



# Поверхностное упрочнение деталей машин

**Лекция 10**

**Поток 1А**

**Лектор доц. Дощечкина И .В.**

(lect\_10\_1A\_ТКМiМ \_DIV. ppt )

(Использованы материалы электронного ресурса [www.google.com.ua / search](http://www.google.com.ua/search) )

# План лекции

- × 10.1. Поверхностная закалка.
- × 10.2. Индукционная закалка ( закалка ТВЧ).
- × 10.3. Закалка с газопламенным нагревом.
- × 10.4. Лазерная закалка.
- × 10.5. Химико - термическая обработка ( ХТО ).
- × 10.6. Цементация стали.
- × 10.7. Термообработка после цементации.
- × 10.8 Вопросы для самостоятельной работы.



# 10.1. Способы поверхностного упрочнения деталей машин.

Во многих случаях от поверхности и внутренних слоев изделий требуются разные свойства. Это прежде всего детали, работающие в условиях трения : нужна очень твердая, износостойкая поверхность и вязкая и пластичная сердцевина.

Для получения разных свойств на поверхности и в сердцевине используют разные способы поверхностного упрочнения деталей, которые можно разделить на три группы:



На автомобильных заводах ~ 60% деталей подвергают поверхностной закалке, а 40% - химико-термической обработке.



# 10.2. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА

**Цель закали** –повышение твердости, износостойкости и предела выносливости поверхностного слоя изделия при сохранении вязкой и достаточно пластичной сердцевины, способной сопротивляться разрушению при циклических и динамических нагрузках и предотвратить образование трещин.

Для **поверхностной закали** применяются **стали, содержащие >0,3% С** для получения необходимой твердости.

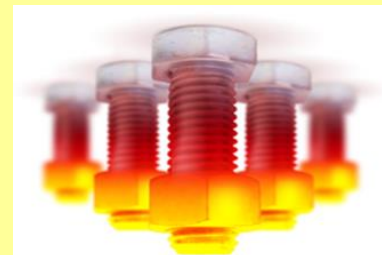
**Поверхностную закалку можно проводить двумя способами:**

- **нагревается** выше критической точки  $A_{C3}$  и **закаливается** только **поверхностный слой**;

- **нагревается вся деталь**, но **закаливается** только поверхностный слой со скоростью  $>V_{кр}$ .

В зависимости от способа **нагрева различают виды закали:**

- с индукционным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ);
- газопламенная;
- лазерная.



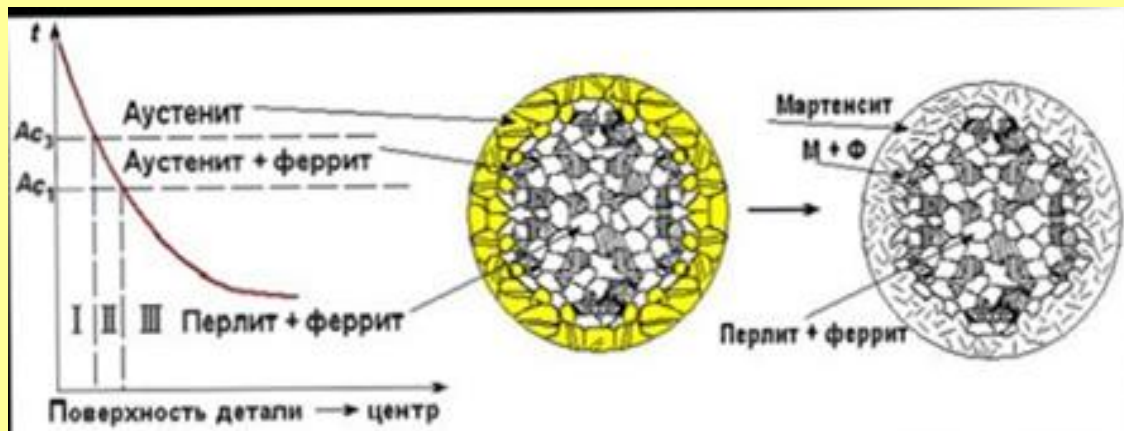
# Принцип поверхностной закалки

При нагреве поверхности выше критической точки  $A_{C3}$  создается резкий градиент температур по сечению детали.

Выдержка при температуре нагрева очень мала. Изделие не успевает прогреться и сердцевина остается практически холодной. В поверхностном слое выделяется  $\approx 90\%$  теплоты.



При охлаждении со  $V > V_{кр}$  слой I ( $t_n > A_{C3}$ ) закалится на мартенсит, слой II ( $t_n > A_{C1} < A_{C3}$ ) закалится частично, слой III ( $t_n < A_{C1}$ ) вообще не закалится.



На поверхности будет высокая твердость, а сердцевина не изменится – свойства будут на исходном уровне.



# Вопросы для самоконтроля

1. Назовите способы поверхностного упрочнения изделий.
2. В чем принципиальное отличие поверхностной закалки от химико-термической обработки?
3. Какова цель поверхностной закалки?
4. Какие стали подвергаются поверхностной закалке? Обоснуйте ответ.
5. Какими методами осуществляют поверхностную закалку?
6. В чем основной принцип поверхностной закалки?



