

# Термическая обработка

Термообработка – совокупность операций нагрева, изотермической выдержки и охлаждения с определенной скоростью твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры.

**по цели:**

**разупрочняюща  
я**

**стабилизирующа  
я**

**упрочняющ  
ая**

# Сравнительный анализ видов термообработки

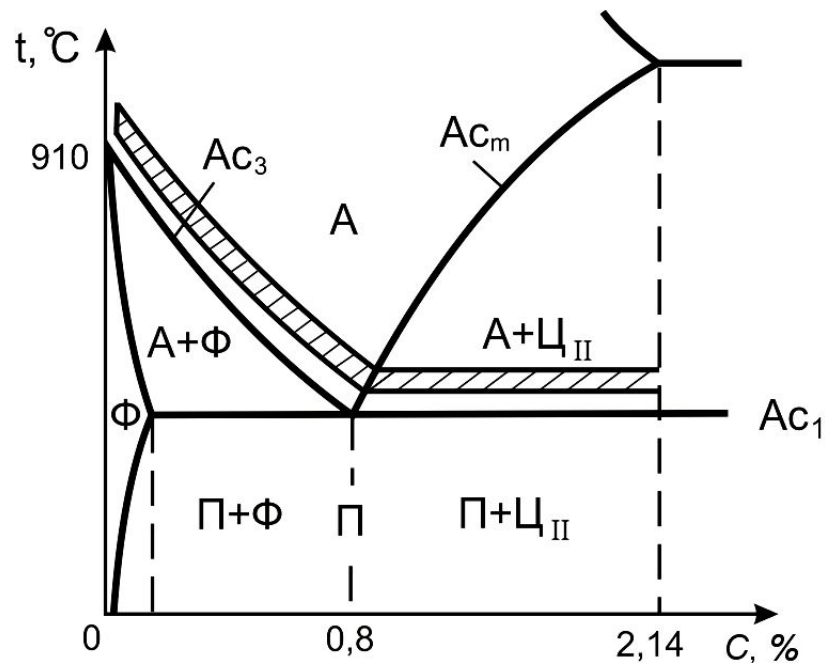
	Разупрочняющая	Упрочняющая	Стабилизирующая
цель	Технологические свойства: снижение твердости и прочности для лучшей обрабатываемости резанием, давлением	Эксплуатационные свойства: повышение твердости и прочности	Стабилизация структуры = стабилизация формы и размеров детали



