



Материаловедение и обработка материалов

Лекция 7

ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

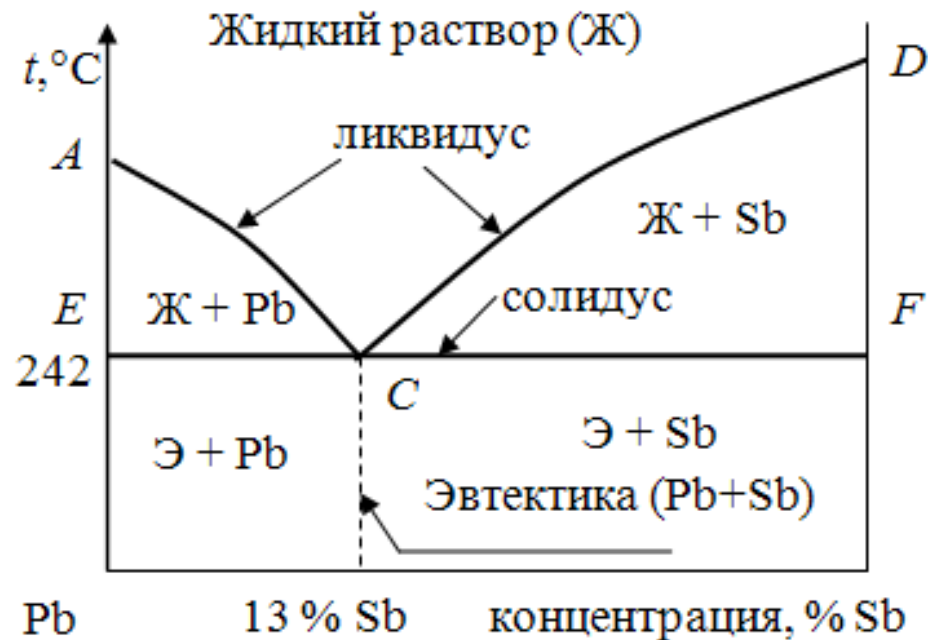
Lec_1MA_MiOM_LNA_26_04_2016

Доцент Лалазарова Н.А.

7.1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Термическая обработка дает упрочняющий эффект только в том случае, когда в сплаве в твердом состоянии происходят структурные превращения. Такие сведения можно получить из диаграмм состояния.

На рис. изображена диаграмма состояния для механической смеси.

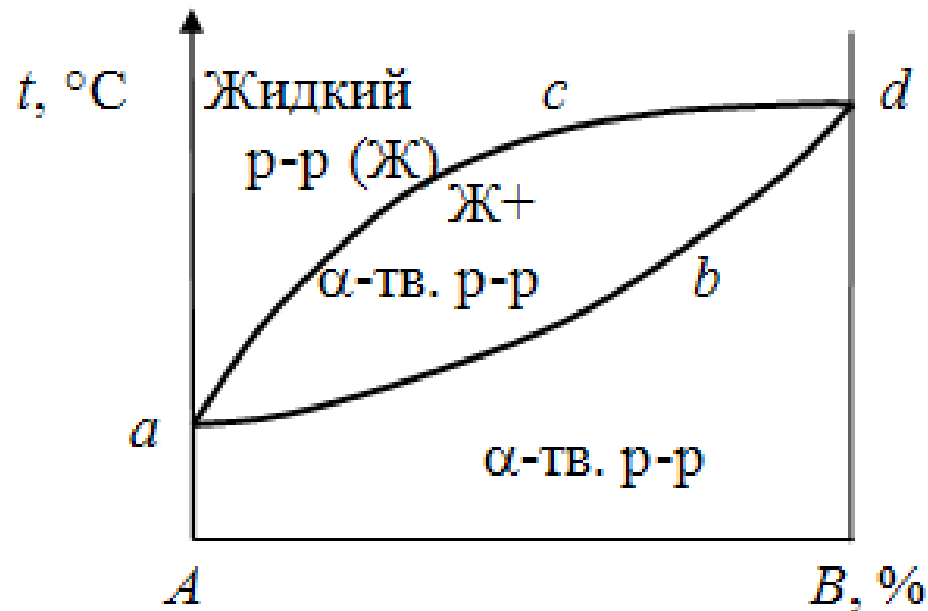


Ниже линии солидуса (горизонтали) никакие структурные превращения не происходят.

Поэтому сплав такого типа не подвергается упрочняющей термической обработке.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

На рис. представлена диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют неограниченные твёрдые растворы.



На линии ликвидуса acd начинается образование α -твёрдого раствора.

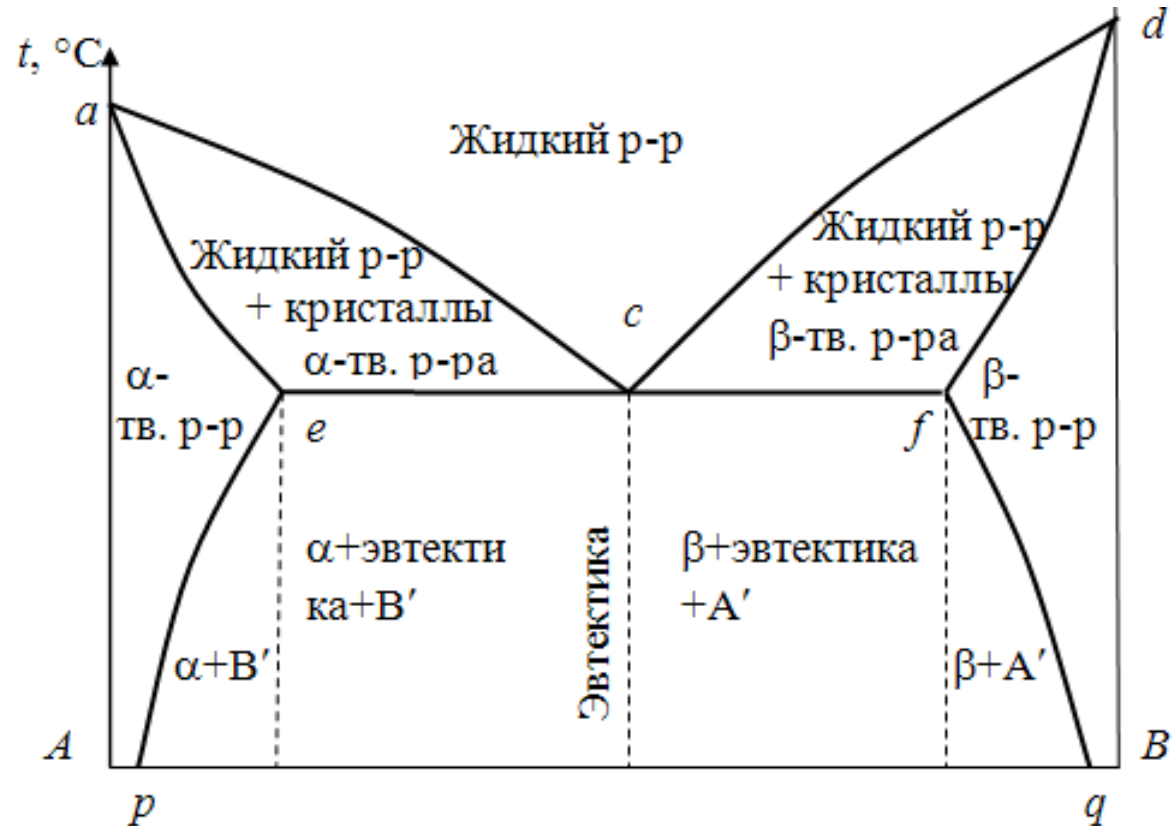
На линии солидуса abc заканчивается образование α -твёрдого раствора.