# 10.3. ИНДУКЦИОННАЯ ЗАКАЛКА (ЗАКАЛКА С НАГРЕВОМ ТВЧ)

Для н

Через и  
пропус  
высокой  
создающ  
инду  
пере  
магнитн  
Вследстви  
в поверхно  
возникают  
ТОКИ и В  
тепло и  
нагрев

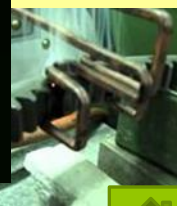
Нагрев  
непреръ  
перемещ  
на

Для за  
после



ной

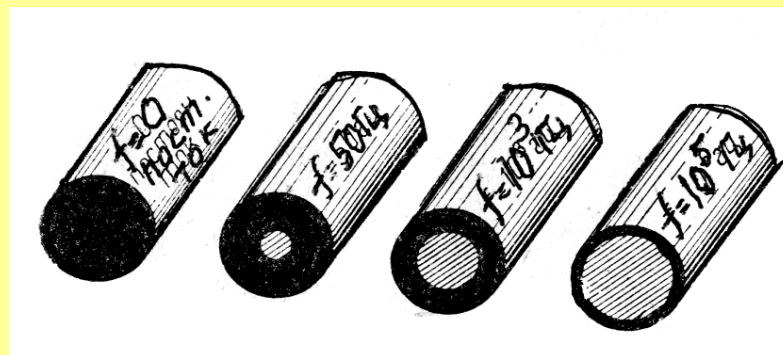
детали  
ельный  
вующей  
осле  
одит  
ение  
сией).



# Выбор частоты тока при индукционном нагреве.

**Ток высокой частоты** для индукционного нагрева получают от **машинного** (частота 500-10000 Гц) или **лампового** (частота до 1000000) генератора.

**Глубина нагрева** поверхностного слоя **зависит от частоты тока.**



Для получения закаленного слоя до 2 мм – используют ламповые генераторы. При толщине слоя > 2мм – машинные генераторы.

Чем больше частота тока, тем меньше толщина нагретого, а следовательно и закаленного слоя.

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

$\delta$  – глубина нагрева, мм,

$\rho$  – электросопротивление, Ом·см,

$\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м,

$f$  – частота тока, Гц.

**Скорость нагрева** в области фазовых превращений  $A_{c1} - A_{c3}$  для доэвтектоидных сталей составляет до **500° C /с.**





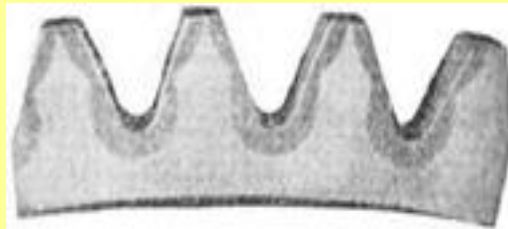
# Параметры индукционной закалки

Температура нагрева поверхности при индукционной закалке **980-1050°C**.

Выдержка – 2-5 с.

В результате быстрого **охлаждения** структура поверхности – **мартенсит отпуска** с твердостью **55-58 HRC**.

Для **снятия внутренних напряжений** и **сохранения твердости** после закалки нужен **низкий отпуск** – (150-200°C) или **самоотпуск** - до 300°C охлаждаются водой, а затем медленно на воздухе.



Площадь сечения закаленного слоя <20% общего сечения детали.

У зубчатых колес глубина закаленного слоя 0,2-0,28 от модуля зуба.

Чем крупнее деталь, тем больше должна быть глубина закаленного слоя ( $\approx 10\%$  от радиуса).

Для **поверхностной закалки** чаще всего используют стали с содержанием углерода **0,4-0,45%С** (40, 45, 40Х, 40ХН, 40ХС).