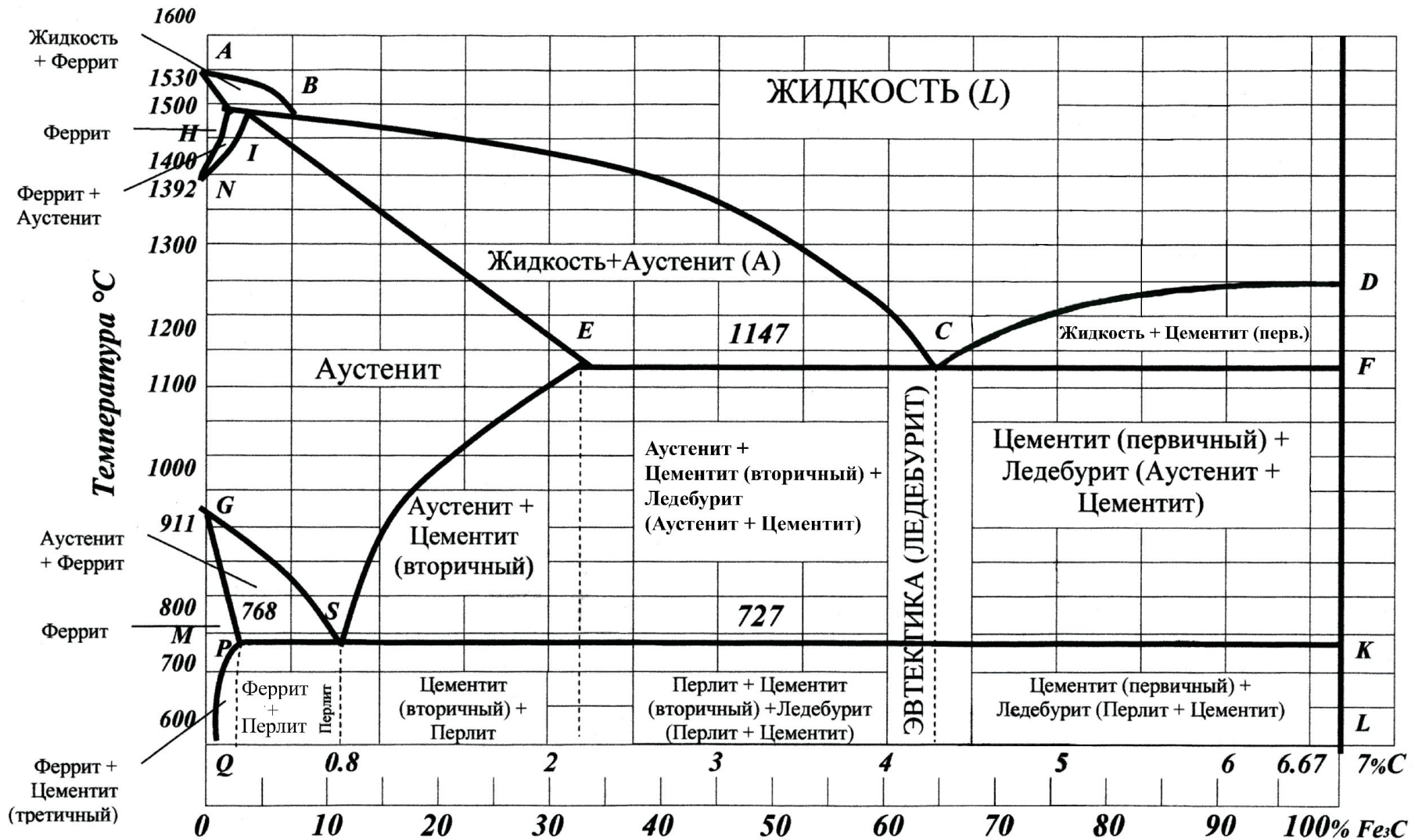
# Превращения в стали при нагреве

Обозначение		Превращение	Где находится
нагрев	охлаждение		
$A_{c1}$	$A_{r1}$	[П -> А] [перлит - > аустенит]	На линии PSK, $T = \text{const} = 727 \text{ } ^\circ\text{C}$
$A_{c3}$	$A_{r3}$	Заканчивается превращение [Ф -> А] [феррит- > аустенит]	На линии GS
$A_{cm}$	$A_{rm}$	Заканчивается растворение [Ц -> А] [цементит > аустенит]	На линии SE

Превращения, т.е. изменение структуры (фазового состава), происходят при нагреве сплавов до критических точек – температур фазовых превращений



# Диаграмма железо - цементит



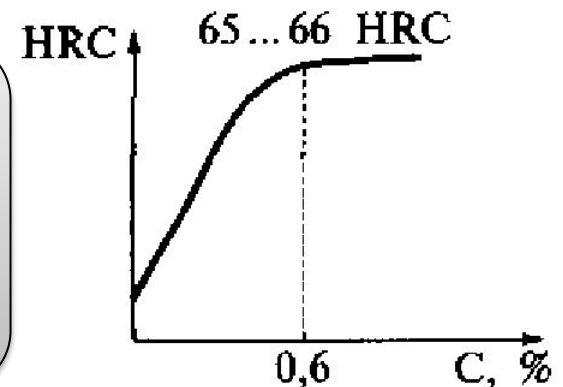
# Зависимости характеристик от структуры вещества

Эксплуатационные свойства стали определяются размером зерна. Крупное зерно в стали не влияет на твёрдость, но снижает прочность и ударную вязкость.