Ниже линии солидуса больше никаких превращений не происходит.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

На рис. представлена диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют ограниченные твёрдые растворы.

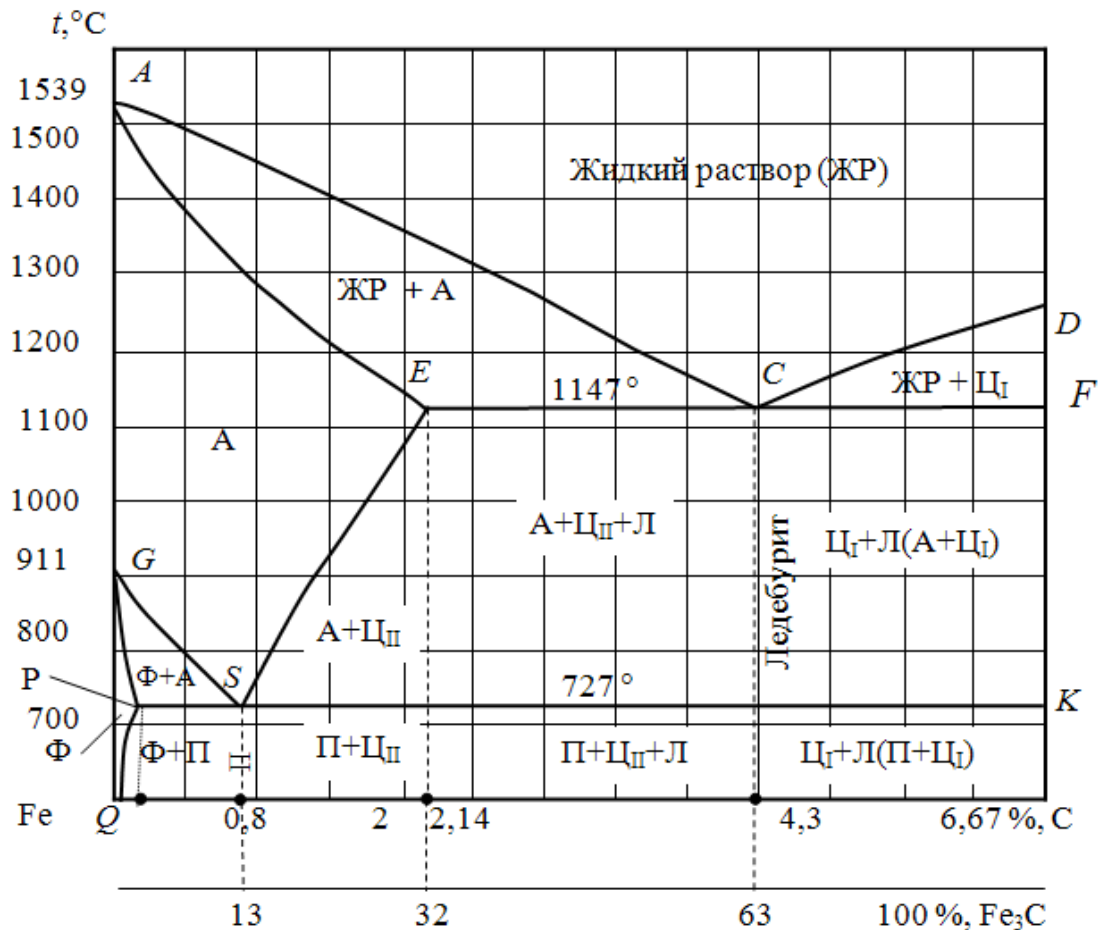
Ниже линии солидуса присутствуют линии ограниченной растворимости.



Такой сплав подвергается упрочняющей термической обработке при определенном соотношении компонентов A и B.

ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Если посмотреть на диаграмму Fe–Fe₃C, то можно однозначно сказать, что для железоуглеродистых сплавов возможно проведение упрочняющей термической обработки, так как в твёрдом состоянии происходят фазовые превращения.

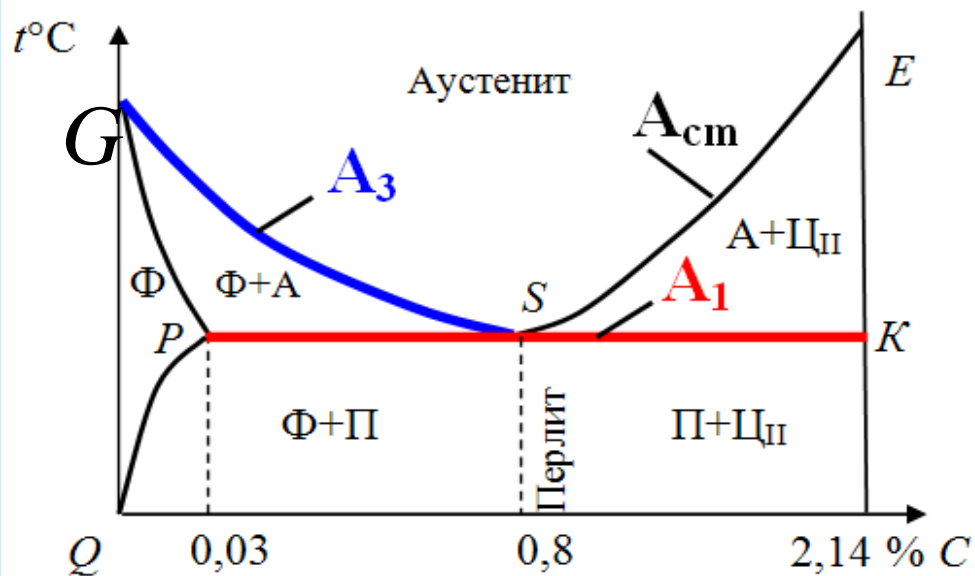


7.2. КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ

Термическая обработка сплава заключается в нагреве выше или ниже критических температур, выдержке при этих температурах и последующем охлаждении с разной скоростью для получения требуемых свойств. Для грамотного выполнения ТО необходимо знать критические точки – температуры, при которых происходят фазовые превращения.

В стали различают критические точки A_1 , A_3 .

При нагреве :
 A_{c1} - линия PSK (727°C) - при нагреве начинается образование аустенита.



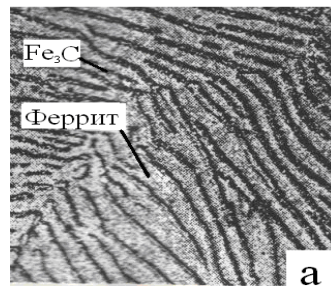
A_{c3} - линия GSE – при нагреве заканчивается образование аустенита, для заэвтектоидной стали A_{c3} обозначается A_{cm} .

При охлаждении критические точки обозначаются A_{r1} , A_{r3} .
 A_2 – температура, при которой происходит изменение магнитного состояния, т. Кюри – 768 °С.

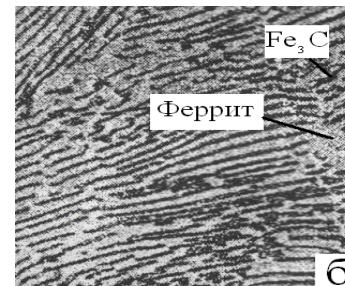
СТРУКТУРЫ ПЕРЛИТНОГО СЕМЕЙСТВА, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ПРИ РАСПАДЕ АУСТЕНИТА

При распаде аустенита образуются структуры перлитного семейства, имеющие пластинчатое строение и отличающиеся дисперсностью (толщиной цементитных пластин и расстоянием между ними).