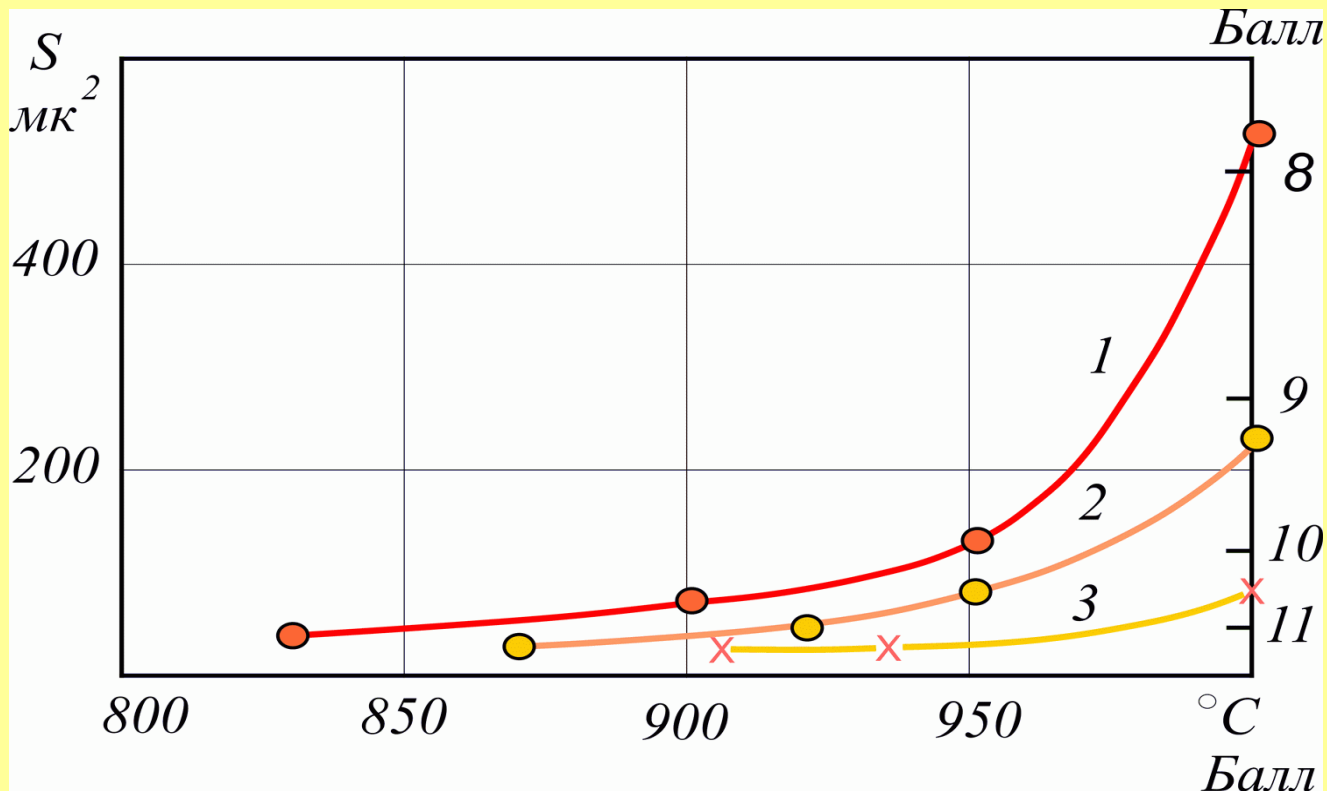
Детали подвергают **улучшению** (или нормализации), а затем **поверхностной закалке** с последующим **низким отпуском** или **самоотпуском**.



# Особенности закалки при индукционном нагреве.

Температура нагрева поверхности при индукционной закалке выше (980-1050 °С), чем при объёмной закалке.

Скорость нагрева при объёмной закалке ~20 °С/мин, а при индукционной закалке более 500 °С/с и зерно не успевает вырасти.

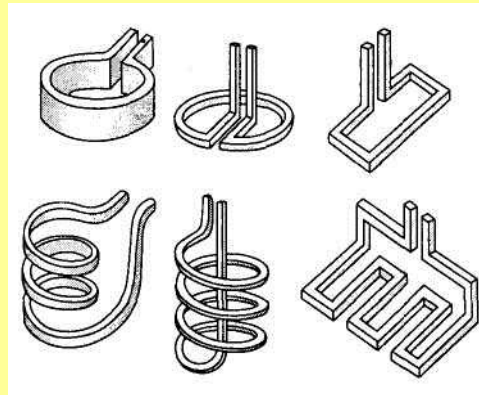


Рост зерна аустенита в стали 40 при нагреве со скоростью:  
1 - 8 °С/с, 2 - 200 °С/с, 3 - 1000 °С/с.

# Преимущества и недостатки поверхностной индукционной закалки

## Преимущества:

- 1) Отсутствие обезуглероживания коробления и окисления поверхности;
- 2) Образование мелкого зерна (повышение прочности при сохранении пластичности).
- 3) Возникновение поверхностных остаточных напряжений сжатия и сопротивление усталостному разрушению.
- 4) Возможность автоматизации



Индукторы

## Недостатки:

- 1) Для каждой детали необходим индуктор определённой формы.
- 2) Невозможность обработки локальных участков в труднодоступных местах и на плоскости.
- 3) Высокая стоимость оборудования и рентабельность лишь в условиях массового производства

**Существенны и технологические преимущества:** значительно меньший расход электроэнергии, так как нагревается тонкий слой; высокая производительность (длительность процесса 30-60); точное и простое регулирование глубины слоя; непрерывность технологического процесса производства детали (закалка в поточной линии мехобработки); улучшение условий труда и экологии.



# Закалка ТВЧ была впервые применена в 1937 г для упрочнения деталей автомобиля.

Поверхностному упрочнению подвергают детали, **поверхностные слои которых при эксплуатации интенсивно изнашиваются, а внутренние слои должны сопротивляться циклическим и значительным динамическим нагрузкам.**



# Вопросы для самоконтроля

1. В чем суть индукционной закалки и каковы её основные параметры?
2. Как зависит глубина закаленного слоя от частоты тока при индукционном нагреве?
3. Каков цикл полной термической обработки деталей с поверхностной закалкой?
4. Какими преимуществами обладает закалка с индукционным нагревом? Приведите примеры её использования.