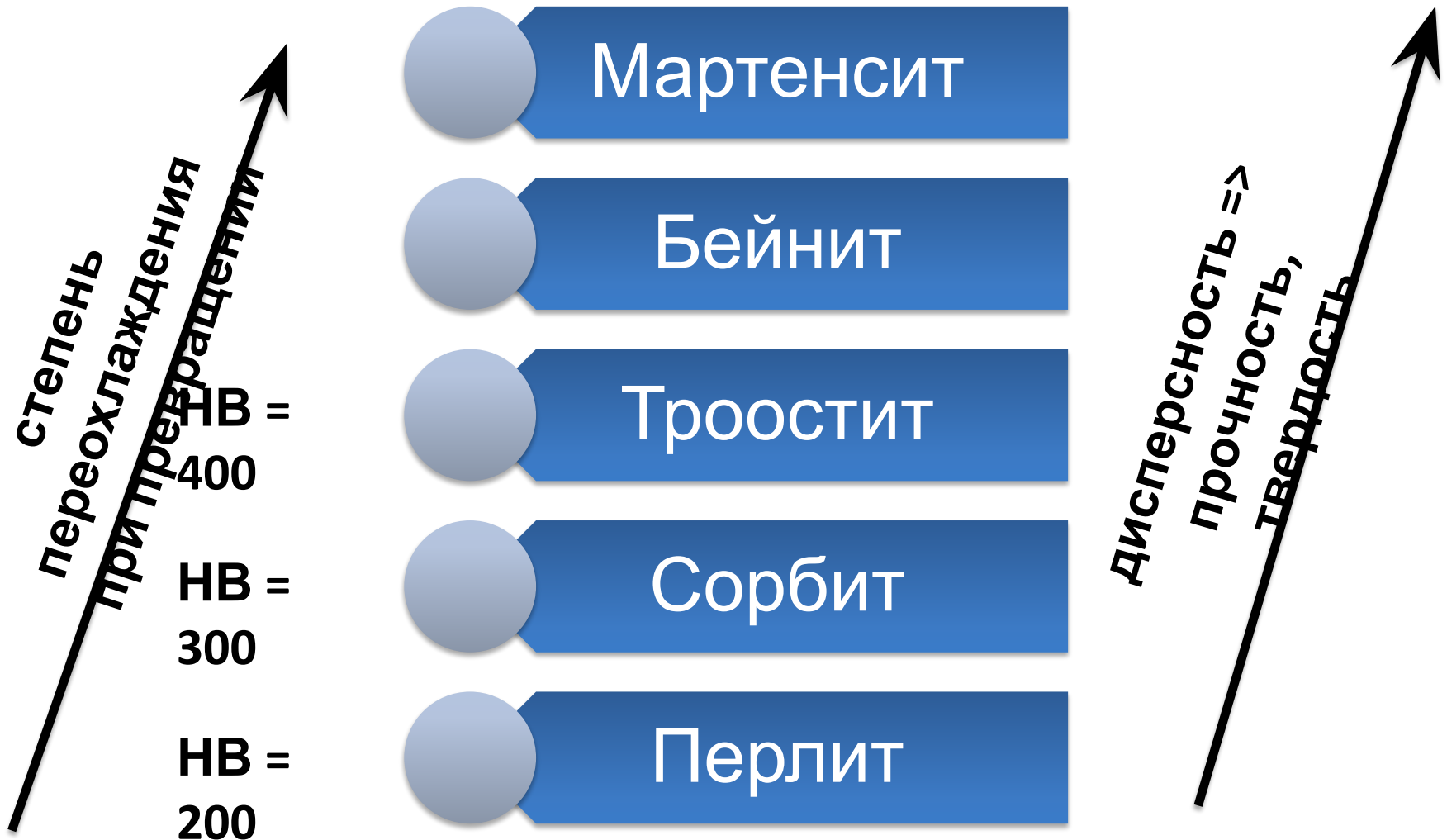


Перлит, сорбит, троостит – ферритно-цементитные смеси различной дисперсности.

Мартенсит имеет высокую твердость, которая повышается с увеличением содержания углерода (см.рисунок справа)



