

# Материаловедение. Технология конструкционных материалов

## Термическая обработка

# 1. Основные виды термической обработки

*Термическая обработка* – процесс тепловой обработки металлов и сплавов, заключающийся обычно в нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью.

Применяется для получения материала с заданными свойствами путем изменения его фазового состава и перераспределения компонентов, размеров и формы кристаллических зерен, вида дефектов, их количества и распределения. К термической обработке относятся *отжиг, закалка, отпуск, старение*.

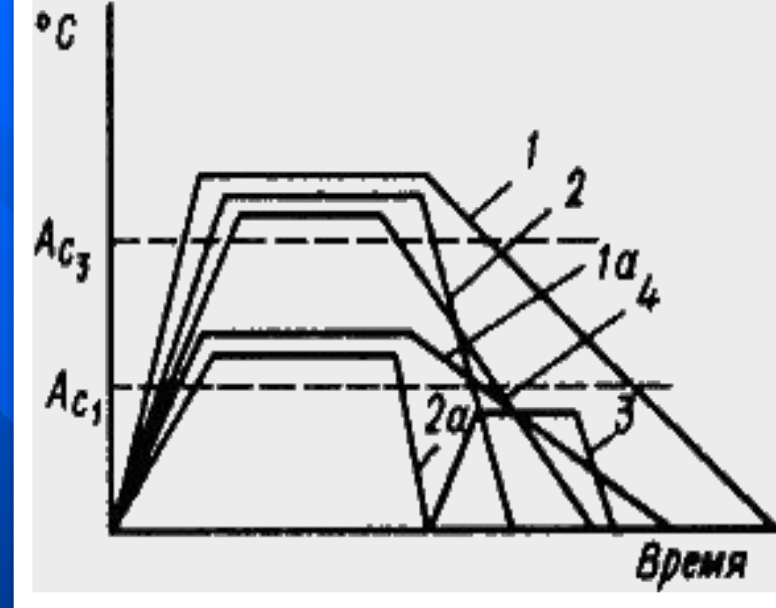
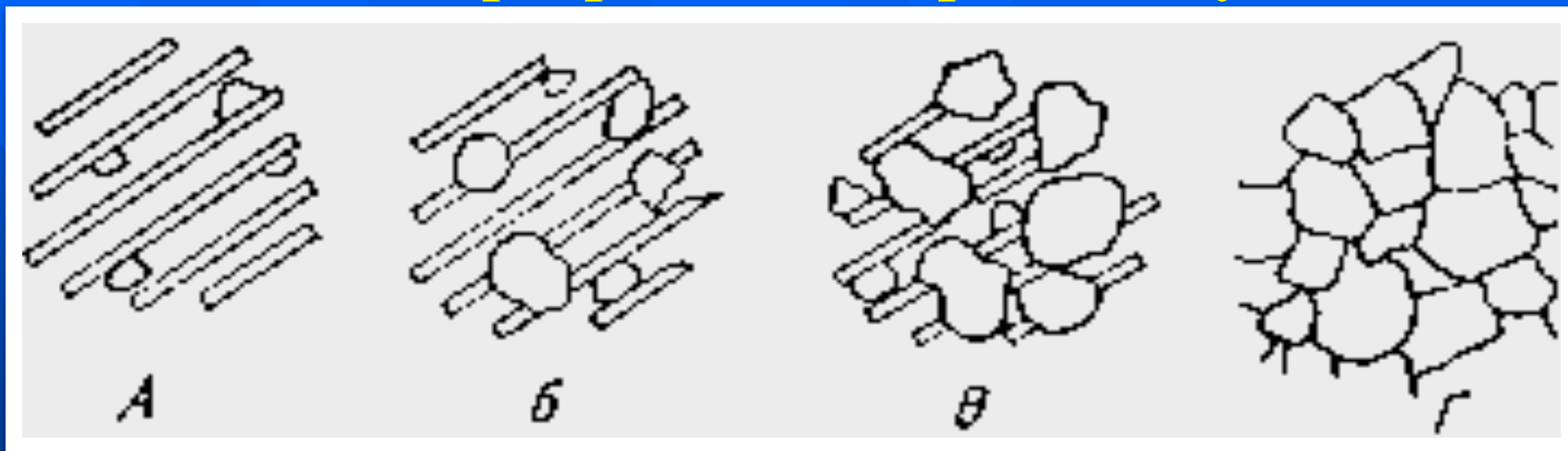


Рис. Графики различных видов термообработки: отжига (1, 1а), закалки (2, 2а), отпуска (3), нормализации (4)

## 2. Механизм превращения перлита в аустенит



**А - исходная структура перлита. Начало полиморфного  $\alpha \rightarrow \delta$  превращения и растворения  $\text{Fe}_3\text{C}$  в аустените**

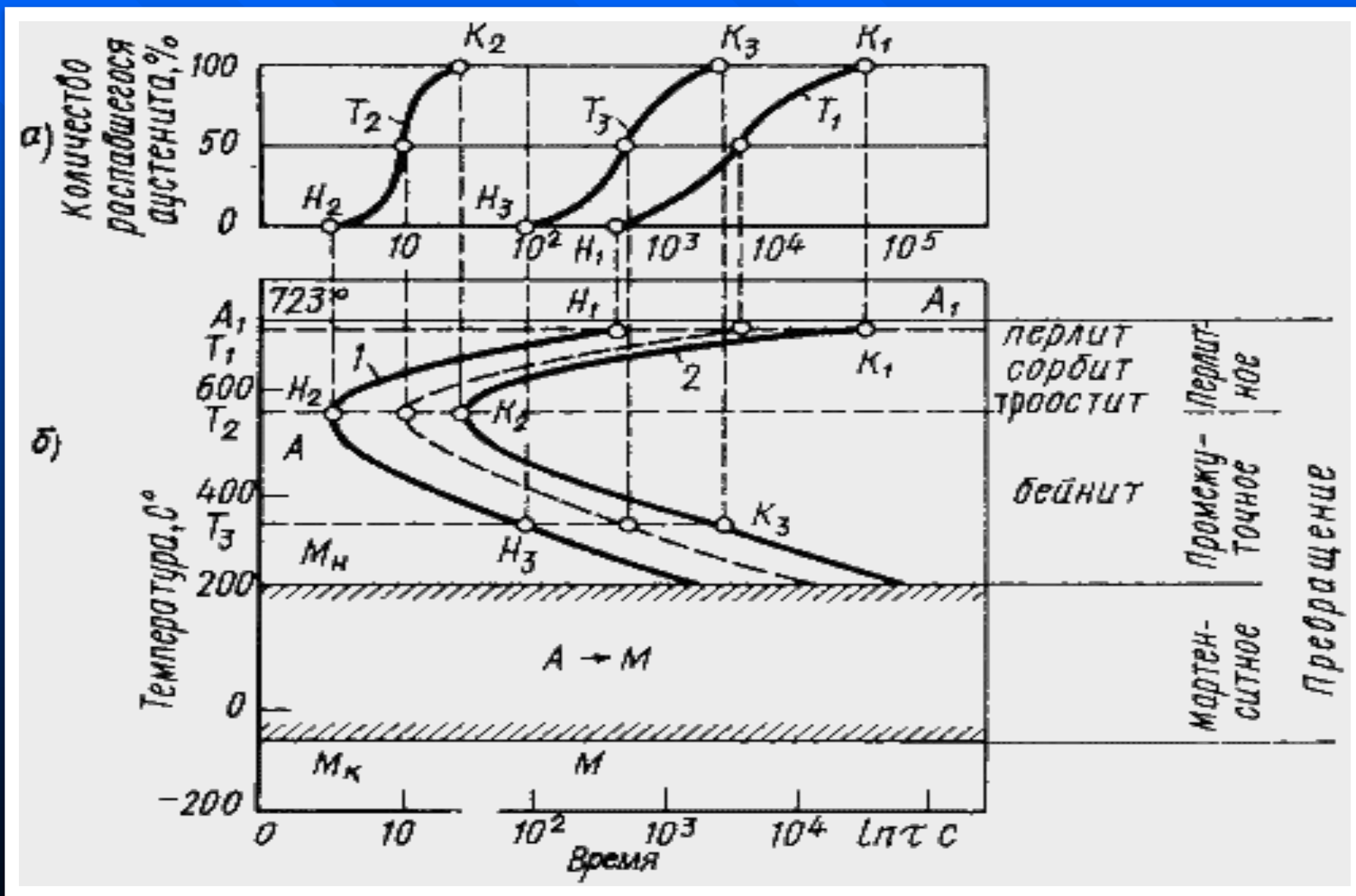
**Б - развитие превращения**

**В - полиморфное превращение закончено, остался нерастворенный  $\text{Fe}_3\text{C}$**

**Г - конец превращения**

После того, как весь цементит растворится, аустенит неоднороден по химическому составу: там, где находились пластинки цементита концентрация углерода более высокая. Для завершения процесса перераспределения углерода в аустените требуется дополнительный нагрев или выдержка.

### 3. Диаграмма изотермического превращения аустенита



Горизонтальная линия  $M_n$  показывает температуру начала бездиффузного мартенситного превращения.

При малых степенях переохлаждения, в области температур  $727...550^\circ \text{C}$ , сущность превращения заключается в том, что в результате превращения аустенита образуется механическая смесь феррита и цементита, состав которой отличается от состава исходного аустенита. Аустенит содержит  $0,8\%$  углерода, а образующиеся фазы: феррит  $-0,02\%$ , цементит  $-6,67\%$  углерода.