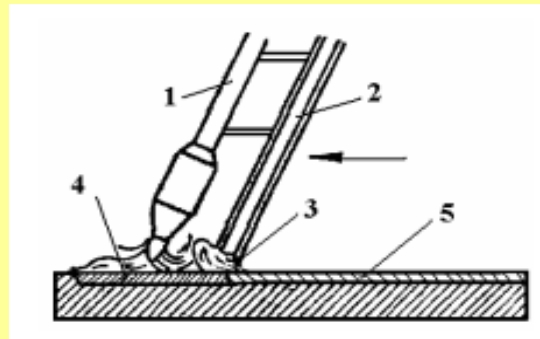
## 10.4. ЗАКАЛКА С ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАГРЕВОМ

При газопламенной закалке **поверхность** изделия **нагревают кислородно - ацетиленовым пламенем** с помощью горелки.

Горелка расположена на расстоянии 3-6 мм от поверхности детали и перемещается со скоростью 2-200 мм/мин.

Поверхность нагревается до температуры выше  $A_{c3}$  на глубину 4-10мм.

Сердцевина не успевает нагреться.



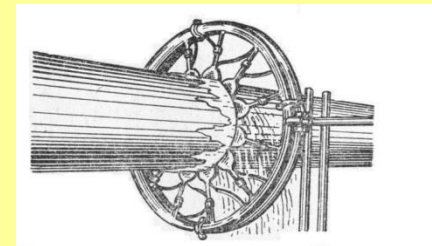
1 – горелка; 2 – водопроводная трубка; 3 – вода; 4 – закаленный слой; 5 – нагретый слой.



Охлаждение нагретой детали осуществляется водой. Степень нагрева поверхностного слоя регулируется мощностью пламени и длительностью его воздействия.

Структура поверхностного слоя мартенсит с твердостью 52-56 HRC для сталей с 0,45-0,5%С.

Этот простой и дешевый способ закалки применяют для крупногабаритных деталей в основном с плоской поверхностью. Для цилиндрических деталей используют кольцевые горелки.



# Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается закалка с газопламенным нагревом?
2. В каких случаях её используют?





## 10.5. Лазерная закалка

**Лазерное излучение** распространяется узким пучком с **высокой концентрацией энергии**.

**Энергия света** превращается в **тепловую энергию** и **нагревает поверхность материала до свехкритических температур**.

При закалке **скорость нагрева**  
 $10^6 - 10^7 \text{ }^\circ\text{C/с}$ .

**Продолжительность**  
**нагрева**  $10^{-3} - 10^{-7} \text{ с}$ .

**Скорость охлаждения**  
 $10^3 - 10^5 \text{ }^\circ\text{C/с}$ .

Происходит отвод теплоты в  
глубь металла и самозакалка.

Образуется **мартенсит с**  
**очень высокой твердостью**.

**Лазерная закалка** – очень производительный метод,  
обеспечивающий **очень мелкое зерно** и **высокий уровень**  
**эксплуатационных свойств**.

Повышаются **износостойкость** - в 2-4 раза, **предел выносливости** –  
**на 70-80%** по сравнению с индукционной закалкой.

**К недостаткам** надо отнести **высокую стоимость оборудования** и  
самого процесса из-за **больших затрат энергии**.



**Глубина закаленного**  
**слоя** от 0,1 до 2мм.

**Регулируется глубина**  
**слоя мощностью**  
**лазерного излучения** и  
**временем**  
**взаимодействия**  
**лазерного пучка с**  
**поверхностью детали**.





# ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ.

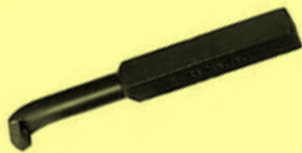
Существенными преимуществами являются:

1. Возможность обработки труднодоступных мест, внутренних поверхностей любой формы.
2. Получения мелкого зерна аустенита при нагреве и высокодисперсного мартенсита при охлаждении.
3. Отсутствие коробления и деформации изделия.
4. Быстрое программное управление процессом.
5. Возможность упрочнения как с оплавлением, так и без оплавления поверхности.

Лазерную закалку с успехом используют для упрочнения стальных и чугунных деталей, а также инструмента.



Гильза цилиндра



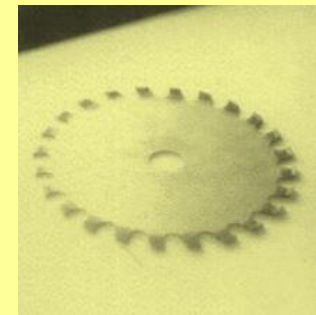
Резец



Фреза



Медицинский инструмент



Дисковая пила



# Вопросы для самоконтроля

1. В чем особенности поверхностной закалки с лазерным нагревом? Её основные параметры?
2. Каковы преимущества лазерной закалки?
3. Приведите примеры использования лазерной закалки?



## 10.6. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

**Химико-термическая обработка (ХТО)** заключается в насыщении поверхности изделия одним или несколькими элементами в сочетании с определённой термической обработкой.