# Перлит, сорбит, троостит – ферритно-цементитные смеси. Но в чем разница?

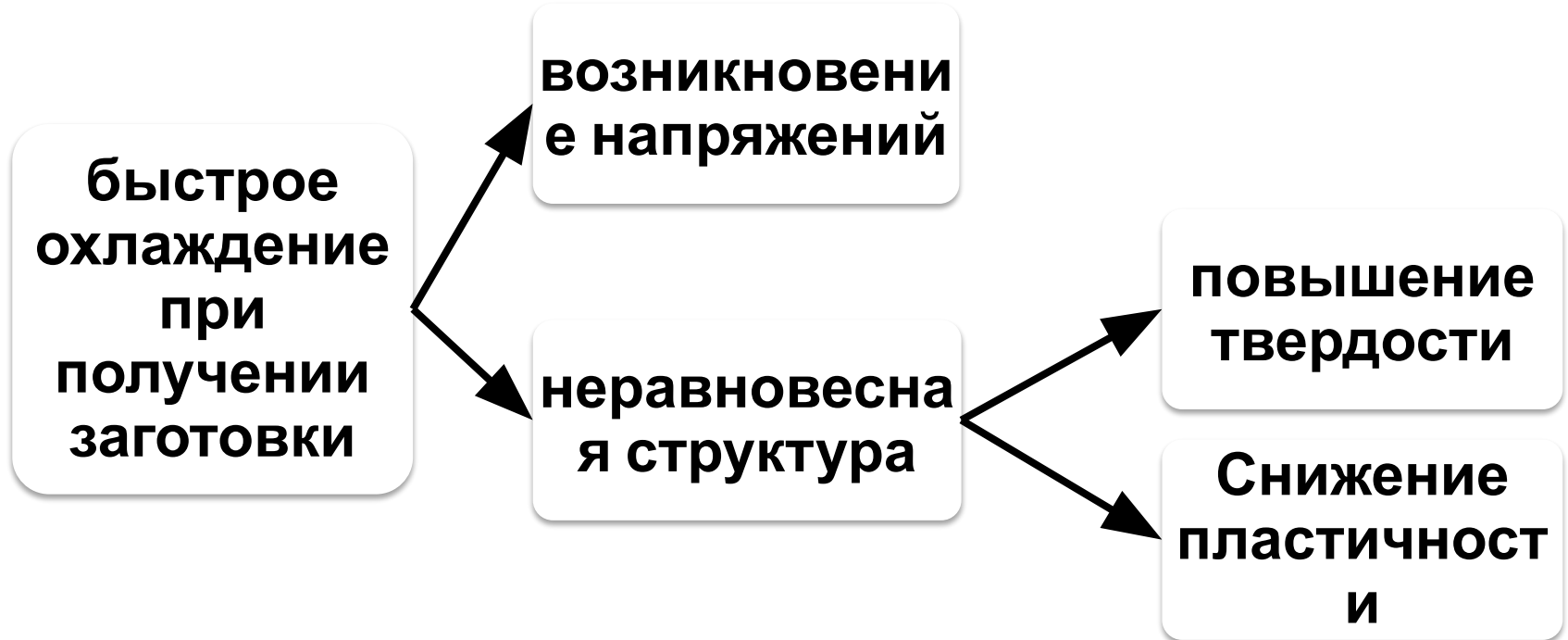


Перлит образуется при температуре близкой к  $727^{\circ}\text{C}$

# Отжиг. Нормализация

Цели:

- ✓ разупрочнение металла,
- ✓ исправление дефектов структуры,
- ✓ устранение остаточных напряжений.



# Отжиг. Нормализация

Случаи применения:

- ✓ предварительная технологическая операция:  
разупрочнение штамповок, литых, сварных и кованых деталей перед мех. обработкой;
- ✓ промежуточная операция:  
если предшествующая обработка вызвала изменение структуры и свойств (наклёп) или появление напряжений (после шлифования);
- ✓ окончательная термическая обработка:  
завершающая стадия изготовления стали в металлургии для адаптации к дальнейшей обработке.



Отжиг 1-го рода	Отжиг 2-го рода
Фазовые превращения (перекристаллизация) не происходят или же не оказывают влияния на конечные результаты	Протекают фазовые превращения при нагреве и охлаждении, существенно влияющие на структуру металла