Время устойчивости аустенита и скорость его превращения зависят от степени переохлаждения.

Максимальная скорость превращения соответствует переохлаждению ниже температуры на  $150...200^\circ \text{C}$ , то есть соответствует минимальной устойчивости аустенита.

Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит процесс его распада.

Толщина соседних пластинок феррита и цементита определяет дисперсность структуры. Она зависит от температуры превращения. В зависимости от дисперсности продукты распада имеют различное название:

**Перлит** - Образуется при переохлаждении до температуры  $T = 650...700$  °С, или при скорости охлаждения  $V_{\text{охл}} = 30...60$  °С/ч. Твердость составляет 180...250 НВ.

**Сорбит** - Образуется при переохлаждении до температуры  $T = 600...650$  °С, или при скорости охлаждения  $V_{\text{охл}} = 60$  °С/с. Твердость составляет 250...350 НВ. Структура характеризуется высоким пределом упругости, достаточной вязкостью и прочностью.

**Троостит** - Образуется при переохлаждении до температуры  $T = 550...600$  °С, или при скорости охлаждения  $V_{\text{охл}} = 150$  °С/с. Твердость составляет 350...450 НВ. Структура характеризуется высоким пределом упругости, малой вязкостью и пластичностью.

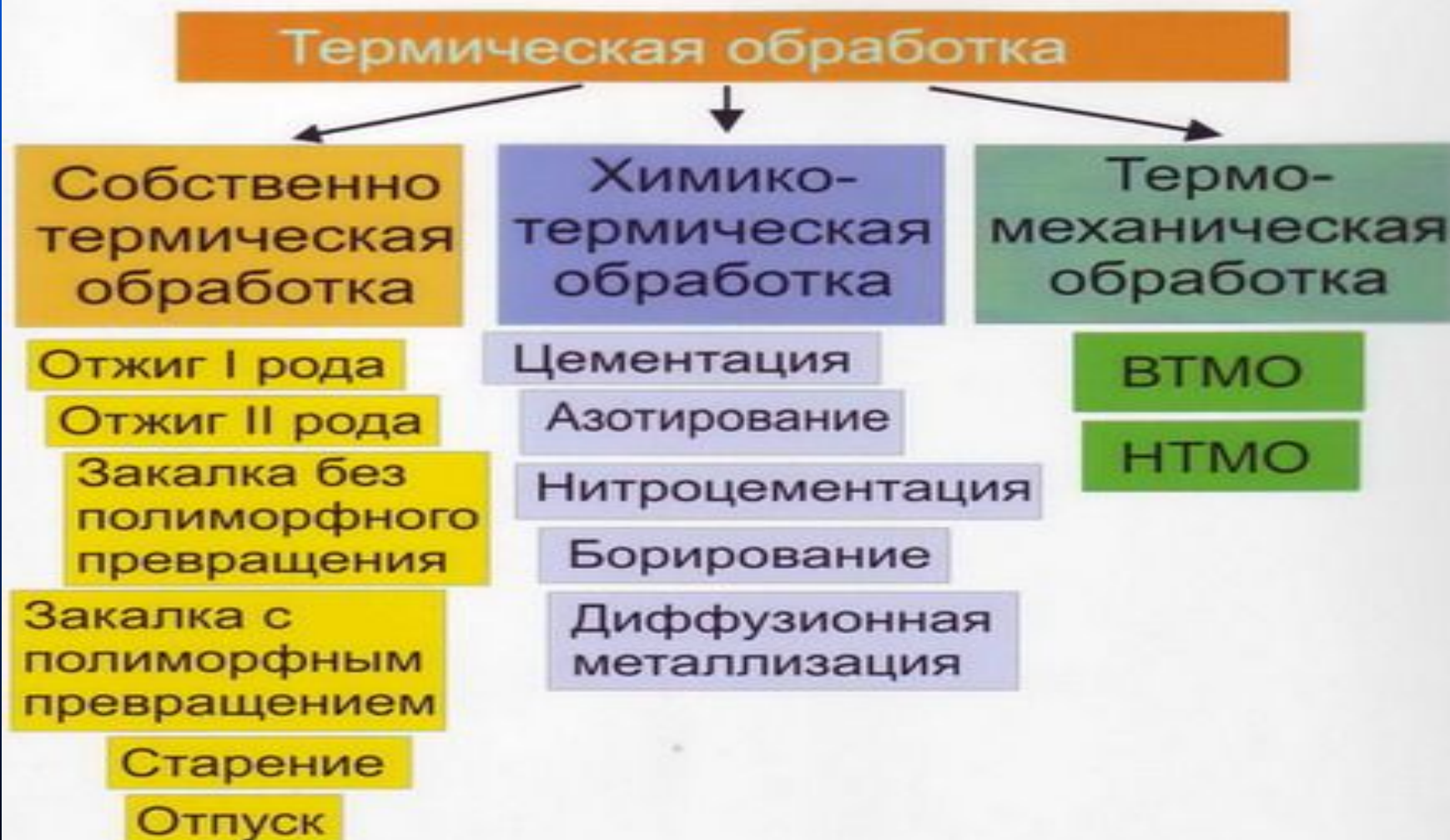
## 4. Технологические возможности и особенности отжига, нормализации, закалки и отпуска

При разработке технологии необходимо установить:

- режим нагрева деталей (температуру и время нагрева);
- характер среды, где осуществляется нагрев и ее влияние на материал стали;
- условия охлаждения.



# Классификация видов термической обработки





# 5. Отжиг

- *Отжиг* – термическая обработка кристаллического тела, структура которого находится в метастабильном или неравновесном состоянии, заключающаяся последовательно в нагреве до определенной температуры, выдержке и медленном охлаждении (обычно вместе с печью) для получения более устойчивой структуры.
- Отжиг производят для улучшения обрабатываемости, повышения пластичности, уменьшения остаточных напряжений и др. Температура нагрева зависит от состава сплава и конкретной разновидности отжига, скорость охлаждения при отжиге невелика и лежит в пределах  $30\div 100$  °С/ч. Отжиг подразделяется на отжиг 1-го и 2-го рода.
- В большинстве случаев отжиг – это подготовительная термическая обработка, которой подвергаются отливки, поковки, прокат. В некоторых случаях отжиг является конечной термической операцией, например, отжиг крупных отливок.

# Отжиг первого рода

При таком отжиге не используются фазовые превращения

## - *Гомогенизационный (диффузионный) отжиг.*

Цель - уменьшение дендритной (внутрикристаллической) ликвации. Температура нагрева 1100-1200°C

## - *Рекристаллизационный отжиг*

Цель - устранение наклепа, созданного холодной пластической деформацией. Нагрев производится выше температурного порога рекристаллизации (чаще всего до 600-720°C)

## - *Отжиг для уменьшения внутренних напряжений*

Нагрев до 450 - 650° С.

# Отжиг второго рода



Полный (перекристаллизационный) отжиг доэвтектоидных сталей

Для углеродистых сталей:

аустенитизация при  $t = A_{c3} + (30-50^\circ\text{C})$   
+ охлаждение со скоростью  
150-200 град/час

Изотермический отжиг -

разновидность полного отжига -  
применяется для легированных сталей.

Аустенизация + ускоренное охлаждение до  $t = A_{c1} - (50-100^\circ\text{C})$  + выдержка до полного распада переохлажденного аустенита.

Неполный отжиг доэвтектоидных сталей:

Нагрев в интервал  $A_{c1} - A_{c3}$  + охлаждение по режиму полного отжига.



Нормализация

Аустенитизация при  $t = A_{c3} + (30-50^\circ\text{C})$  для доэвтектоидных сталей и  $t = A_{cm} + (30-50^\circ\text{C})$  для заэвтектоидных + ускоренное охлаждение на воздухе.

## 5.1. Виды отжига

- *Отжиг 1-го рода* происходит без фазовых превращений или не зависит от них. К отжигу 1-го рода относятся: *гомогенизационный (диффузионный), рекристаллизационный, увеличивающий зерно, для снятия остаточных напряжений.*
- *При отжиге 2-го рода* фазовые превращения определяют его целевое назначение. К отжигу 2-го рода относятся: *полный, изотермический, неполный, сфероидизирующий, нормализация, патентирование.*



1. Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг. Применяется для устранения ликвации, выравнивания химического состава сплава.

В его основе – диффузия. В результате нагрева выравнивается состав, растворяются избыточные карбиды. Применяется, в основном, для легированных сталей.

Температура нагрева зависит от температуры плавления,  $T_H = 0,8 T_{пл}$ .

Продолжительность выдержки: 15-40 часов.

2. Рекристаллизационный отжиг проводится для снятия напряжений после холодной пластической деформации. Температура нагрева связана с температурой плавления:  $T_H = 0,4 T_{пл}$ . Продолжительность зависит от габаритов изделия.

3. Отжиг для снятия напряжений после горячей обработки (литья, сварки, обработки резанием, когда требуется высокая точность размеров). Температура нагрева выбирается в зависимости от назначения, находится в широком диапазоне:  $T_H = 160 \dots 700^\circ\text{C}$ .

Продолжительность зависит от габаритов изделия.

Детали прецизионных станков (ходовые винты, высоконагруженные зубчатые колеса, червяки) отжигают после основной механической обработки при температуре  $570 \dots 600^\circ\text{C}$  в течение  $2 \dots 3$  часов, а после окончательной механической обработки, для снятия шлифовочных напряжений – при температуре  $160 \dots 180^\circ\text{C}$  в течение  $2 \dots 2,5$  часов.