При ХТО **структура и свойства поверхности** детали **обуславливаются** как **изменением химического состава** так и **термической обработкой**.

**Цель ХТО** – получить твердую и износостойкую поверхность при сохранении пластичной и вязкой сердцевины.:

**Процесс ХТО** состоит из **трех стадий**:

1. **Диссоциации.**
2. **Адсорбции.**
3. **Диффузии**

**Диссоциация** – получение элемента в активном атомарном состоянии.



**Адсорбция** - поглощение поверхностью насыщающего элемента и образование химической связи

**Диффузия** – проникновение элемента в глубину металла ( изделия ).

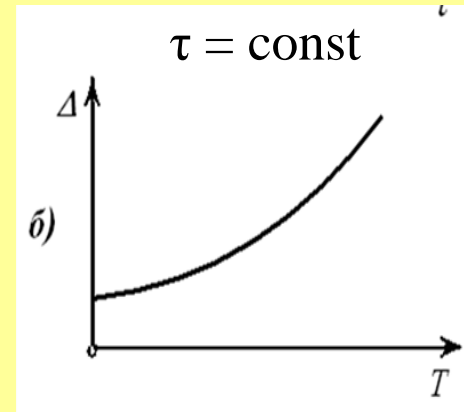
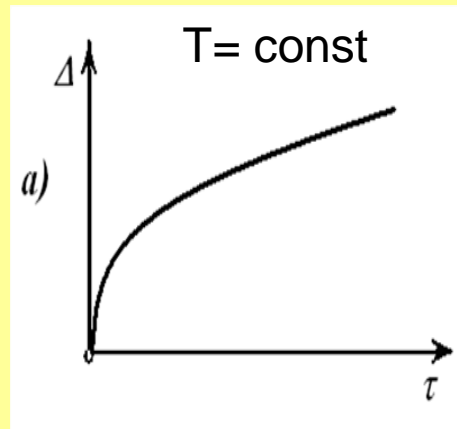
В зависимости от элемента, которым насыщают поверхность, различают такие виды ХТО – цементация, азотирование, нитроцементация, борирование, диффузионная металлизация и др.



# Температура – определяющий фактор ХТО

Величина необходимой глубины диффузионного слоя зависит от температуры и длительности процесса.

**Насыщение**  
поверхностного  
слоя от времени  
зависит не  
очень  
существенно.



**Более  
мощный  
фактор – это  
темпера-  
тура.**

Кривые зависимости глубины  
диффузионного слоя от  
продолжительности (а) и  
температуры выдержки (б)

**Глубина диффузионного слоя при прочих равных условиях тем больше,  
чем выше концентрация легирующего элемента.**



# Вопросы для самоконтроля

1. В чём суть и цель химико-термической обработки?
2. Какие физико-химические процессы происходят при ХТО?
3. Какие существуют виды ХТО?
4. От чего зависит глубина диффузионного слоя при ХТО?



## 6. Ш

Цементации

Наиболее ра

**Атомарный углерод**,  
необходимый для  
цементации,  
образуется при  
разложении  
**углеводородов**,  
содержащихся в  
метане.

На цементаци

Места, не под  
омеднением или



## АЛИ

поверхности

цементация в среде

**Такая температура**  
обеспечивает  
**образование**  
**аустенита** и  
интенсивность  
**диффузионных**  
**процессов.**

Более **высокая**  
**температура** приводит  
к **росту зерна.**

**химической обработки**  
100мкм.

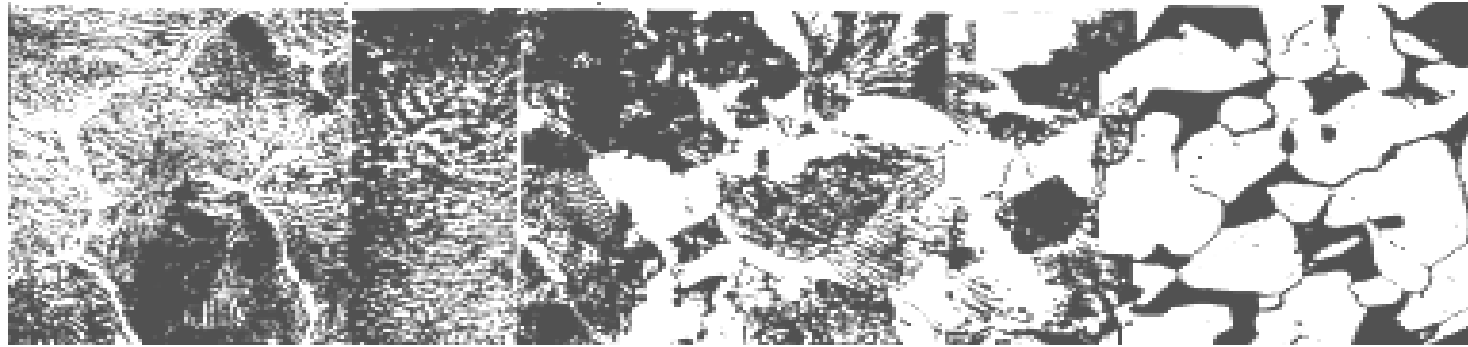
а.