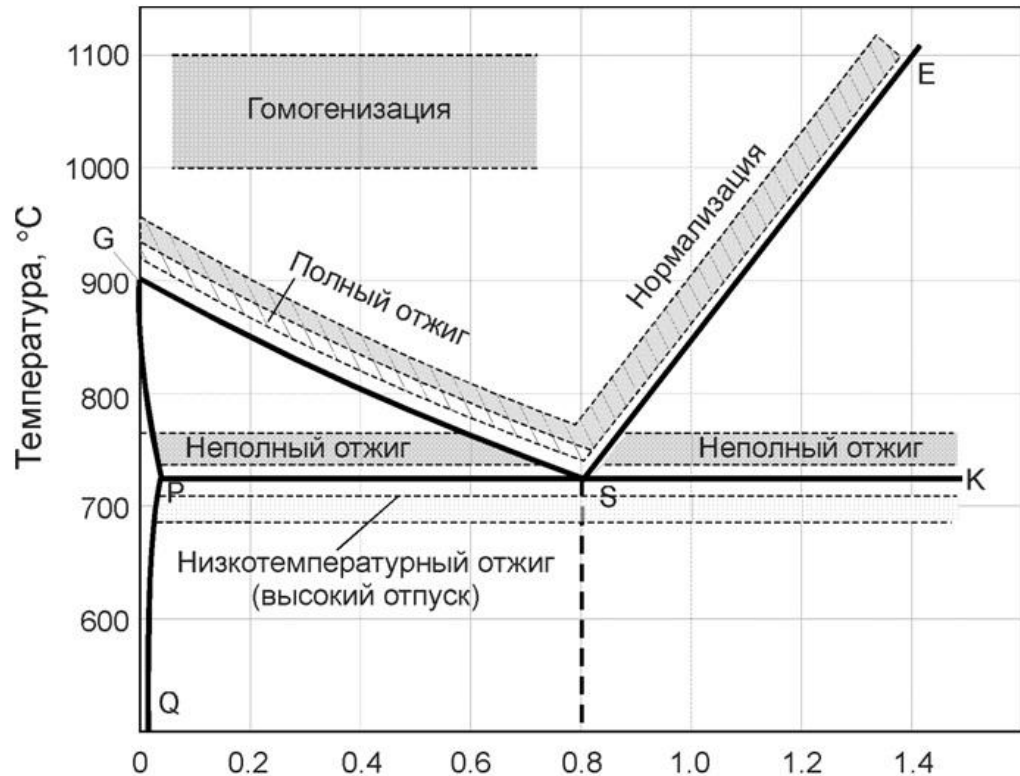


Рисунок —  
Температуры отжига и  
нормализации

# Полный отжиг

Для чего применяется ?	Для доэвтектоидных сталей
Как происходит?	1) Нагрев выше $A_{c3}$ на 30...50 °С со скоростью около 100 °С/ч, что приводит к полной перекристаллизации 1) Изотермическая выдержка (время зависит от массы) 2) Медленное охлаждение
Цель	<ul style="list-style-type: none"><li>• Устранение дефектов структуры, возникших при предшествующей обработке (литье, ковке);</li><li>• Разупрочнение перед обработкой резанием (снижение твердости и прочности);</li><li>• Снятие остаточных напряжений;</li></ul>

# Неполный отжиг

<p>Для чего применяется ?</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Для доэвтектоидных сталей в том случае, если зерно не крупное ( в противном случае нужен полный отжиг);</li><li>• Для заэвтектоидных сталей для получения зернистого перлита(они менее склонны к перегреву, образованию трещин и деформации при закалке, лучше обрабатываются резанием).</li></ul>
<p>Как происходит?</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Нагрев выше <math>A_{c1}</math> (частичная перекристаллизация – только феррит в составе перлита) ;</li><li>2) Медленное охлаждение</li></ol>
<p>Цель</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Разупрочнение перед обработкой резанием (снижение твердости и прочности);</li><li>• Снятие остаточных напряжений;</li></ul>

# Изотермический отжиг

Для чего применяется ?	Для легированных сталей
Как происходит?	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Нагрев выше <math>A_{c1}</math>;</li><li>2) Быстрое охлаждение (перенос в другую печь) до <math>t</math> ниже <math>A_{c1}</math> на <math>50 \dots 100^\circ\text{C}</math>;</li><li>3) Изотермическая выдержка до полного распада аустенита;</li><li>4) Охлаждение на воздухе.</li></ol>
Цель	<ul style="list-style-type: none"><li>• Сокращение времени термообработки;</li><li>• Разупрочнение перед обработкой резанием;</li><li>• Снятие остаточных напряжений;</li></ul>

# Нормализация

Для чего применяется ?	Для всех сталей (происходит перекристаллизация стали, устраняющая крупнозернистую структуру).
Как происходит?	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Нагрев <b>доэвтектоидных</b> (<b>заэвтектоидных</b>) сталей выше <math>A_{c3}</math> (<math>A_{cm}</math>) на 50...60°C;</li><li>2) Изотермическая выдержка;</li><li>3) Охлаждение на воздухе (быстрое охлаждение повышает дисперсность, а значит и прочность).</li></ol>
Цель	<ul style="list-style-type: none"><li>• Низкоуглеродистые стали подвергаются нормализации вместо отжига;</li><li>• Среднеуглеродистые стали подвергаются нормализации вместо закалки и высокого отпуска (мех.хар-ки будут хуже, но зато меньше деформация);</li></ul>

# Возможные проблемы отжига и нормализации

Ошибка	Последствие
Быстрый нагрев	•Образование трещин вследствие неравномерного нагрева
Перегрев	•Образование крупнозернистой структуры => снижение прочности
Пережог <b>(неустранимый брак)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Образование крупнозернистой структуры =&gt; снижение прочности</li> <li>▪Появление окислов по границе зерна =&gt; возникновение межкристаллитной коррозии</li> </ul>
Недогрев	•Сохранение и возникновение новых внутренних напряжений
Обезуглероживание	•Выгорание углерода в поверхностном слое => снижение прочности
Контакт с окружающей средой (с кислородом)	•Появление окалины и окислов => межкристаллитная коррозия