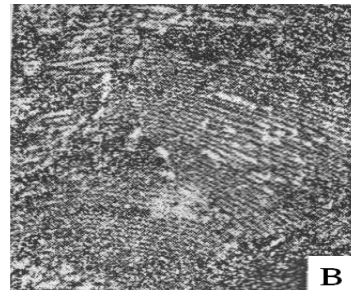
Самой грубой структурой является **перлит**, более дисперсной – **сорбит** и еще более дисперсной – **тростит**.



перлит



сорбит



троостит

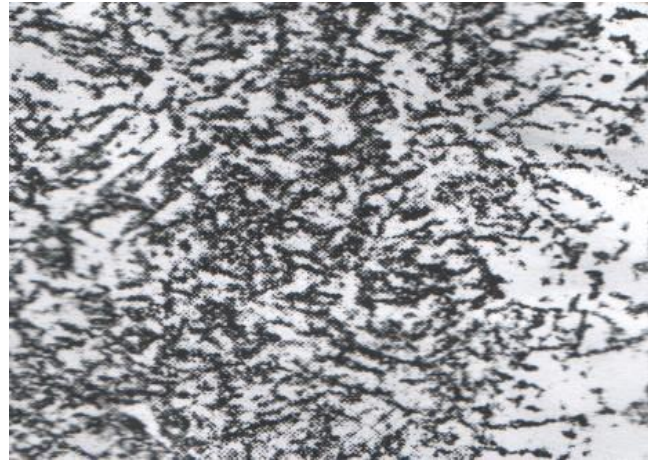
С увеличением степени дисперсности структуры твердость и прочность возрастают, а пластичность и ударная вязкость уменьшаются.

При перлитном превращении происходит перераспределение углерода: образуются пластинки феррита, содержащие 0,006% углерода, и пластинки цементита, содержащие 6,67% углерода.

ОСОБЕННОСТИ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

При переохлаждении аустенита до температуры ниже начала мартенситного превращения M_n происходит **мартенситное превращение**.

Мартенсит – это пересыщенный твёрдый раствор углерода в Fe_α , который имеет игольчатое строение.



(ГЦК → ОЦК)

$A^{0,8} \rightarrow M^{0,8}$

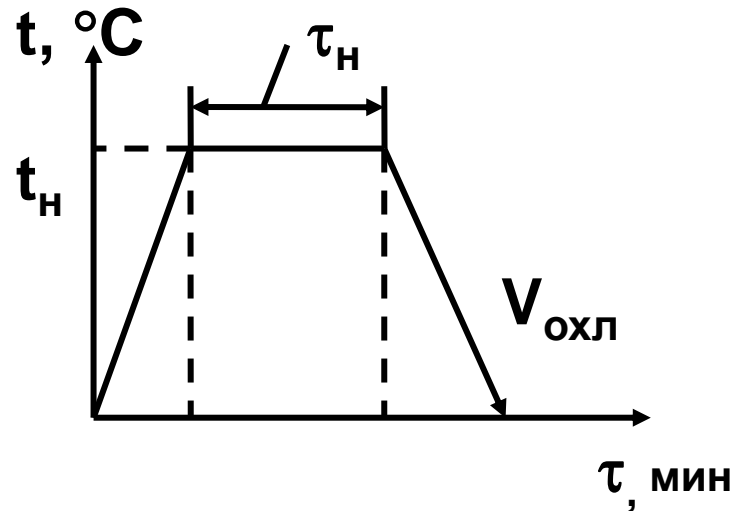
Мартенсит образуется при охлаждении **со скоростью выше критической**. **Критическая скорость** - это минимальная скорость, при которой образуется мартенсит.

Мартенсит имеет высокую твёрдость, низкую пластичность, высокий уровень внутренних напряжений.

7.3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Термическая обработка заключается в нагреве стали до определённой температуры (t_n), выдержке при этой температуре (τ_n , мин) и охлаждении с определённой скоростью ($V_{\text{охл}}$).

Основные факторы термической обработки – температура, время, скорость охлаждения.



Основными видами термической обработки являются:

- отжиг;
- нормализация;
- закалка;
- отпуск.

Отжиг, нормализация, закалка – нагрев выше A_{c1} или A_{c3} – происходят фазовые превращения, отпуск – нагрев ниже A_{c1} .

ОТЖИГ И НОРМАЛИЗАЦИЯ

Отжиг и нормализация заключаются в нагреве до температур, как правило, выше критических A_{c1} , или A_{c3} , выдержке при этих температурах и медленном охлаждении с печью при отжиге и на воздухе при нормализации.

Цель отжига и нормализации:

1) снять внутренние напряжения после предварительной обработки (штамповка, литье);

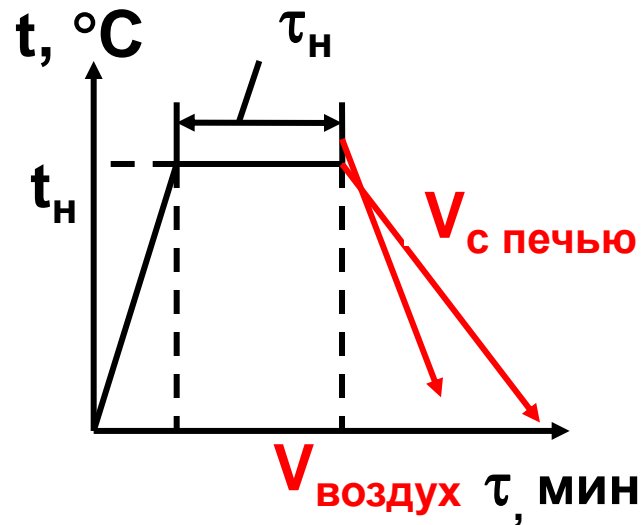


Схема отжига и нормализации

2) улучшить обрабатываемость резанием;

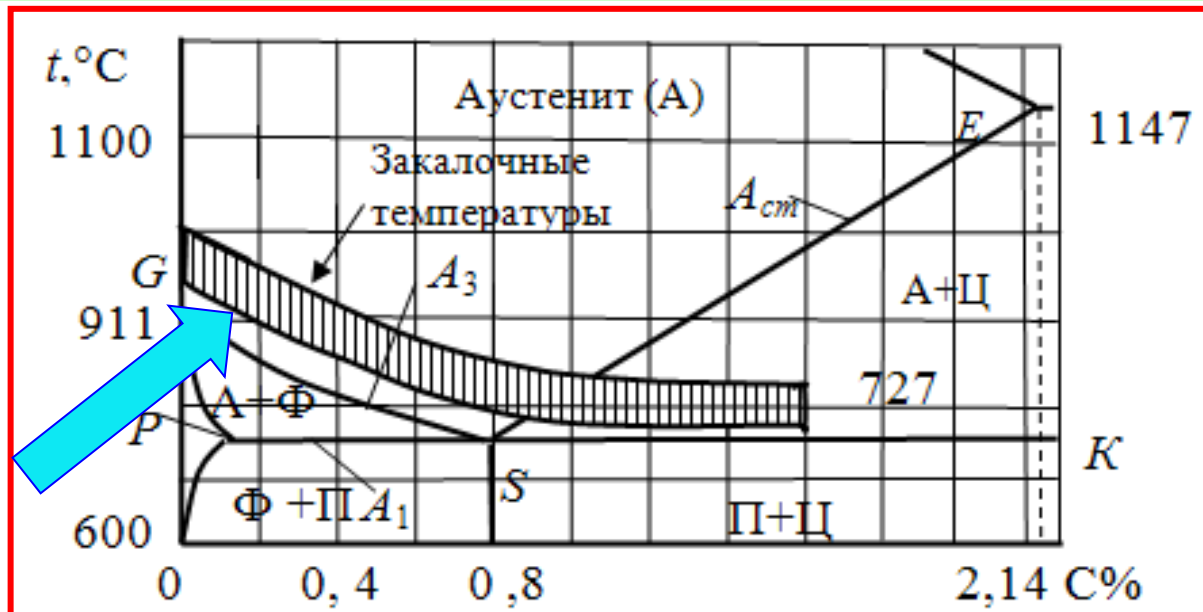
3) исправить структуру после предварительной обработки (например, после перегрева).