Отжиг второго рода предназначен для изменения фазового состава.

Температура нагрева и время выдержки обеспечивают нужные структурные превращения. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы успели произойти обратные диффузионные фазовые превращения.

Является подготовительной операцией, которой подвергают отливки, поковки, прокат. Отжиг снижает твердость и прочность, улучшает обрабатываемость резанием средне- и высокоуглеродистых сталей. Измельчая зерно, снижая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность способствует повышению пластичности и вязкости.

В зависимости от температуры нагрева различают отжиг:

1. полный, с температурой нагрева на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_3$ . Проводится для доэвтектоидных сталей для исправления структуры. При такой температуре нагрева аустенит получается мелкозернистый, и после охлаждения сталь имеет также мелкозернистую структуру.
2. неполный, с температурой нагрева на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_1$ . Применяется для заэвтектоидных сталей. При таком нагреве в структуре сохраняется цементит вторичный, в результате отжига цементит приобретает сферическую форму (сфероидизация).

3. изотермический отжиг – после нагрева до требуемой температуры, изделие быстро охлаждают до температуры на  $50...100^{\circ}\text{C}$  ниже критической температуры  $A_1$  и выдерживают до полного превращения аустенита в перлит, затем охлаждают на спокойном воздухе. Температура изотермической выдержки близка к температуре минимальной устойчивости аустенита.

Получают более однородную структуру, так как превращение происходит при одинаковой степени переохлаждения. Значительно сокращается длительность процесса. Применяют для легированных сталей.

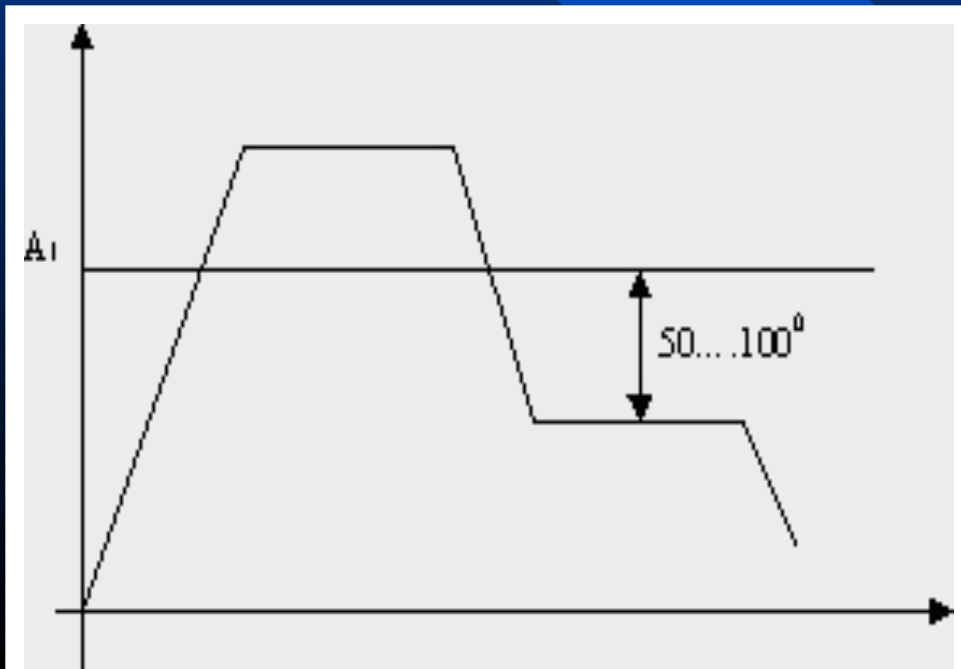


Рис. Режимы изотермического отжига

# Сфероидизирующий отжиг заэвтектоидных сталей

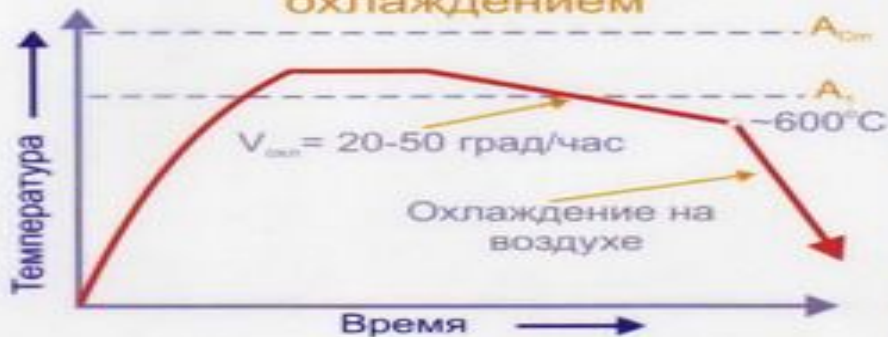
Температура нагрева углеродистых сталей



Структура стали после сфероидизирующего отжига



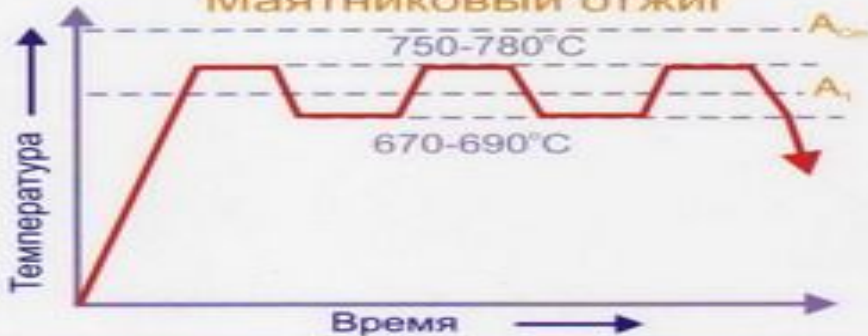
Отжиг с непрерывным охлаждением



Изотермический отжиг



Маятниковый отжиг



## 6. Нормализация – разновидность отжига.

Термическая обработка, при которой изделие нагревают до аустенитного состояния, на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше  $A_3$  или  $A_{ст}$  с последующим охлаждением на воздухе.

В результате нормализации получают более тонкое строение эвтектоида (тонкий перлит или сорбит), уменьшаются внутренние напряжения, устраняются пороки, полученные в процессе предшествующей обработки. Твердость и прочность несколько выше чем после отжига.

В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет грубую сетку вторичного цементита.

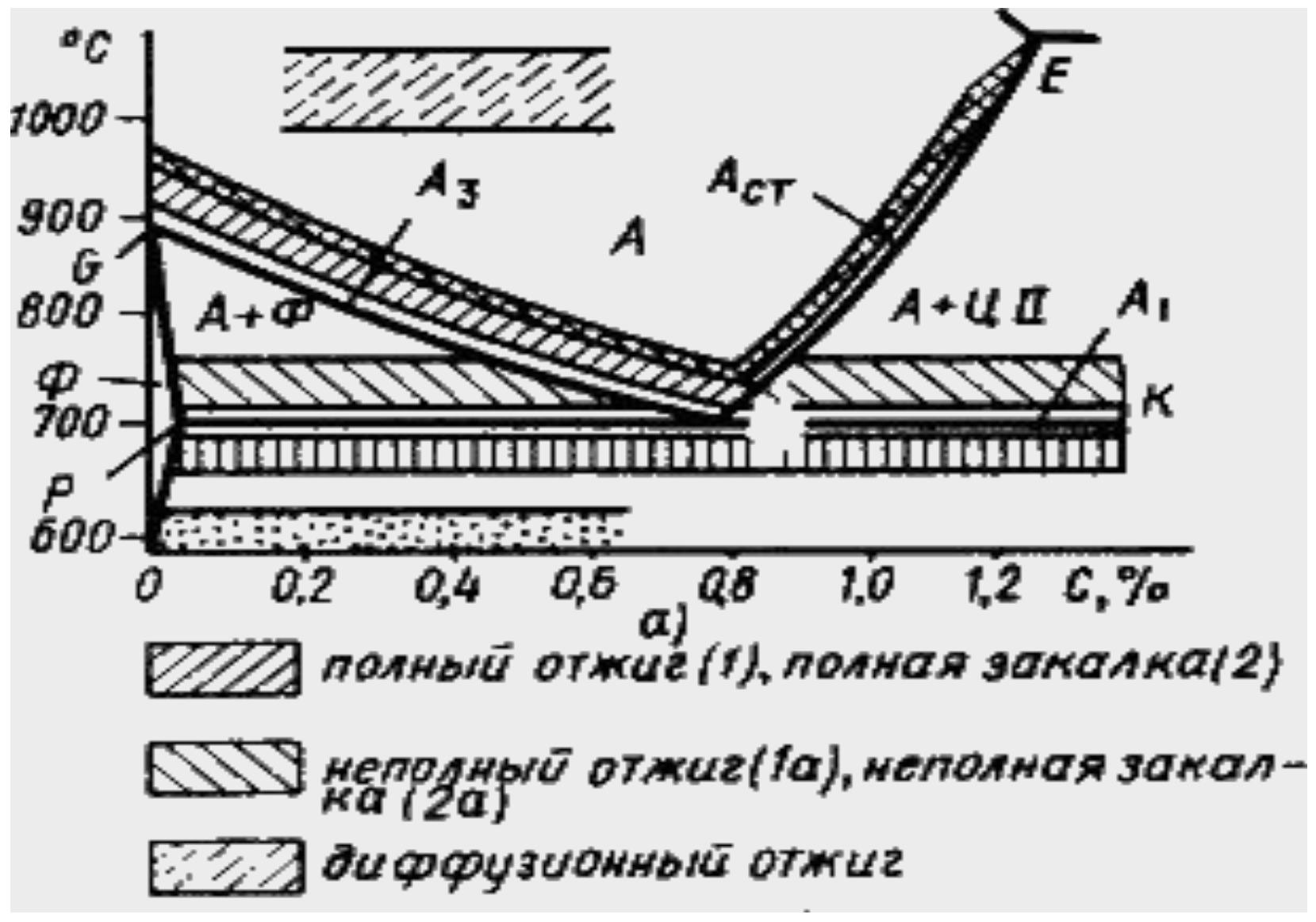
Нормализацию чаще применяют как промежуточную операцию, улучшающую структуру. Иногда проводят как окончательную обработку, например, при изготовлении сортового проката.

Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига.

Для среднеуглеродистых сталей нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки с высоким отпуском. В этом случае механические свойства несколько ниже, но изделие подвергается меньшей деформации, исключаются трещины



# Левый угол диаграммы состояния железо – цементит и температурные области нагрева при ТО сталей





# 7. Закалка

- *Закалка* – термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла или сплава до определенной температуры, в выдержке и последующем быстром охлаждении, с целью получения метастабильной или неравновесной структуры.
- Применяется для повышения твердости, износостойкости, прочности, пластичности, вязкости. Быстрое охлаждение является неравновесным процессом: если после или во время проведения такого процесса релаксация не происходит, то получается неравновесная структура, если релаксация происходит – получается метастабильная структура. Закалка может быть с полиморфным превращением и без него.
- Закалка использует фазовые превращения, происходящие в твердом состоянии: полиморфные превращения и уменьшение растворимости с понижением температуры.

# 7.1. Закалка с полиморфным превращением

- Для сталей обычно применяют *закалку с полиморфным превращением*. Для доэвтектоидной стали проводится *полная закалка*, при которой нагрев осуществляется выше  $A_{c3}$ . *Неполной закалке* подвергаются заэвтектоидные стали. Нагрев при этом производится выше  $A_{c1}$ . Затем в обоих случаях закалки (полной и неполной) следуют выдержка и охлаждение со скоростью выше *критической* с целью получения преимущественно структуры *мартенсита*.
- *Закалочные (охлаждающие) среды* выбираются таким образом, чтобы обеспечить скорость охлаждения выше критической, т. е. предотвратить распад аустенита на ферритно-цементитную смесь. Для углеродистых сталей, имеющих высокую *критическую скорость* охлаждения, применяют воду и различные водные растворы, а для легированных сталей, имеющих небольшую критическую скорость охлаждения, – масло и воздух.
- Критическая скорость охлаждения определяет *прокаливаемость* стали, т.е. толщину закаленного слоя с мартенситной или троостито-мартенситной структурой.
- Из-за неравномерности охлаждения при закалке возникают **термические напряжения**, которые суммируются с напряжениями при образовании мартенсита, – *структурными напряжениями (фазовый наклеп)*. Поэтому напряжения при закалке изменяются с течением времени.

# Закалка сталей



Температура нагрева сталей под закалку:

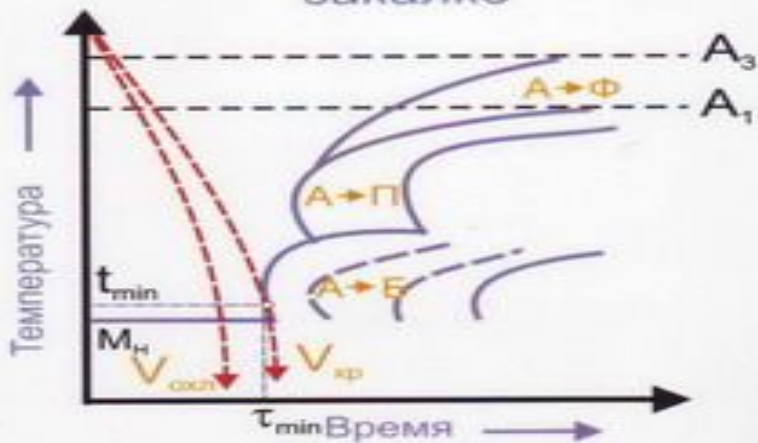
- углеродистая доэвтектоидная

$$t_{\text{H}} = A_{\text{C3}} + (30 - 50^{\circ}\text{C})$$

- углеродистая заэвтектоидная

$$t_{\text{H}} = A_{\text{C1}} + (30 - 50^{\circ}\text{C})$$

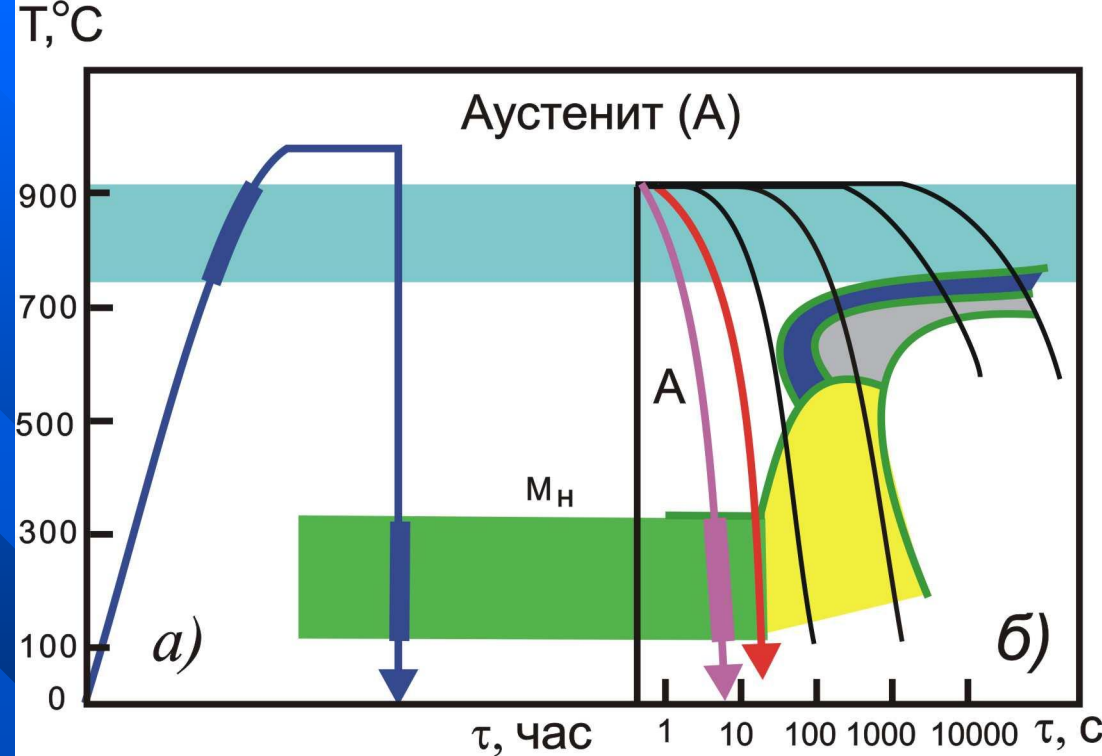
Охлаждение при закалке



Охлаждающая способность воды и масла



Схема закали доэвтектоидной легированной стали (а) и термокинетическая диаграмма (б) с указанием скорости охлаждения при закалке.



- **Голубым** цветом выделен интервал температур  $A_1 - A_3$ . Максимум нагрева соответствует температурам  $A_3 + (30 - 50) ^\circ\text{C}$ .
- **Сиреневой** кривая – скорость охлаждения при закалке. **Красная** кривая – **критическая скорость** закалки. **Светло-зеленым** цветом показана область превращения аустенита в мартенсит. **Желтым** - область превращения аустенита в бейнит. **Серым** – область превращения аустенита в перлит. **Синим** – область выделения феррита. Черные кривые отвечают различным скоростям охлаждения.



# Способы закалки стали



- 1 - непрерывная закалка
- 2 - закалка с подстуживанием
- 3 - закалка в двух средах
- 4 - ступенчатая закалка

## Изотермическая закалка



Изотермическая закалка обеспечивает формирование структуры нижнего бейнита.  
 $T_{из} = M_H + (20-40^\circ\text{C})$

## Свойства стали 40ХСНМА

Обработка	$\sigma_{0.2}$ МПа	$\sigma_{в.}$ МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
Закалка в масле + отпуск 550°С, 2ч	1230	1320	12	45	0,53
Изотемическая закалка (325°С, 1ч)	1200	1400	19	55	0,92