# Закалка

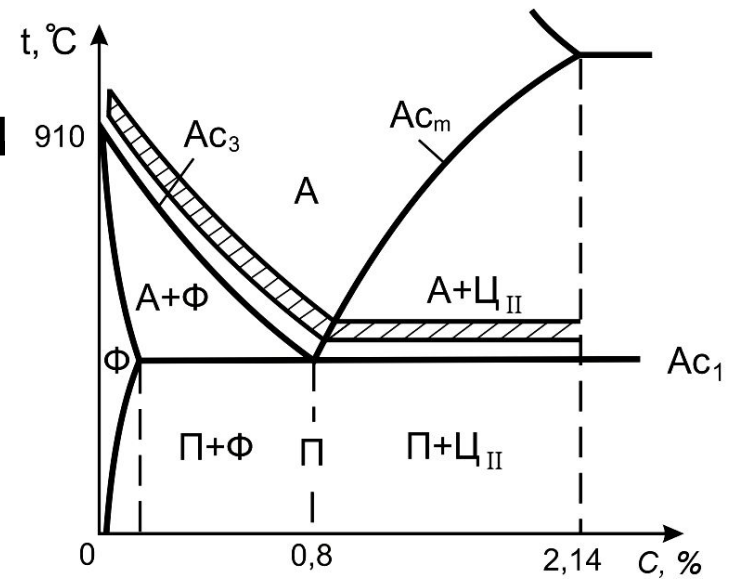
Цели:

- ✓ упрочнение (повышение твердости, прочности за счет получения структуры мартенсита)

Случаи применения:

- ✓ промежуточная операция (после закалки проводится отпуск)

# Закалка. Алгоритм выполнения



1. Нагрев до  $T$ :

Доэвтектоидные стали	Заэвтектоидные стали
выше $A_{c3}$ на $30...50 ^\circ\text{C}$ (полная закалка)	Применяется только <b>неполная</b> закалка: выше $A_{c1}$ на $50...70 ^\circ\text{C}$
между $A_{c1} \dots A_{c3}$ (неполная закалка)	

2. Изотермическая выдержка при набранной  $T, ^\circ\text{C}$  ;

! Быстрое охлаждение в случае доэвтектоидных сталей при неполной закалке остается феррит, обладающий низкой твердостью, поэтому нет особого смысла в такой закалке.



# Обработка холодом

Цели:

- Повышение твердости за счет устранения остаточного аустенита;
- Стабилизация размеров особо точных деталей, для которых изменение размеров во времени недопустимо (калибры, кольца шарикоподшипников...)

Сущность:

Сталь **сразу после закалки** охлаждают до отрицательных температур.

# Закаливаемость и прокаливаемость

**Закаливаемость** характеризует твердость закаленной стали и измеряется в единицах твердости.

Закаливаемость зависит от содержания углерода в стали: чем больше углерода, тем выше твердость. Легирующие элементы на закаливаемость влияют слабо.

Содержание углерода	менее 0,3 % (Сталь 10, 15, 20, 25)	0,3...0,6 %	более 0,6...0,8 % (Сталь 40, 40X, ХВГ, 45, Х12МФ)
Закаливаемость	«не принимают» закалку => закалка не производится	Средняя закаливаемость	Высокая закаливаемость
Твердость	Менее 40 HRC	40...60 HRC	65...66 HRC

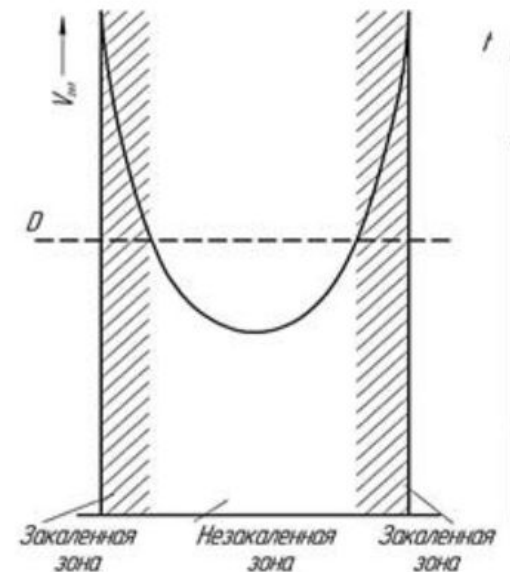
# Закаливаемость и прокаливаемость

**Прокаливаемость** – способность стали получать при закалке мартенситную структуру и высокую твердость на определенную глубину.