Отжиг и нормализация – это предварительная термическая обработка. Свойства стали после отжига и нормализации примерно одинаковы, поэтому предпочтение следует отдать последней, как более экономичной.

ЗАКАЛКА СТАЛИ

Закалка – это термическая обработка, которая заключается в нагреве до температур выше критических (A_{c1} , или A_{c3} ($A_{ст}$)), выдержке и охлаждении со скоростью больше или равной критической $V_{охл} \geq V_{кр}$.

Это упрочняющая термическая обработка, которая проводится для повышения твердости и прочности.



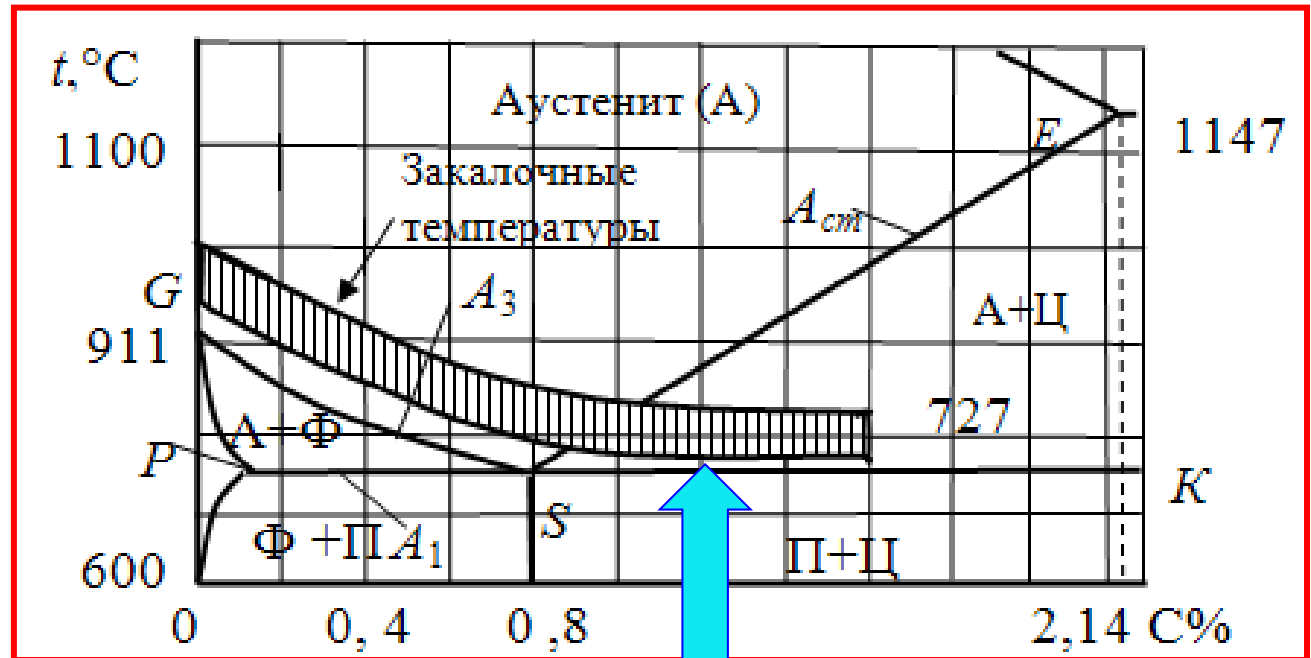
Температура нагрева

Доэвтектоидные стали нагревают под закалку до $t = A_{c3} + (50 \dots 60^\circ\text{C})$. В этом случае сталь приобретает аустенитную структуру. При охлаждении **аустенит превращается в мартенсит**.

ЗАКАЛКА СТАЛИ

Заэвтектоидные стали нагревают до $t=A_{c1}+(50...60^{\circ}\text{C})$.
Формируется структура аустенита и цементита вторичного.

После охлаждения структура состоит из мартенсита и цементита, обладающих высокой твердостью.



Легированные стали охлаждают **в масле**, а **углеродистые** - **в воде**.
При охлаждении в воде возникают большие внутренние напряжения, приводящие к короблению изделия и появлению трещин.

ОТПУСК СТАЛИ

Отпуск – это термическая обработка, которая заключается в нагреве стали до температуры ниже критической точки A_{c1} , выдержке и охлаждении, как правило, на воздухе (иногда в масле).

Цель отпуска:

- Снять частично или полностью внутренние напряжения, возникшие при закалке;



- Получить необходимую структуру для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств.

В зависимости от свойств, которые необходимо получить, различают **три вида отпуска:**

1) низкий; 2) средний; 3) высокий.

НИЗКИЙ ОТПУСК

Низкий отпуск проводится при температуре 150-250°C.

При этом на 1/3 снимаются внутренние напряжения, твёрдость остаётся высокой.



Мартенсит закалки превращается в мартенсит отпуска

$M_3 \rightarrow M_0$

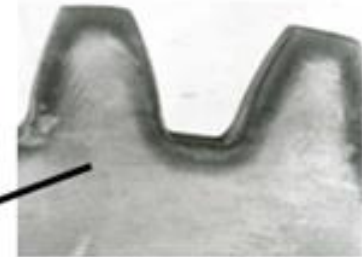
Проводится для инструментов, подшипников, деталей после поверхностной закалки и ХТО (цементации).



Детали после ТВЧ



Детали после химико-термической обработки

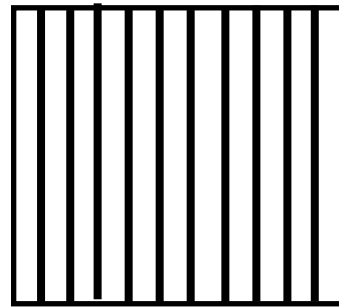
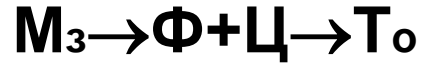


СРЕДНИЙ ОТПУСК СТАЛИ

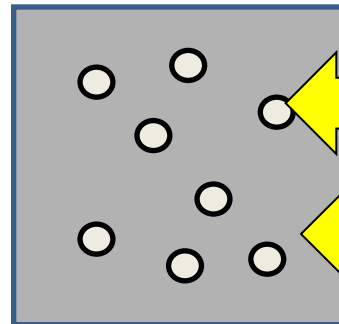
Средний отпуск проводят при температуре 300-450°C главным образом для пружин и рессор.

Средний отпуск обеспечивает высокие пределы выносливости, так как в процессе отпуска мартенсит распадается на дисперсную феррито-цементитную смесь, называемую **трооститом отпуска T_0** , в котором цементитные включения имеют зернистую форму.

При этом на 2/3 снимаются внутренние напряжения. Проводится для пружин и рессор.