# Структура цементованного слоя

Для цементации используют низкоуглеродистые (0,15-0,30%С) нелегированные и легированные стали марок: 15, 20, 25, 20Х, 20ХН, 18ХГТ, 20ХНМ, 20ХГР, 12ХНЗА, 20Х2Н4А.

Для деталей ответственного назначения используют стали с 0,25-0,3%С: 25ХГМ, 30ХГТ, 30ХГН



0,9-1% С

П + Ц

0,8%С

П

С>0,8%

П + Ф

0,15-0,3%С

Ф + П

Заэвтектоидная  
область

Эвтектоидная  
область

Доэвтектоидная  
область

Сердцевина

Глубина цементации оценивается по эффективной толщине цементованного слоя  $h$  – это суммарная глубина заэвтектоидной, эвтектоидной и части доэвтектоидной области, где количество перлита ~ 40%.



# 7. ТЕРМООБРАБОТКА ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ

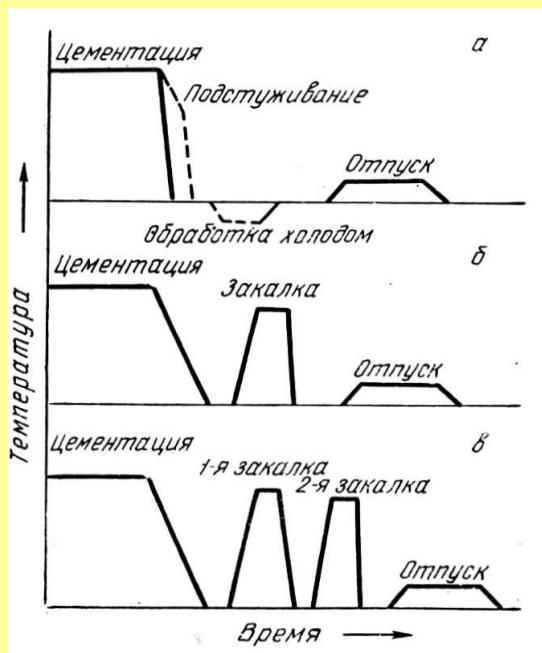
Цементация только обеспечивает благоприятное распределение углерода от поверхности к сердцевине изделия

Для получения необходимого комплекса свойств после цементации проводят закалку и низкий отпуск при температуре 160-180°С.

Существуют различные режимы термической обработки после цементации.

## Режим (а):

- непосредственно из цементационной печи после подстуживания для уменьшения термических напряжений.



## Режим (б):

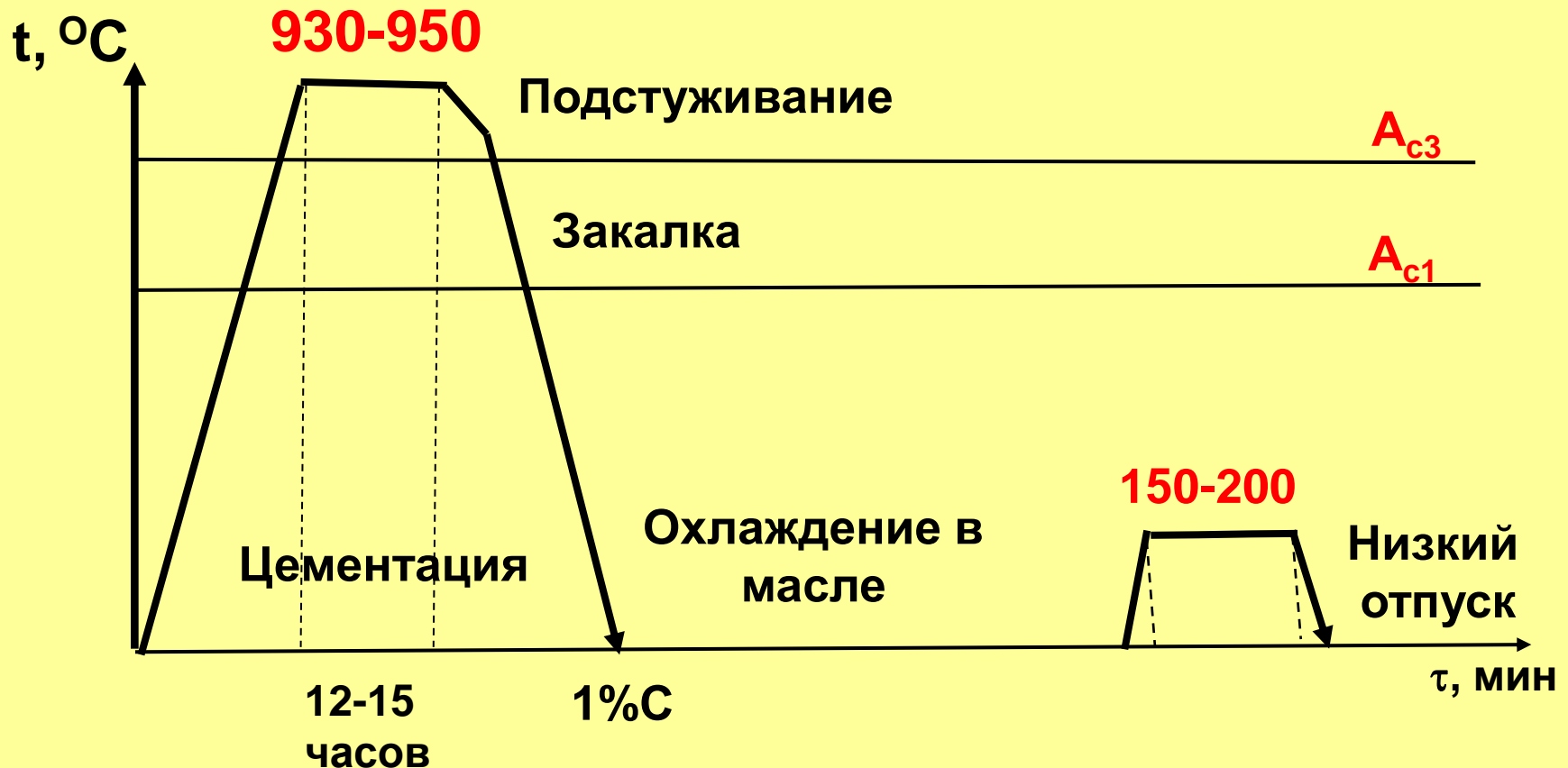
с цементационного нагрева проводится охлаждение до комнатной температуры, а затем нагрев под закалку до температуры выше  $A_{C1}$ , что приводит к измельчению зерна цементованного слоя.