**Прокаливаемость** – это способность стали получать закаленный слой определенной глубины.

**Прокаливаемость** – это расстояние от поверхности до того места, где в структуре наблюдается 50% мартенсита и 50% троостита (полумартенситная зона).

*Скорость охлаждения уменьшается от поверхности детали к центру. В случае большой толщины детали на мартенсит закалится только поверхностный слой детали, а сердцевина будет незакаленной, с мягкой феррито-перлитной структурой.*



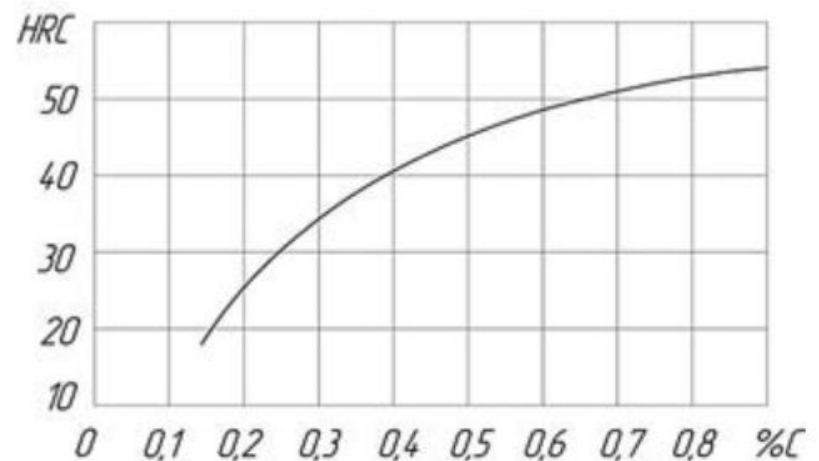
# Закаливаемость и прокаливаемость

Прокаливаемость выражается в мм. С увеличением содержания углерода и легирующих элементов, критическая скорость закаливания уменьшается, и глубина прокаливаемости увеличивается.

**Критический диаметр** – это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в конкретной охлаждающей среде.

Углеродистая сталь при охлаждении в воде имеет критический диаметр всего 10-15 мм. Легированные стали могут прокаливаться в сечении до 250-300 мм при закалке в масле. Чем больше размер заготовки, тем больше должна быть применена.

Рисунок – Зависимость твердости полумартенситной зоны углеродистой стали от содержания углерода



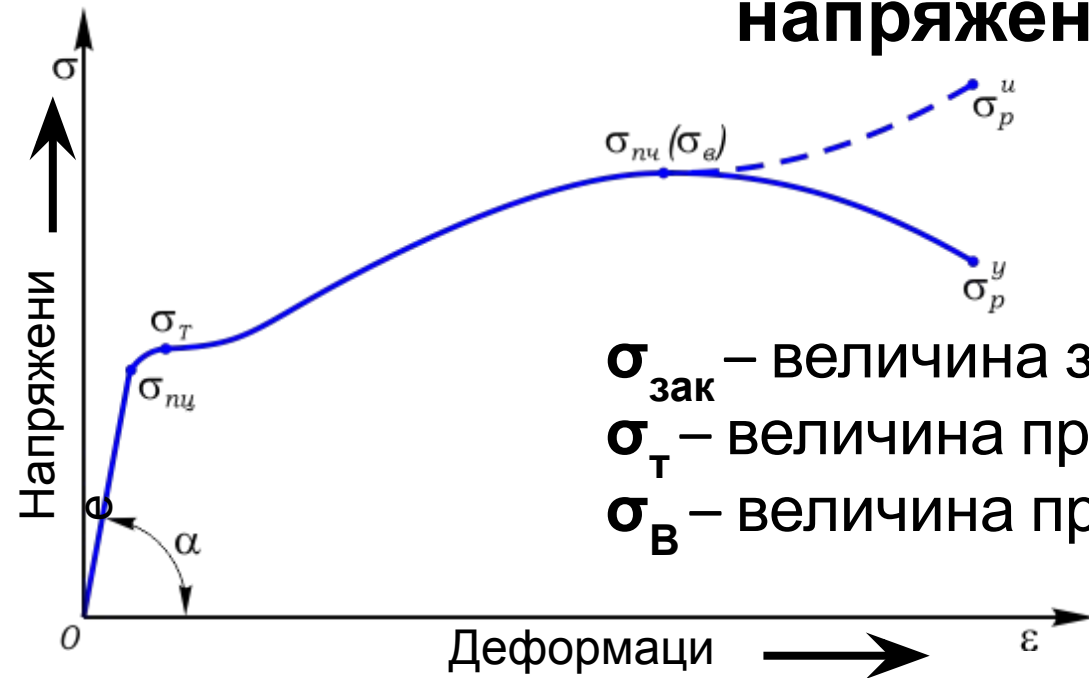
# Возможные проблемы закалки

Деформация – изменение размеров детали при сохранении формы.