Троостит – Т
(пластинчатая структура)

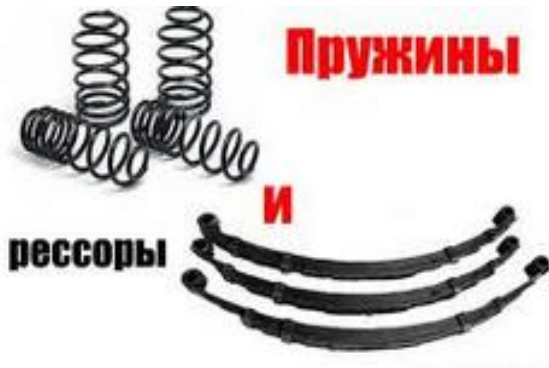


Карбиды

Феррит

Троостит отпуска – T_0

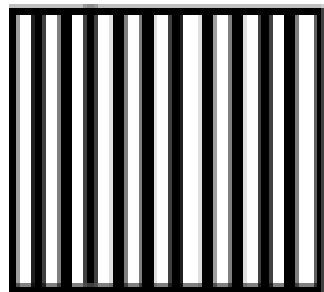
(Зернистая структура)



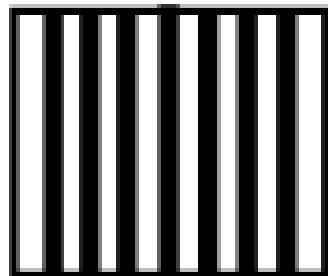
**Пластинчатые
структуры
образуются при
распаде аустенита**



тростит

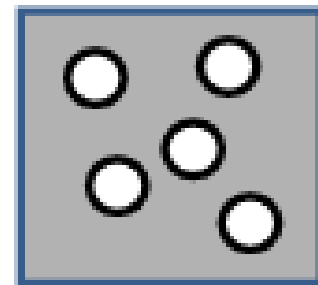
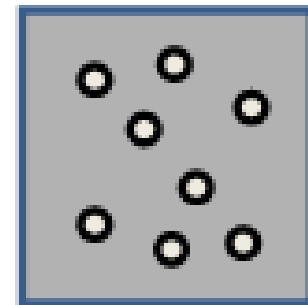


сорбит



Пластинчатая структура

**Зернистые структуры
образуются при
распаде мартенсита
при отпуске**

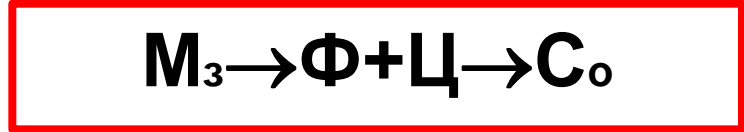


Зернистая структура

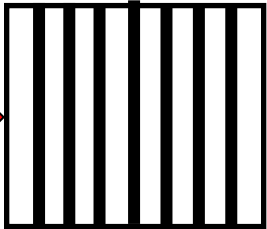
ВЫСОКИЙ ОТПУСК

Высокий отпуск проводят в интервале температур 500–680 °С. При этом происходит распад мартенсита на феррито-цементитную смесь и процесс укрупнения карбидных (цементитных) частиц сферической формы.

При этом полностью снимаются внутренние напряжения.

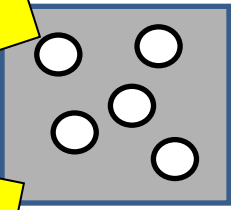


Сорбит – С имеет пластинчатое строение



Карбиды

Сорбит отпуска – С₀ имеет зернистое строение



Феррит



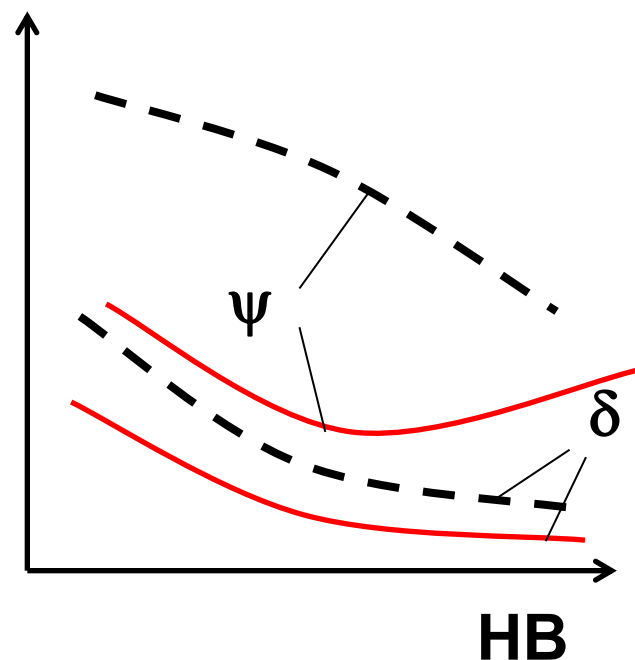
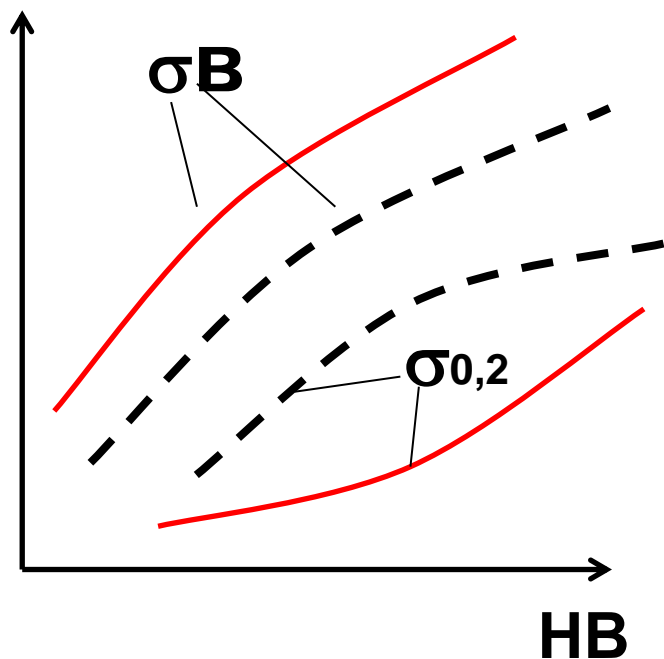
Повышаются пластичность и ударная вязкость, сохраняется на достаточно высоком уровне условный предел текучести.



ВЫСОКИЙ ОТПУСК

Закалка с высоким отпуском называется *улучшением*. Улучшение проводят для деталей, которые работают в условиях ударных нагрузок: валы, шатуны, шестерни.

$$\sigma_{0,2} \uparrow \text{КС} \uparrow \psi \uparrow$$



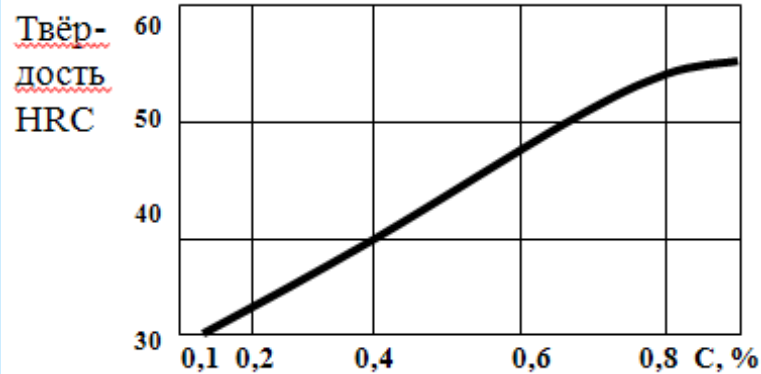
Зернистые структуры позволяют получить наилучшее сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости.

7.4. ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛИ

Закаливаемость – это способность стали повышать твердость при закалке.

После закалки образуется структура **мартенсит**.

Твердость мартенсита зависит от содержания углерода.



