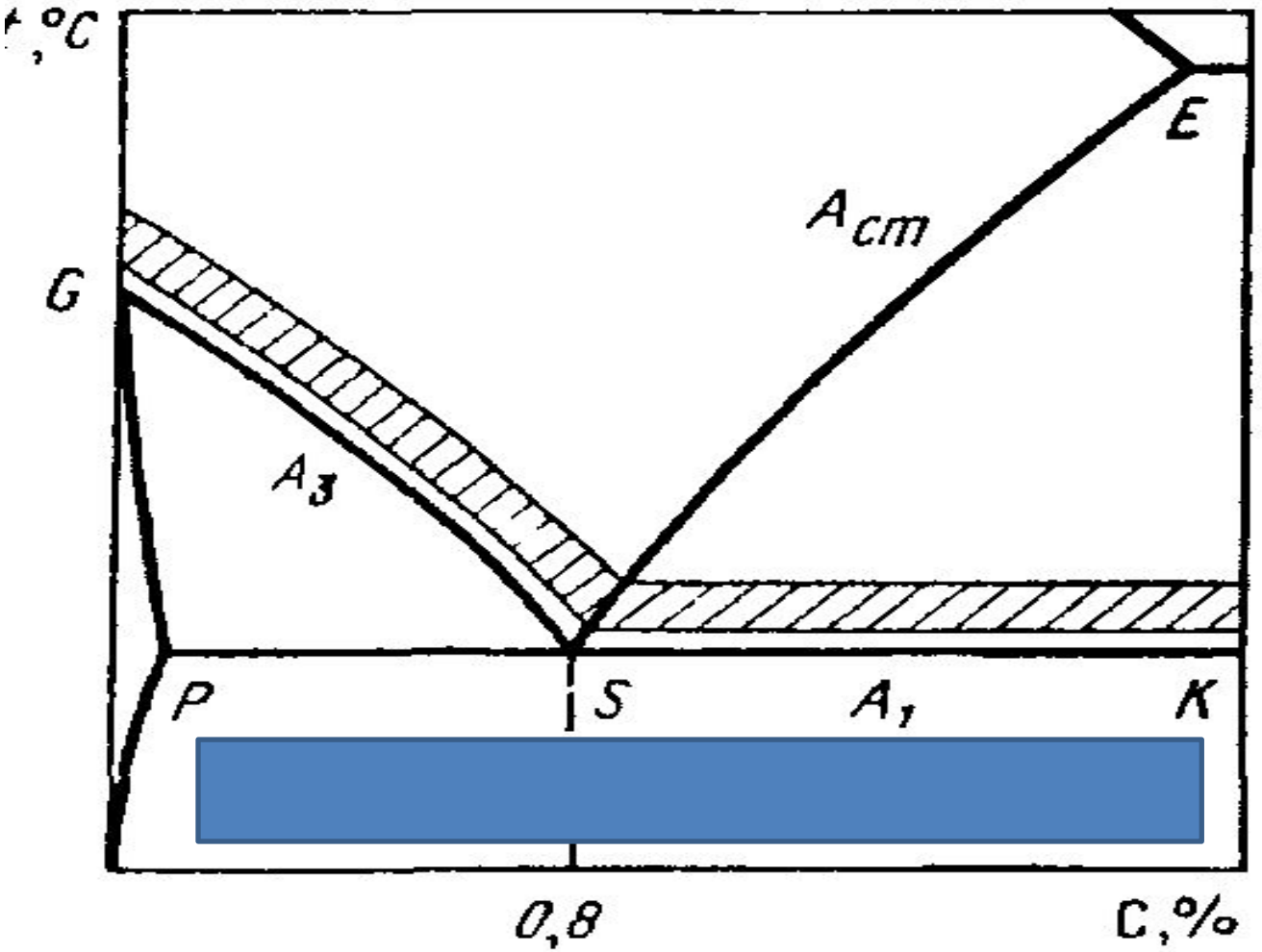
# Высокий отпуск

*Закалка с последующим высоким отпуском улучшающая общий комплекс механических свойств является основным видом термической обработки. Такую обработку называют* ***улучшением****. Длительность высокого отпуска 1-6 часов в зависимости от габаритов изделия.*

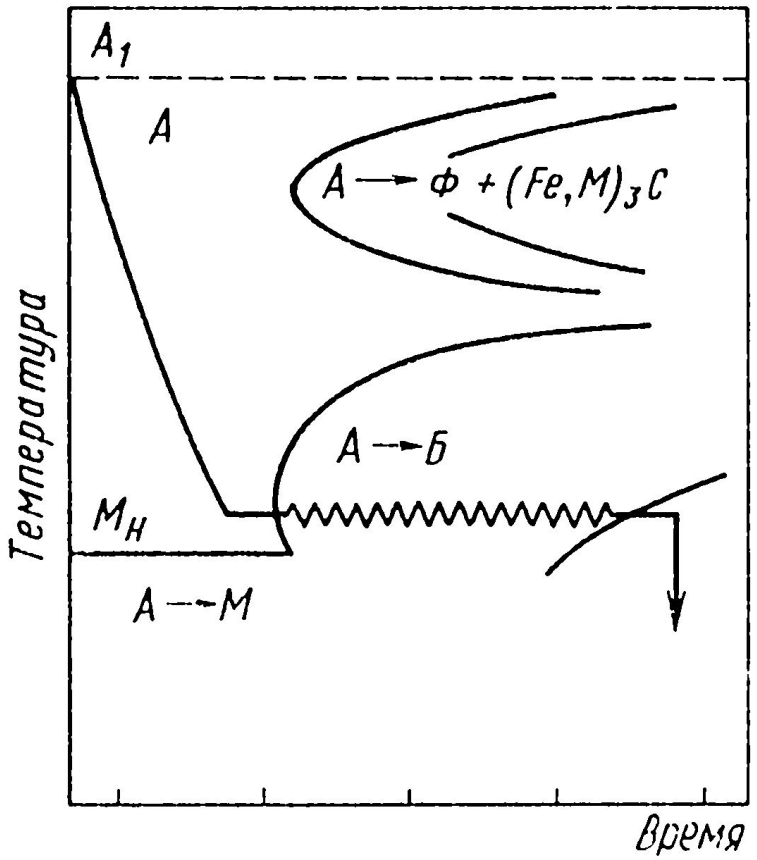
*Улучшению подвергают среднеуглеродистые конструкционные стали (****0,3-0,5 %С****), к которым предъявляются высокие требования по пределу выносливости и ударной вязкости. Оно значительно повышает конструктивную прочность стали.*

ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

# Зоны нагрева при закалке и отпуске



ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Схема изотермической закалки легированной стали:

А – аустенит;
Б – бейнит;
Ф – феррит;
М – мартенсит.