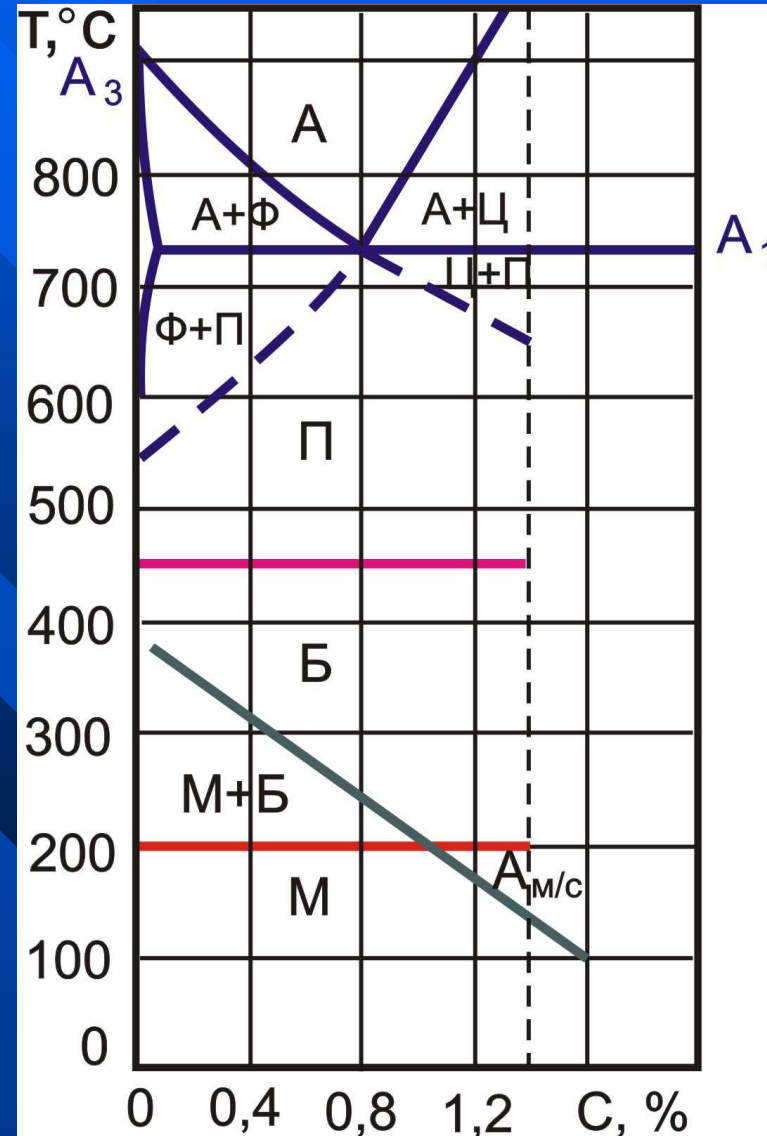
## 7.1.1. Способы закалки с полиморфным превращением

- Борьба с напряжениями при закалке можно, регулируя скорость охлаждения. При этом подбирается одна охлаждающая среда или две. *Непрерывной* называется закалка с непрерывным охлаждением в одной среде. Закалка стали с охлаждением в двух средах называется *прерывистой*. В начале идет закалка в среде с большей, а затем – с меньшей охлаждающей способностью.
- В соответствии с тем, какая часть изделия подвергается закалке, она может быть *объемной* или *поверхностной*.
- Различают также следующие виды закалки: *ступенчатая* (для выравнивания температуры по всему сечению изделия и уменьшения остаточных напряжений), *изотермическая (бейнитная)*, *с самоотпуском* (с охлаждением только поверхности или части изделия и отпуском за счет остаточного внутреннего тепла), *с обработкой холодом* (с продолжением охлаждения до температуры ниже 20 °С).



## 7.1.2. Превращение переохлажденного аустенита

- А, Б, М, П, С, Т, Ф, Ц – аустенит, бейнит, мартенсит, перлит, сорбит, троостит, феррит, цементит соответственно – эти буквы показаны в тех концентрационно-температурных областях, где образуются соответствующие фазы и структуры;  $A_{m/c}$  – метастабильный аустенит; верхние штриховые линии ограничивают снизу области образования ферритно-перлитной и цементитно-перлитной структур;
- 1 – прекращение диффузии атомов железа;
- 2 – концентрационная зависимость прекращения диффузии атомов углерода;
- 3 – начало мартенситного превращения (полное прекращение диффузии атомов углерода); справа буквами П, С, Т показана температурная (по переохлаждению) дифференциация перлита по дисперсности

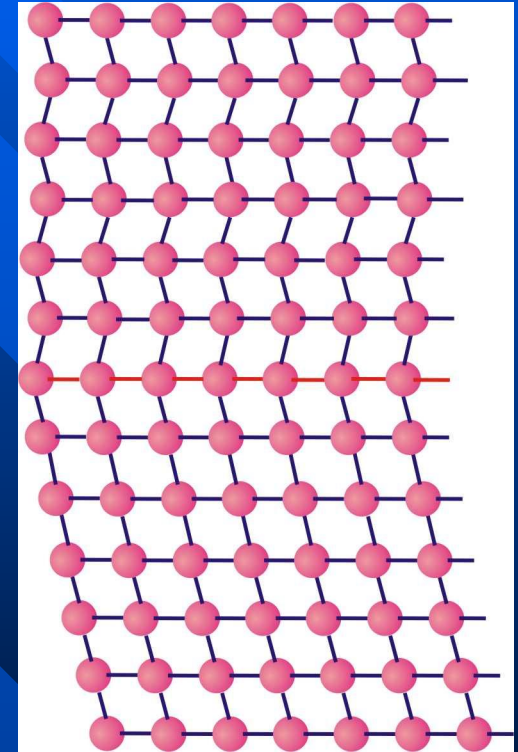


## 7.1.3. Мартенситное превращение

■ *Мартенсит* – неравновесная относительно диффузии микроструктура игольчатого или реечного типа, получаемая в результате закалки стали. Мартенсит представляет собой метастабильный упорядоченный пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в железе и имеет ОЦТ-решетку, получающуюся в результате искажения ОЦК-решетки  $\alpha$ -Fe. *Степень тетрагональности* (отношение высоты призмы к стороне основания:  $c/a$ ) решетки растет с увеличением содержания углерода. Атомы углерода занимают октаэдрические пустоты, вдоль оси  $[001]$  в решетке  $\alpha$ -Fe.

■ Мартенситное превращение происходит путем сдвига, когда диффузия атомов железа и других легирующих элементов отсутствует, а атомов углерода – отсутствует или затруднена.

■ Образующиеся кристаллы мартенсита сопряжены с кристаллами аустенита *когерентно*.



## 7.1.4. Бейнитное превращение

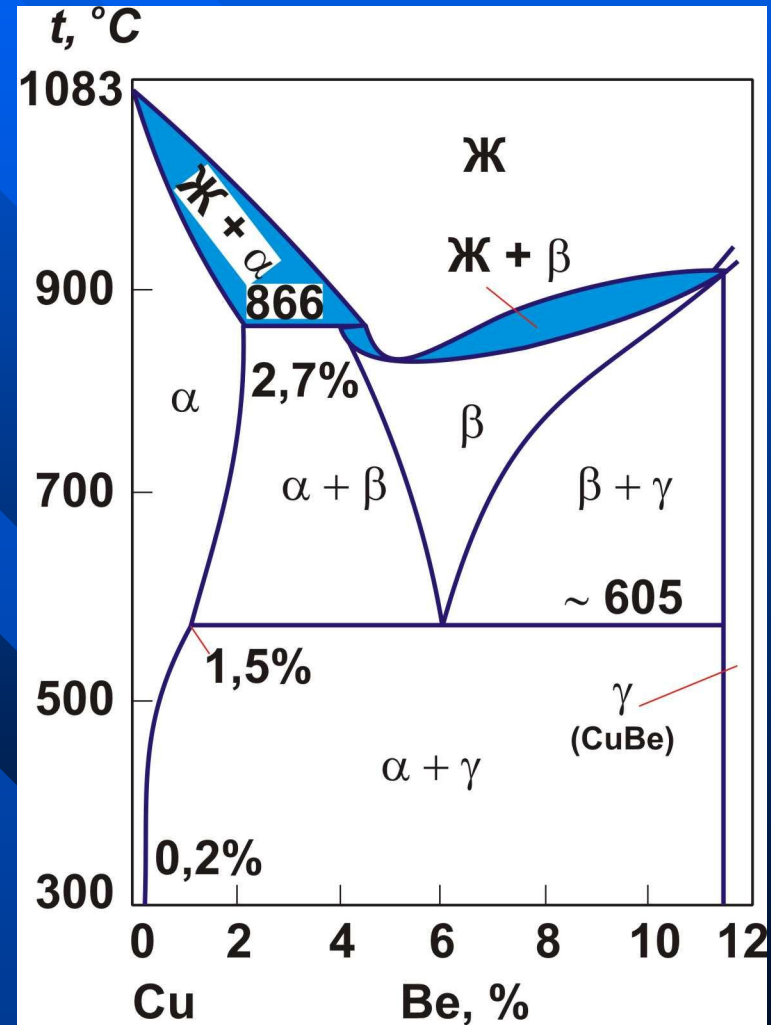
- **Бейнитное (промежуточное) превращение** происходит в интервале температур, когда диффузия атомов железа уже отсутствует, а диффузия атомов углерода достаточно сильна.
- Структура **бейнита** представляет собой двухфазную смесь феррита и цементита очень оригинальной структуры. Особенность бейнитного превращения в том, что оно происходит частично по бездиффузионному механизму. Из обогащенного углеродом аустенита выпадает карбидная фаза, а обедненный углеродом аустенит по мартенситному механизму превращается в несколько пересыщенный  $\alpha$ -твердый раствор. Из мартенситно сформированной  $\alpha$ -фазы также выделяется карбид.
- Различают **верхний**, образовавшийся при 400÷500 °С, и **нижний**, образовавшийся при более низких температурах, бейнит. Верхний бейнит имеет перистое строение, а нижний – пластинчатое (игольчатое). Комплекс механических характеристик у верхнего бейнита заметно хуже, чем у нижнего.

## 7.2. Закалка без полиморфного превращения

### ■ *Закалка без полиморфного превращения*

заключается в нагреве сплава до температуры распада избыточных фаз, выдержке и последующем быстром охлаждении с целью предотвращения выделений из пересыщенного твердого раствора. Этот вид закалки широко применяется для сплавов цветных металлов.