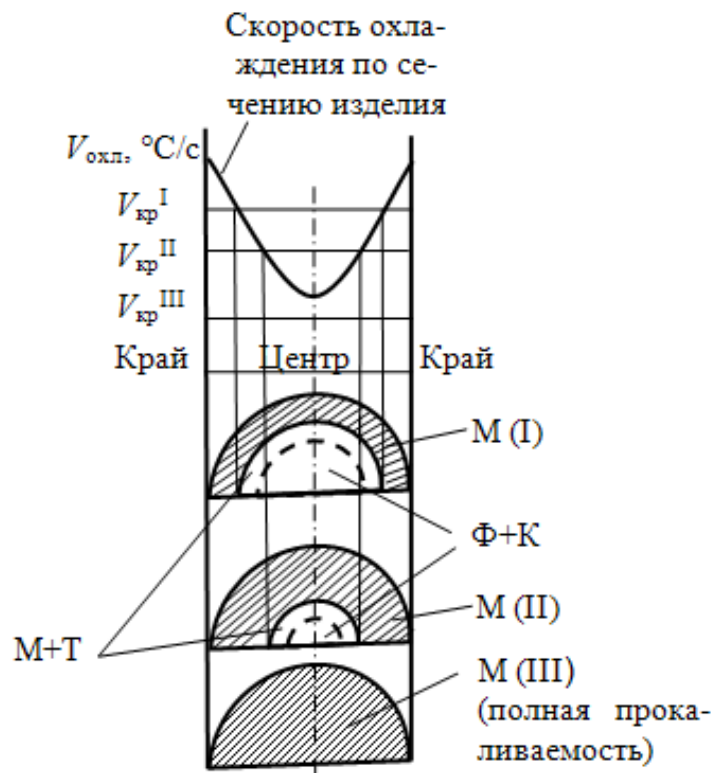
Чем больше мартенсит пересыщен углеродом, тем выше его твердость. Таким образом **закаливаемость зависит от содержания углерода**.

Легирующие элементы на закаливаемость практически не влияют.

7.5. ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛИ

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

В процессе заковки максимальная скорость охлаждения достигается на поверхности детали.



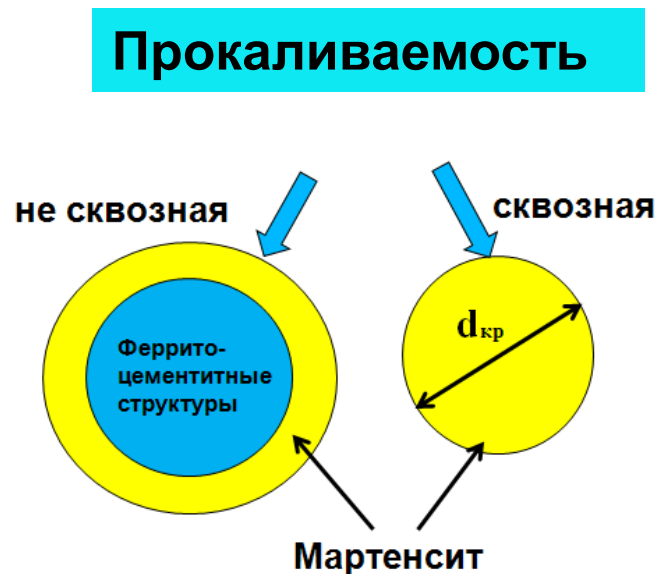
По мере удаления от поверхности скорость охлаждения уменьшается.

Прокаливаемость определяется **критической скоростью охлаждения $V_{\text{кр}}$** , зависящей от состава стали и охлаждающей среды.

ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛИ

Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия меньше критической скорости, то **прокаливаемость будет несквозной.**

Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия равна или больше критической $V_{кр}$, то **прокаливаемость сквозная.**



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

Критический диаметр зависит от наличия легирующих элементов. Для стали 40 $d_{кр}=12$ мм.

7.6. ДЕФЕКТЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

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:

– $V_{\text{охл}}$ при закалке была меньше $V_{\text{охл. критич.}}$ (углеродистую сталь охладили в масле, а не в воде);

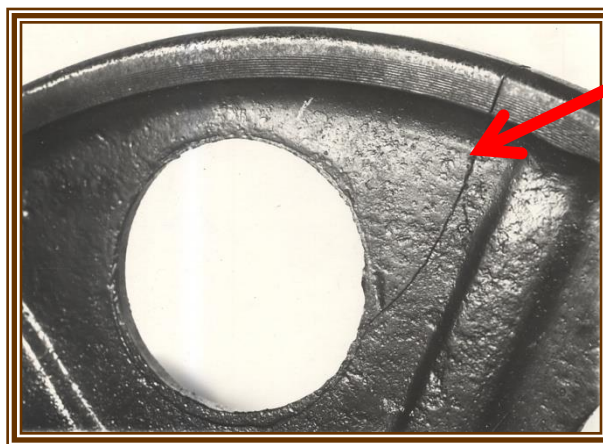
- температура нагрева под закалку ниже необходимой температуры,
- завышенная температура отпуска.

Этот вид брака можно исправить, проводя повторную термообработку по правильному режиму.

ДЕФЕКТЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

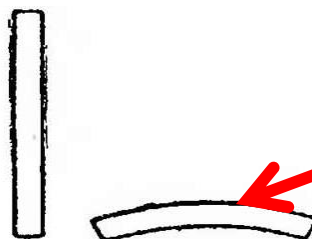
Завышенная твердость, как правило, связана с тем, что температура отпуска была ниже требуемой. Этот вид брака можно исправить повторным отпуском.

- Коробление представляет собой несимметричную деформацию деталей (деталь нагревают и на прессе прикладывают усилие).



Трещина

- Трещины представляют собой неисправимый вид брака.