Коробление – изменение формы детали.

Ошибка	Последствие
Обезуглероживание	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Выгорание углерода с поверхности =&gt; снижение прочности</li> </ul>
Недогрев	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Недостаточная твердость</li> </ul>
Недостаточно интенсивное охлаждение	
Закалка деталей сложной конфигурации, деталей малой жесткости	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Возникновение остаточных закалочных напряжений =&gt; возникновение трещин / деформация / коробление</li> </ul>
Перегрев	
Чрезмерно высокая скорость охлаждения	
<p>Легированные стали имеют более низкую критическую скорость охлаждения =&gt; возможно более медленное охлаждение в масле (иногда и на воздухе)</p>	

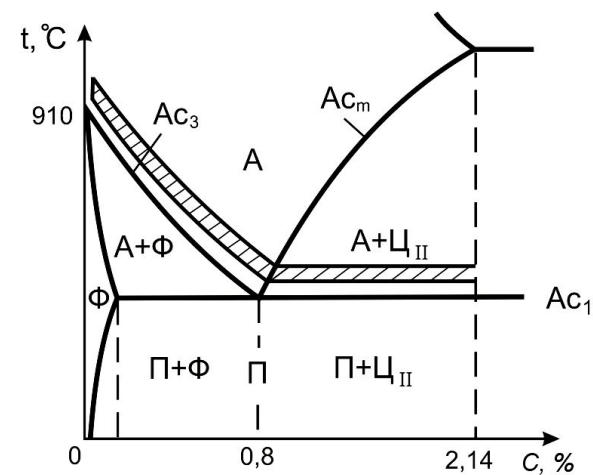
# Зависимость дефектов от закалочных напряжений



- $\sigma_{зак}$  – величина закалочных напряжений
- $\sigma_T$  – величина предела текучести
- $\sigma_B$  – величина предела прочности

Обозначение	Описание	Дефект
$\sigma_{зак} < \sigma_T$	закалочные напряжения меньше предела текучести	Деформация отсутствует
$\sigma_T < \sigma_{зак} < \sigma_B$	закалочные напряжения больше предела текучести, но меньше предела прочности	Коробление / деформация
$\sigma_{зак} > \sigma_B$	закалочные напряжения больше предела прочности	Трещины / полное

# Отпуск и старение



Отпуск – окончательная операция термообработки.

Отпуск – стабилизирующая термообработка;

Стабилизирующий отпуск тем эффективнее, чем выше его температура.

Алгоритм:

1) Нагрев до T ниже  $A_{C1}$  (ниже 727 °C);

2) Изотермическая выдержка;

3) Охлаждение (обычно на Цельвоздухе).

1) Уменьшение остаточных напряжений;

Режимы стабилизирующего отпуска	
Температура, °C	Выдержка, ч
600...650	2
500...600	2...3
400...500	3...4
300...400	4...5
130...200	8...10

# Виды отпуска стали

Название	Низкотемпературный (низкий)	Среднетемпературный (средний)	Высокотемпературный (высокий)
Температура, °С	150...250	350...500	500...600
Характеристика	Сохранение высокой твердости	улучшение пластичности, ударной вязкости, предела упругости (до max); снижение твердости до 40...48 HRC,	Существенное снижение твердости (до 300 НВ), повышение пластичности и ударной вязкости.
Для чего применяется	Инструменты и детали, работающие в условиях изнашивания: режущие и мерительные инструменты, штампы холодного деформирования	Рессоры, пружины, упругие элементы, слесарно – монтажный инструмент	Детали, эксплуатируемые в условиях высоких напряжений в сочетании с ударными нагрузками



# Отпуск и старение

Закалка + высокий отпуск = **улучшение**

**Старение** – тот же отпуск в случае окончательной термической обработки сплавов после закалки без полиморфного превращения.

По сравнению с отжигом улучшение обеспечивает более высокие показатели механических характеристик (прочность, твердость, пластичность, ударная вязкость);

## Вопросы:

Какой вид термообработки применяется для стабилизации размеров особо точных деталей? (Обработка холодом)

Какую из операций ТО следует осуществить, чтобы гарантировать правильность и неизменность во времени размеров калибра, применяемого для контроля размеров изделия? (обработка холодом)