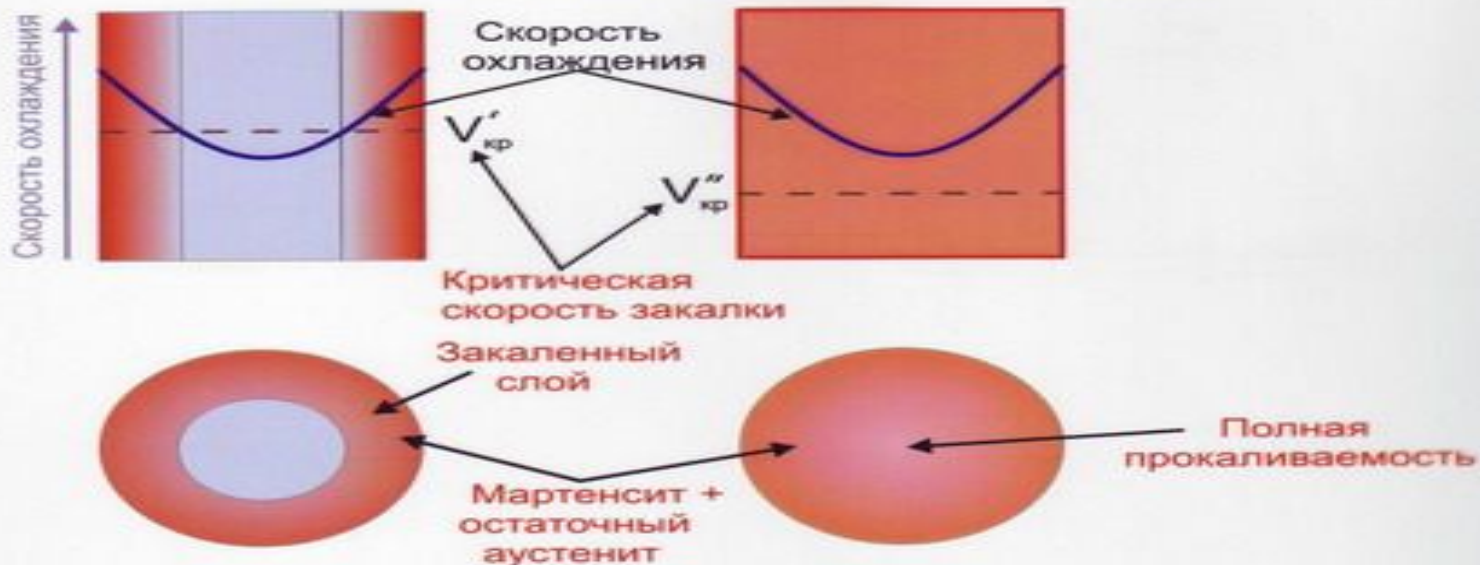
■ Разновидностью закалки без полиморфного превращения можно считать *закалку от субкритических температур* (ниже  $A_{c1}$ ), которая используется с целью получения оптимального уровня и распределения остаточных напряжений; а также для уменьшения автодеформирования изделий после последующей закалки по обычному режиму.



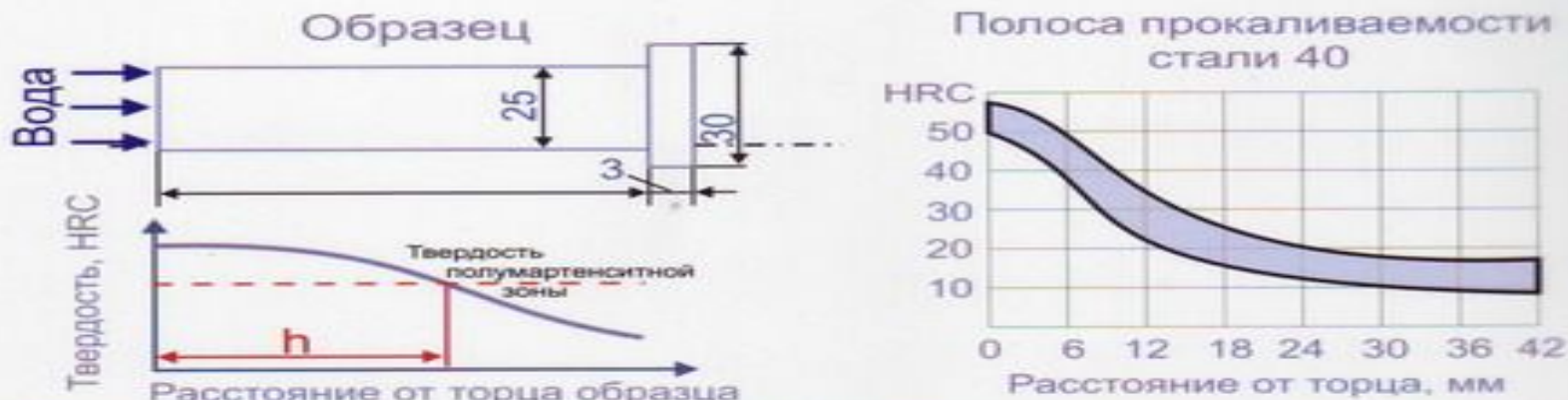


# Прокаливаемость стали

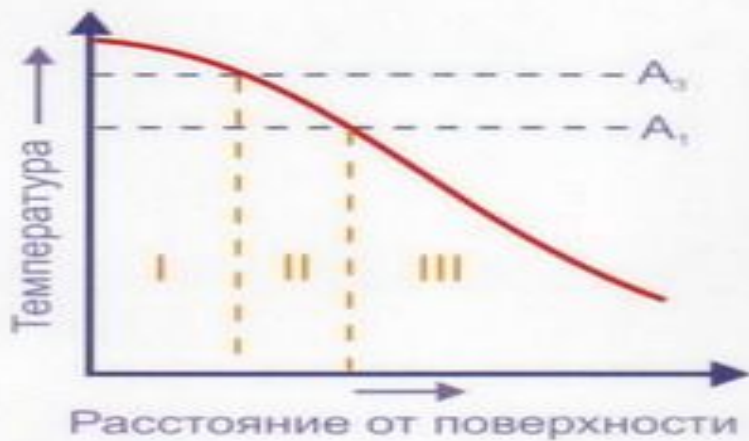
Под прокаливаемостью понимают глубину проникновения закаленной зоны



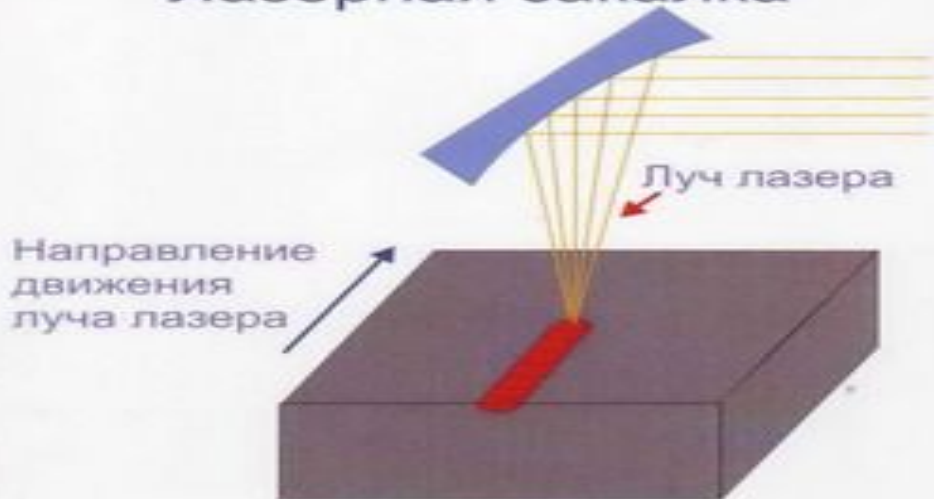
Определение прокаливаемости методом торцевой заковки



# Поверхностная закалка



## Лазерная закалка



## Закалка с нагревом ТВЧ



Сталь 20



# Высокотемпературная термомеханическая обработка (VTMO)

**VTMO** заключается в совмещении горячей деформации, осуществляемой в аустенитном состоянии, с последующей закалкой на мартенсит и окончательном отпуске. При проведении VTMO рекристаллизация горячедеформированного аустенита должна быть исключена.



Деформацию прокаткой, ковкой, или штамповкой проводят при 850-950°C с обжатиями 20-40%. VTMO повышает пределы текучести и прочности на 150-250 МПа, циклическую прочность на 10-25%. Одновременно могут расти пластичность, ударная вязкость, сопротивление хрупкому разрушению

VTMO является эффективным методом ослабления интеркристаллитных видов хрупкости сталей



Сталь 37ХНЗА

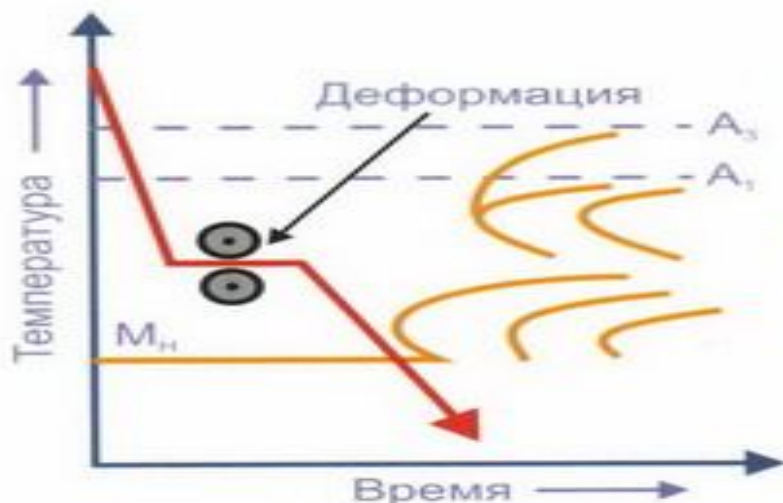
Аустенитизация при 1000°C, отпуск длительностью 1 час.