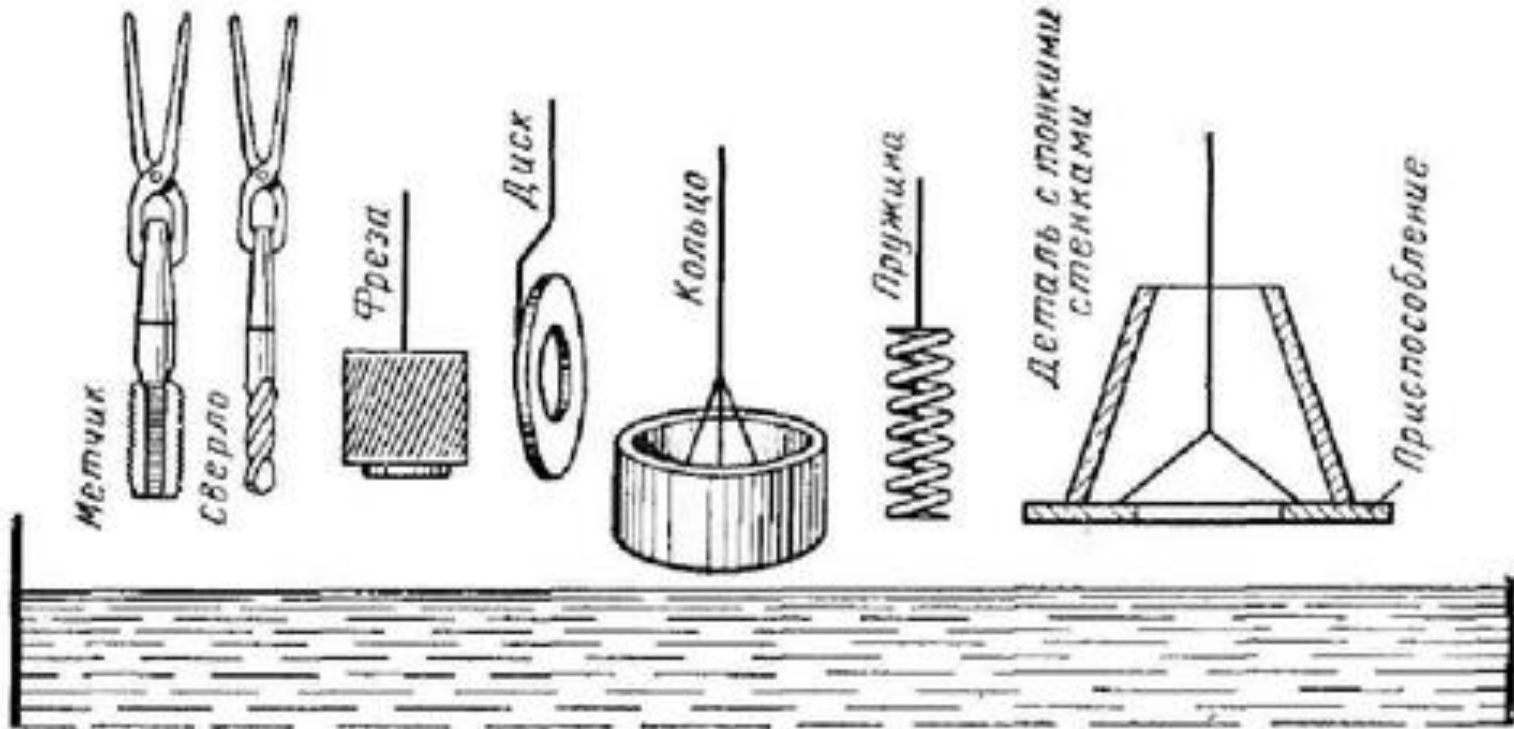
Коробление

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

ДЕФЕКТЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

Чтобы не допустить коробления и трещин, необходимо:

- применять специальные виды закалки;

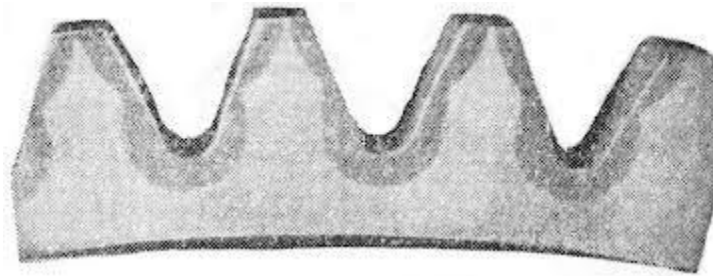


- после механической обработки перед закалкой проводить отжиг для снятия напряжений;
- длинные изделия нагревать и охлаждать в вертикальном положении и другие способы.

7.7. МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1 - методы поверхностной термической обработки без изменения химического состава материала;

2 - методы термической обработки с изменением химического состава поверхностных слоев.



К первой группе относятся различные способы поверхностной закалки, ко второй - методы химико-термической обработки (ХТО).

Поверхностному упрочнению подвергают детали, поверхностные слои которых при эксплуатации интенсивно изнашиваются, а внутренние слои должны сопротивляться циклическим и значительным динамическим нагрузкам, поэтому сердцевина детали должна быть вязкой и достаточно пластичной, а поверхность - твердой и износостойкой.

Методы поверхностного упрочнения

```
graph TD; A[Методы поверхностного упрочнения] --> B[Поверхностная закалка]; A --> C[Химико-термическая обработка]; C --> D[Цементация]; C --> E[Азотирование]; C --> F[Нитроцементация]; C --> G[Диффузионное насыщение деталей металлами];
```

The diagram is a hierarchical flowchart. At the top is a box labeled 'Методы поверхностного упрочнения'. Two red arrows point down from this box to 'Поверхностная закалка' and 'Химико-термическая обработка'. From 'Химико-термическая обработка', four red arrows point down to 'Цементация', 'Азотирование', 'Нитроцементация', and 'Диффузионное насыщение деталей металлами'. The boxes are yellow with black borders, and the text is in various colors: blue for the top title, red for the middle-level titles, and black for the bottom-level titles.

Поверхностная
закалка

Химико-термическая
обработка

Цементация

Азотирование

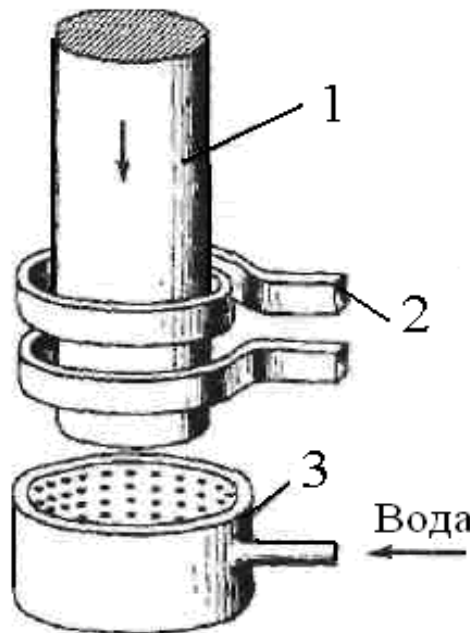
Нитроцементация

Диффузионное насыщение
деталей металлами

7.8. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА

Поверхностную закалку осуществляют двумя методами: с газопламенным и индукционным нагревом.

1) Индукционная закалка выполняется за счет нагрева поверхности изделия токами высокой частоты – закалка ТВЧ.



1 – деталь, 2 – индуктор, 3 – душевое устройство

Глубина проникновения тока и, соответственно, глубина закалки δ зависит от частоты тока (f):

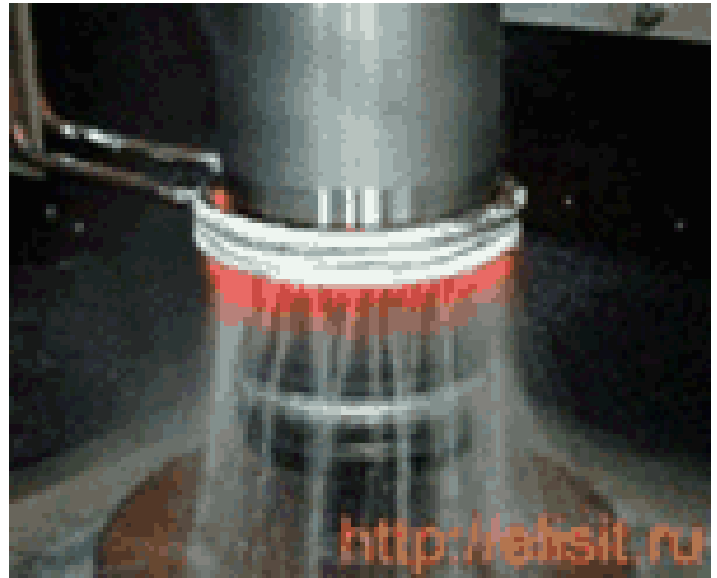
$$\delta = \frac{a}{\sqrt{f}}$$

a – зависит от химического состава стали,

Нагретые участки охлаждают водой из душевого устройства – спрейера. После поверхностной закалки следует низкий отпуск для частичного снятия напряжений без заметного снижения твердости.



Закалка ТВЧ зубчатого колеса



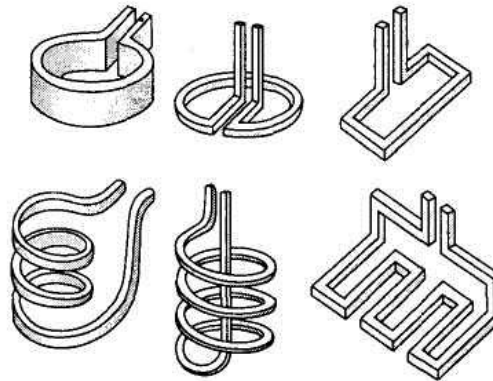
<http://metisit.ru>

ПОВЕРХНОСТНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ЗАКАЛКА

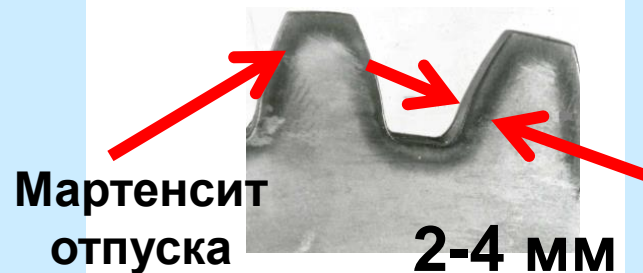
Закалка ТВЧ применяется для среднеуглеродистых сталей с содержанием углерода в основном 0,4...0,45 %. Пример таких сталей: 40, 45, 40Х, 40ХН и др.