**Режим(в):** первая закалка от температуры выше  $A_3$  для исправления структуры сердцевины, вторую — от температуры выше  $A_1$  для получения необходимых свойств поверхностного слоя.





# Режим термической обработки для наследственно мелкозернистых сталей.

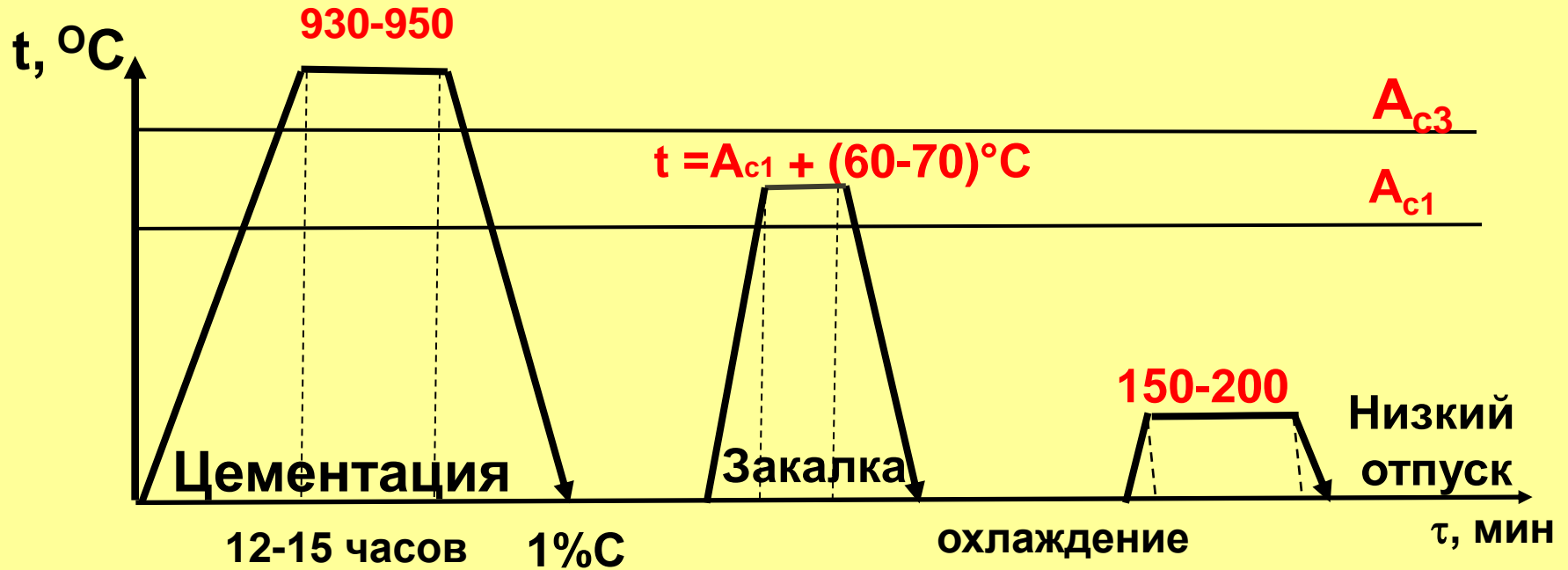


**Легирование Ti, Mo, V задерживает рост зерна.** При цементационном нагреве зерно не растёт.

**Структура на поверхности** – мартенсит отпуска и карбиды, **в сердцевине** – у легированных сталей - низкоуглеродистый мартенсит или бейнит, у углеродистых - сорбит.