VTMO с деформацией при 900°C на 20%.

Обычная термическая обработка

# Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО)

**НТМО** заключается в совмещении интенсивной пластической деформации переохлажденного аустенита в температурном интервале его высокой устойчивости, с последующей закалкой на мартенсит и отпуском.



Деформацию прокаткой, экструзией или волочением проводят при 600–400°C с обжатиями 70–95%.  
Для легированных сталей НТМО позволяет получить высокий уровень прочностных свойств.

Свойства сталей после отпуска при 220°C

Марка стали	Обработка	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
37ХН3А	Обычная термообработка	1300	1900	6
	НТМО с деформацией при 525°C на 70% прокаткой	2600	2800	5
40ХН5С	Обычная термообработка	1300	1900	—
	НТМО с деформацией при 525°C на 70% прокаткой	2600	3300	6



# 8. Отпуск

- **Отпуск** является конечной операцией термической обработки, проводится после закалки с полиморфным превращением для уменьшения внутренних напряжений и получения более устойчивой структуры. Он основан на процессах распада мартенсита и остаточного аустенита.
- Напряжения в закаленных изделиях снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска. Уменьшение скорости охлаждения ведет к снижению остаточных напряжений. Охлаждение после отпуска проводят в воде, масле или на воздухе. Ускоренное охлаждение после отпуска при  $550\div 600$  °С повышает предел выносливости за счет образования в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия.
- Отпуск стали бывает трех видов: **высокий** ( $500\div 680$  °С, сорбит отпуска – **смягчающий отпуск** или мартенсит отпуска, характеризующийся вторичным твердением – **упрочняющий отпуск**), **средний** ( $250\div 500$  °С, троостит отпуска или троостито-мартенсит, уменьшение остаточных напряжений) и **низкий** (ниже  $250$  °С, мартенсит отпуска, уменьшение остаточных напряжений).

# 9. Старение

- Под **старением** понимается изменение структуры сплава вследствие выделения из твердого раствора дисперсной фазы во время вылеживания изделий при комнатной (**естественное**) или повышенной (**искусственное**) температуре.
- **Термическое старение** протекает в результате изменения растворимости углерода в  $\alpha$ -Fe в зависимости от температуры. Быстрое охлаждение в низкоуглеродистых сталях с  $650\div 700$  °С приводит к образованию метастабильного пересыщенного феррита. В процессе вылеживания из него будет выделяться углерод в виде *третичного цементита* – **дисперсионное твердение**. Проведение старения при повышенных температурах значительно сокращает длительность процесса.
- При холодной обработке часть феррита пересыщается углеродом или азотом, а в процессе выдержки выделяются карбиды и нитриды – происходит так называемое **деформационное старение**, что ухудшает штампуемость листовой стали.

# Термическая обработка сплавов с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии



Сплавы, состав которых лежит правее точки **F**, могут быть подвергнуты упрочняющей термической обработке, включающей **истинную закалку** и **старение**.

При **истинной закалке** быстрым охлаждением фиксируют **высокотемпературное** состояние сплава. При этом возникает пересыщенный твердый раствор.

Для сплава состава **C<sub>1</sub>** закалка с температуры **t<sub>1</sub>**, обеспечивает получение однофазного состояния (**α**). При закалке сплава состава **C<sub>2</sub>** фиксируются две фазы: пересыщенный **α**-твердый раствор состава **K** и **β**-фаза, нерастворившаяся при нагреве под закалку.

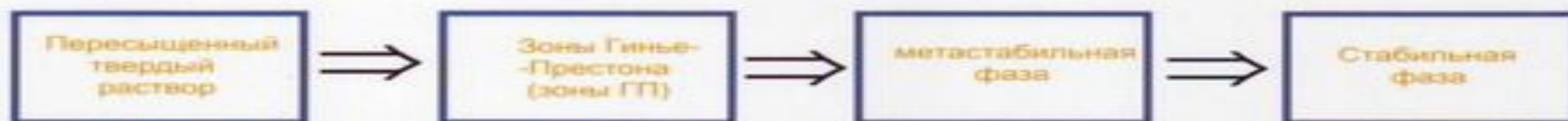


# Старение сплавов с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии

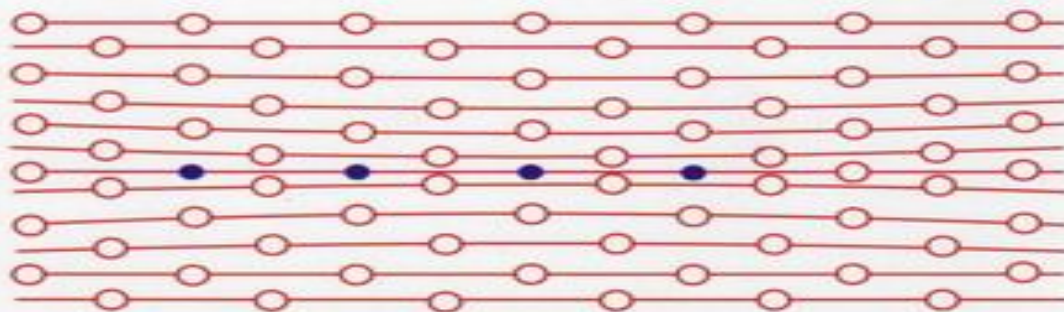
*Старением* называется операция термообработки, при которой происходит распад пересыщенного твердого раствора.

Старение, проводимое при повышенных температурах, называется *искусственным*, а при комнатной температуре - *естественным*.

Стадии распада пересыщенного твердого раствора при старении



Модель зоны Гинье-Престона в сплавах системы **Al - Cu**

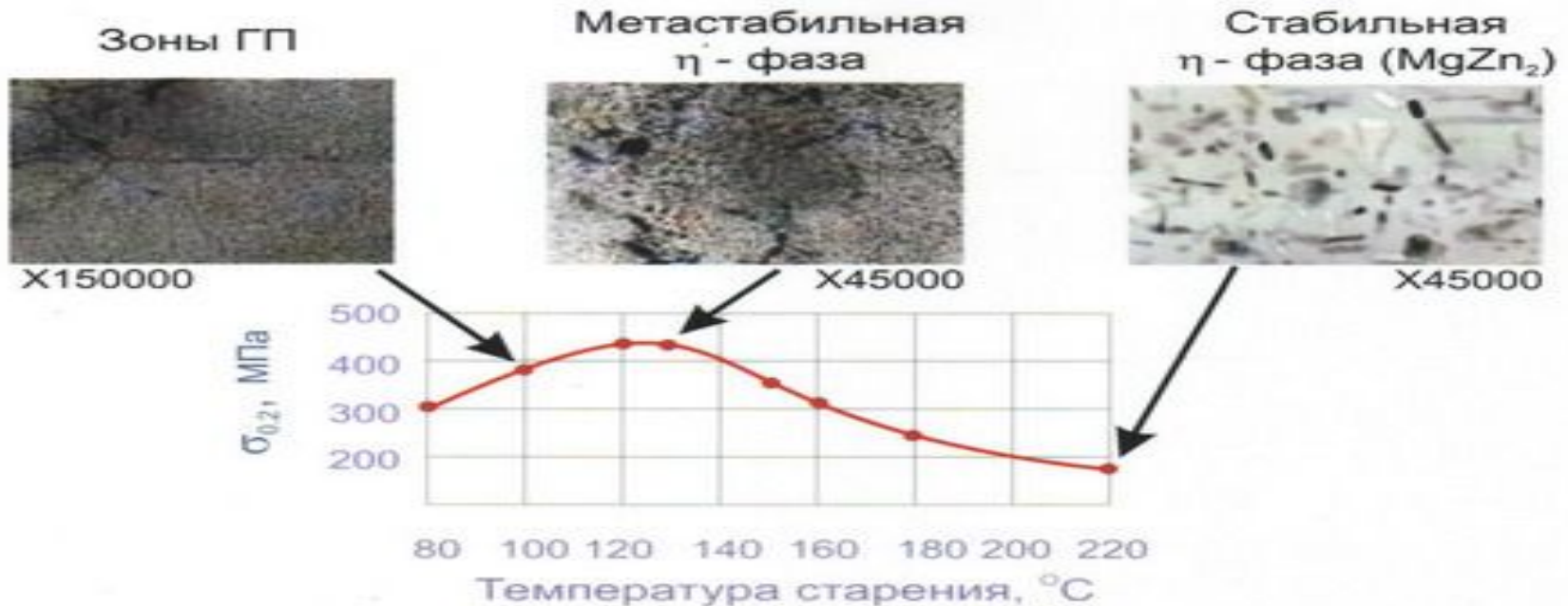


- - атомы растворителя (Al)
- - растворенные атомы (Cu)

# Изменение механических свойств при старении

Упрочнение закаленного сплава при старении называется *дисперсионным твердением*.

Сплав системы Al-Zn-Mg (старение 12 ч.)