Преимущества закалки ТВЧ:

- 1) Высокая производительность
- 2) Возможность автоматизации.
- 3) Мелкое зерно.
- 4) Отсутствие коробления.
- 5) Сжимающие напряжения.
- 6) Экологическая чистота.



Индукторы



Недостатки:

- 1) Для каждой детали необходим индуктор определённой формы.
- 2) Невозможность обработки локальных участков в труднодоступных местах и на плоскости.

7.9. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. ЦЕМЕНТАЦИЯ

Химико-термическая обработка (ХТО) заключается в насыщении поверхности изделия определенным элементом в сочетании с термической обработкой.

Цементация заключается в насыщении поверхности изделия углеродом. Цементации подвергаются стали, содержащие $C \leq 0,3\%$ - 20, 18ХГТ, 20Х, 20ХГМ.

Слой, насыщенный углеродом, 1% С



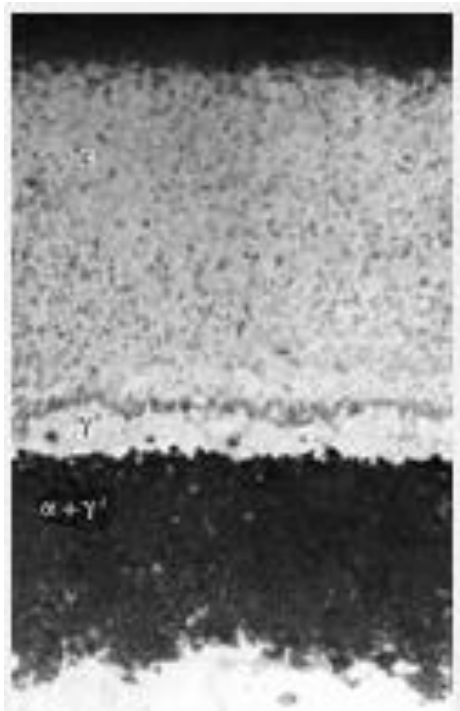
При **газовой цементации** атомарный углерод, образуется при разложении углеводородов и окиси углерода, содержащихся в цементуемых газах.

Газовая цементация деталей производится при температуре $910\text{—}930^\circ\text{C}$ (выше A_{c3} , так как хорошо насыщается углеродом только **аустенит**). Скорость процесса в газовой среде – 0,15 мм/час. Слой глубиной $\approx 1,2 - 1,5$ мм образуется за 12-15 часов. Для получения необходимого комплекса свойств после цементации проводят **закалку и низкий отпуск**. Структура – **мартенсит отпуска**.

7.10. АЗОТИРОВАНИЕ

Азотирование – насыщение поверхностного слоя изделия азотом в атомарном состоянии, который получается при разложении аммиака NH_3 .

Детали: гильзы цилиндров, длинные шаблоны, которые в процессе азотирования практически не деформируются, другие измерительные инструменты.



Режимы азотирования:

1. Температура нагрева – $500-520^{\circ}\text{C}$, глубина слоя – $0,2-0,5$ мм.
2. Время азотирования – $0,01$ мм слоя образуется примерно за 1 час.

Высокая твёрдость азотированного слоя (до 1200HV) обусловлена, в основном, двумя факторами:

- получением азотистого феррита,
- образованием твёрдых нитридов (например, AlN).

АЗОТИРОВАНИЕ

Преимущества:

- 1) низкая температура, поэтому нет коробления,
- 2) высокая износостойкость (за счёт образования нитридов),
- 3) повышается коррозионная стойкость,
- 4) повышается предел выносливости,
- 5) твёрдость сохраняется до 550°C (гильзы цилиндров).

Недостатки:

- 1) длительность процесса.
- 2) меньшая толщина слоя, чем при цементации, ограничивает контактные нагрузки на поверхность детали.



Азотирование является окончательной обработкой.

Азотируют стали: 38ХМЮА, 38Х2МЮА (0,38%С, 2%Сr, 1%Мо, 1%Аl).

Эти стали называют нитролои, т.е. стали которые содержат хром, алюминий, молибден – элементы, образующие твёрдые нитриды - CrN, MoN, ***AlN – самый твёрдый.***

НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ

Нитроцементация – процесс одновременного насыщения поверхности азотом и углеродом ведётся в смеси газов CH_4 и NH_3 . Температура процесса – $840-860^\circ\text{C}$, глубина слоя – $0,8-1,0$ мм.

Режимы
нитроцементации:

1. Температура нагрева – $840-860^\circ\text{C}$, глубина слоя – $0,8-1,0$ мм.



Термическая
обработка:

1. Закалка
2. Низкий отпуск.

Структура:

1. мелкокристаллический мартенсит,
2. дисперсные карбонитриды.

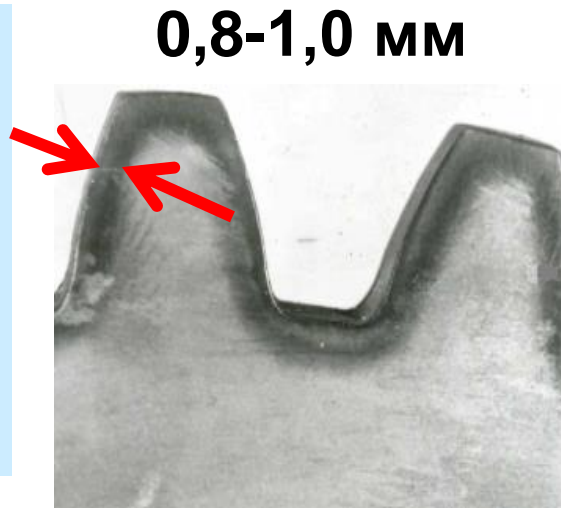
Стали: 20, 20Х, 18ХГТ, 20ХГМ, 20ХГТ, 20ХГНР, 20Х2НЗА, 30ХГТ. 90% деталей на ВАЗе подвергаются нитроцементации.

НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ

Преимущества:

1) температура ниже, чем при цементации, меньше коробление, закалку можно делать сразу после нитроцементации,

2) меньше рост зерна,
3) более высокая твёрдость и износостойкость (образуются карбонитриды).



4) безопасность процесса (отсутствуют ядовитые цианистые соли);
5) возможность регулирования процесса ;

6) дешевизна процесса (стоимость цементующего газа и аммиака ниже стоимости цианистых солей).

Стали: 20, 20Х, 18ХГТ, 20ХГМ, 20ХГТ, 20ХГНР, 20Х2Н3А, 30ХГТ.
90% деталей на ВАЗе подвергаются нитроцементации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для каких сплавов возможно проведение упрочняющей термической обработки?

2. Какие температуры называются критическими?

3. Что такое отжиг и нормализация?

4. Что такое закалка и с какой целью она проводится?

5. Что такое отпуск и какие виды отпуска Вы знаете?

6. Что такое мартенсит и какие свойства он имеет?

7. Что такое закалка ТВЧ и с какой целью она проводится?

8. Что такое цементация и азотирование?

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Изучить диффузионное насыщение металлами и с какой целью оно проводится.

2. Изучить процесс цианирования.

3. Сравнить различные виды поверхностного упрочнения сталей.



**При подготовке презентации были использованы
иллюстрации из курса лекций МАДИ.**

Кафедра технологий металлов и материаловедения

**г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М
Tel.(8-057)707-37-92**