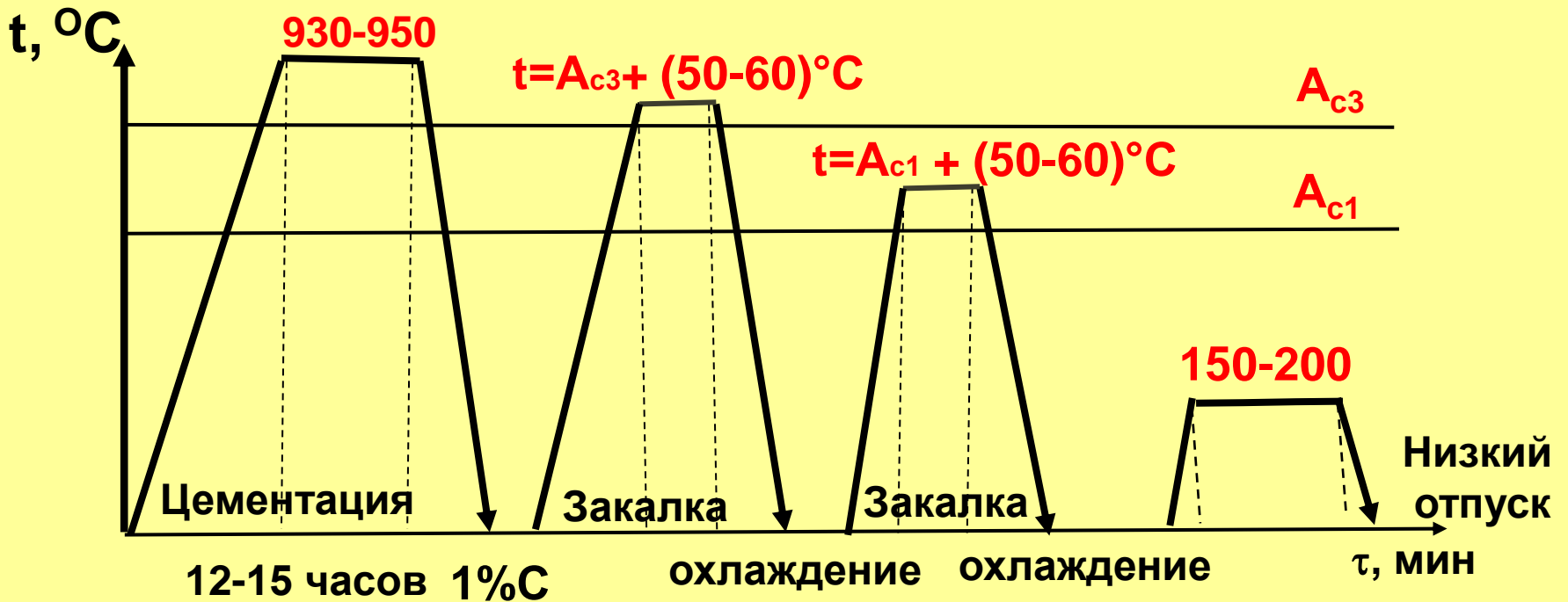
# Режим термической обработки для измельчения зерна в цементованном слое.



**Структура на поверхности** – мартенсит отпуска, карбиды и небольшое количество феррита, что незначительно влияет на свойства. **В сердцевине** – низкоуглеродистый мартенсит или структуры перлитного семейства.



**Режим термической обработки для тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях трения при значительных динамических нагрузках.**



**Проводят двойную закалку:** первую от температуры выше  $A_{c3}$  для исправления структуры сердцевины (доэвтектоидная сталь), вторую – от температуры выше  $A_{c1}$  для исправления структуры в поверхностном слое (заэвтектоидная сталь).

**Низкий отпуск после закалки необходим для сохранения твердости и уменьшения закалочных напряжений.**



# Вопросы для самоконтроля

1. В чем суть и как осуществляется газовая цементация?
2. Каковы основные параметры цементации и отчего они зависят?
3. Из каких соображений назначают глубину цементованного слоя? Как её определяют?
4. Какие стали используют для цементации? Обосновать ответ.
5. Какой термической обработке подвергают изделия после цементации? Обосновать назначение разных режимов.
6. Какие свойства имеют изделия после окончательной термической обработки?



# Вопросы для самостоятельной работы

- ✘ 1. Объемная поверхностная закалка.
  - ✘ 2. Стали с регламентированной прокаливаемостью.
  - ✘ 3. Цементация в твёрдом карбюризаторе.
-

# Литература

- ✘ 1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А. Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.-464 с. (стр.218 –235).
- ✘ 2. Гладкий И.П. Технология конструкционных материалов и материаловедение : учебное пособие / И.П. Гладкий, В.И. Мощенок, В.П. Тарабанова, Н.А. Лалазарова, Д.Б. Глушкова.- Харьков: ХНАДУ, 2011.-460 с.( стр.349-353).





## Кафедра технології металів и матеріалознавства

Доц. Дощечкина Ирина Васильевна

**E-mail: [div\\_khadi@ukr.net](mailto:div_khadi@ukr.net)**

**Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ**