Наибольшее упрочнение стареющих сплавов достигается на стадии образования зон ГП и метастабильных фаз. Происходящее вслед за упрочнением понижение прочности при старении называется *перестариванием*. Оно связано с образованием стабильных фаз и коагуляцией выделений.

*Коагуляция (коалесценция)* - процесс роста более крупных частиц за счет растворения более мелких.



# Химико-термическая обработка

- это технологический процесс, при котором некоторыми элементами насыщается поверхностный слой стальных деталей с целью изменения его химического состава, а следовательно, структуры и свойств.

Различают три стадии химико-термической обработки:

- **диссоциация** - процесс, протекающий во внешней среде и приводящий к выделению диффундирующего элемента в атомарном состоянии;
- **адсорбция** диффундирующего элемента поверхностью металла и растворение его в металле;
- **диффузия** элемента вглубь насыщаемого металла.

Толщина слоя  $L$  зависит:

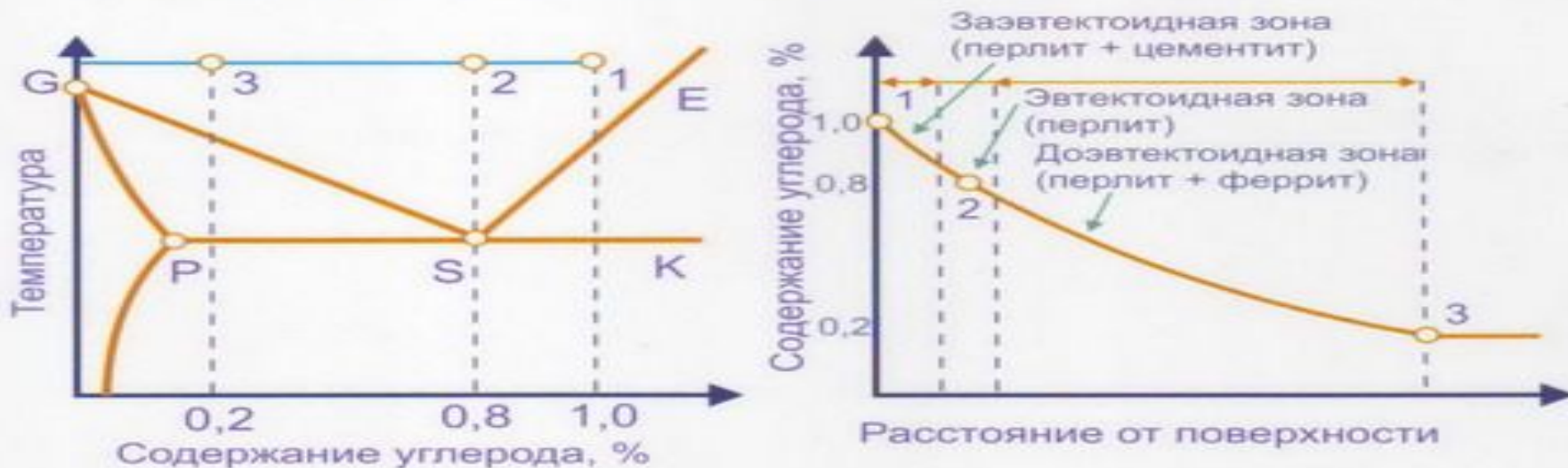
- от продолжительности насыщения  $\tau$ . При  $t = \text{const}$   $L = k_1 \sqrt{\tau}$ .
- от температуры. При  $\tau = \text{const}$   $L = k_2 e^{-Q/RT}$  (где  $Q$  - энергия активации диффузионных процессов).

Толщина слоя тем больше, чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности.

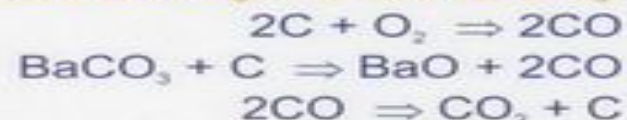


# Цементация стали

- процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом.  
Такой обработке подвергают стали с 0,10 - 0,20% С.  
Содержание углерода в поверхностном слое - 0,8 - 1,0% С.  
Толщина науглероженного слоя - 0,5 - 2,0 мм.



**Цементация в твердом карбюризаторе.** Процесс осуществляют при 910-930°C в карбюризаторе, состоящем из **древесного угля, 20-25% BaCO<sub>3</sub> и 3-5% CaCO<sub>3</sub>.**



**Газовая цементация** проводится при 930-950°C с использованием природного газа или жидких углеводородов (бензола, керосина ...).





# Термическая обработка цементованных изделий

Она заключается в закалке и низком отпуске. После такой термической обработки твердость поверхностного слоя детали достигает **58-62 HRC** при твердости сердцевины **25-35 HRC** и ниже.

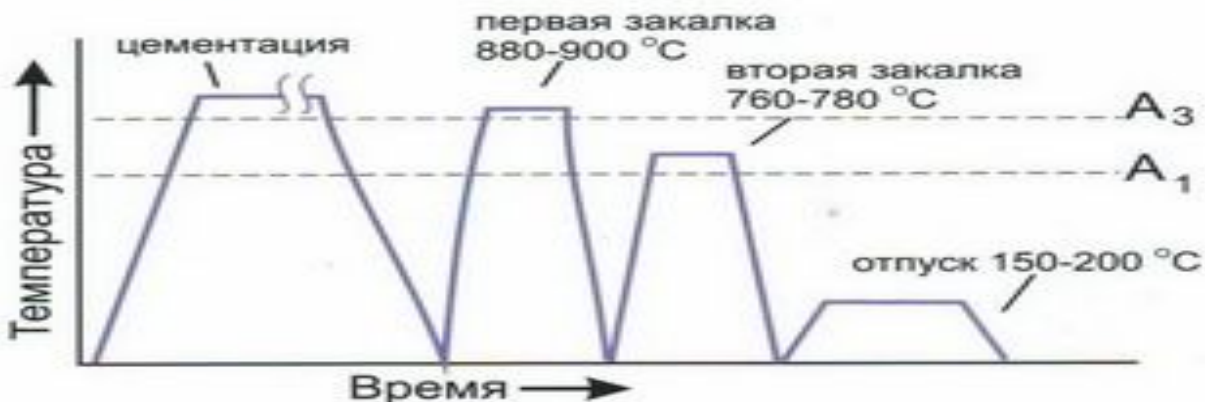
## Закалка с цементационного нагрева.



## Однократная закалка



## Двойная закалка





# Азотирование стали

**Азотирование** - процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей азотом.

Диаграмма Fe - N



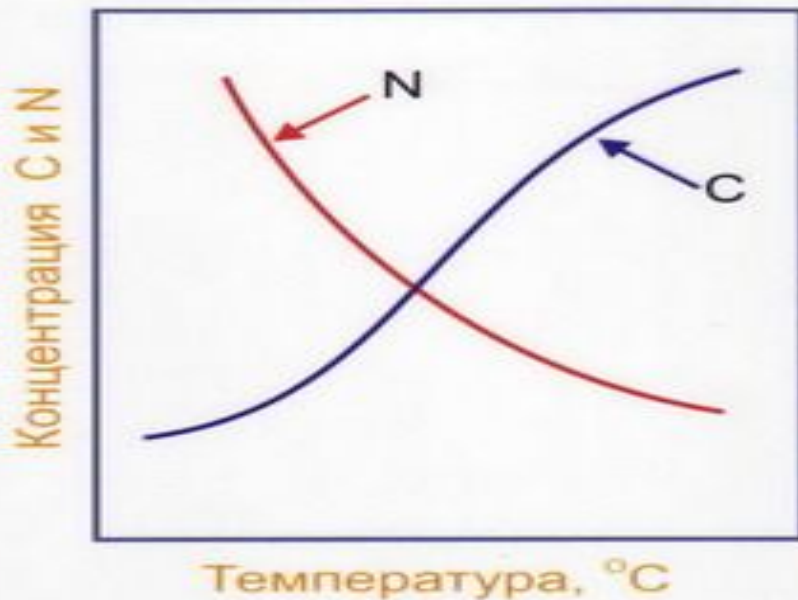
$\alpha$  – азотистый феррит  
 $\gamma$  – азотистый аустенит  
 $\gamma'$  – нитрид Fe<sub>4</sub>N  
 $\epsilon$  – нитрид Fe<sub>3</sub>N

Азотирование проводят в среде аммиака:  
 $2\text{NH}_3 \Rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$   
Температура азотирования 500 - 600°C  
Толщина слоя 0,3 - 0,6 мм



# Нитроцементация стали

**Нитроцементация** - процесс совместного насыщения поверхности стальных деталей углеродом и азотом. Она проводится либо в расплавленных цианистых солях ( жидкостная нитроцементация или цианирование) либо в смеси науглероживающих газов и аммиака ( газовая нитроцементация)



Различают высокотемпературную и низкотемпературную нитроцементацию.

## Высокотемпературная нитроцементация

Температура процесса: 820 - 960°C

толщина диффузионного слоя -  
- 0,15 - 2,00 мм

После нитроцементации производят закалку и низкий отпуск.

Твердость диффузионного слоя после термической обработки **58 - 62 HRC**.

## Низкотемпературная нитроцементация

Температура процесса: 560 - 580°C

толщина диффузионного слоя -  
- 0,2 - 0,6 мм.

Перед низкотемпературной нитроцементацией проводится **улучшение** - термическая обработка состоящая из закалки и высокого отпуска.

В основе жидкостной нитроцементации лежат следующие основные химические реакции:

