

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Основы термической обработки стали.

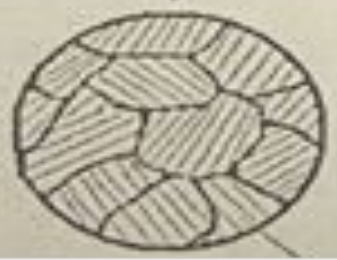
Термической обработкой сплавов системы железо-цементит называют совокупность операций нагрева и охлаждения сплавов с целью изменения фазового состава и размера зерна и получения заданных механических свойств.

За счет термической обработки, можно не меняя химического состава стали изменять её свойства в очень широком пределе.

(Так например сталь 40 (конструкционная качественная сталь, содержащая 0,4 % С), отожженная имеет твердость 150 НВ, а закаленная 600 НВ).

- Теория термобработки опирается на критические точки (точки Чернова), которые имеют особые обозначения:
- $A_0 = 210 \text{ } ^\circ\text{C}$ – граница ферромагнитности Fe_3C
- $A_1 = 727 \text{ } ^\circ\text{C}$ – линия PSK на диаграмме железо-цементит
перлит \leftrightarrow *аустенит*
- $A_2 = 768 \text{ } ^\circ\text{C}$ – точка Кюри, граница ферромагнитности железа.
- A_3 - линия GS на диаграмме – граница превращения
феррит \leftrightarrow *аустенит* $\alpha - \gamma$
- $A_4 = 1392 \text{ } ^\circ\text{C}$ линия NJ на диагр. *аустенит* \leftrightarrow *феррит*
- A_{cm} – граница *цементитного превращения ES*
(выделение вторичного цементита)

- При нагреве добавляется индекс c (например $Ac3$)
- при охлаждении индекс r (например $Ar1$)
- При помощи *химико-термической обработки* можно упрочнять только поверхностный слой металла, насыщая его различными компонентами, оставляя сердцевину без изменения.



Цементит

Изменение структуры стали при нагреве.

- Если нагреть сталь до температуры 727°C , то входящий в её структуру перлит превратится в аустенит. (*1 точка Чернова*)
- При дальнейшем нагреве у доэвтектоидных сталей в аустените будет растворяться феррит, а у заэвтектоидных - цементит. (*Ц II*).
- Растворение закончится при температурах, соответствующих линии *GSE* и сталь принимает *аустенитную структуру*.
- При проведении термообработки сталь обычно нагревают на 30-50 градусов выше линии *GSE* и делают выдержку для выравнивания состава во всех зернах.
- ***Таким образом, главная цель нагрева –***

Охлаждение при термообработке.

- Охлаждение при термообработке производится в газообразных или жидких охлаждающих средах, выбираемых таким образом, чтобы получить требуемую скорость охлаждения. От скорости охлаждения зависит в какую структуру превратится аустенит при охлаждении.

Медленное охлаждение:

- Производится вместе с печью.
- При медленном охлаждении аустенит распадается на грубую крупнопластинчатую смесь, состоящую из пластинок феррита и цементита – **перлита**.
- **Перлит** имеет твердость *180-200 НВ*

Ускоренное охлаждение:

- *Охлаждение на воздухе.* Распад аустенита происходит при более низких температурах, получается более тонкая смесь пластинок феррита и цементита – называемого **сорбитом** (250 HB)
- *Охлаждение в минеральном масле.* Распад аустенита происходит при еще более низких температурах, получается высокодисперсная смесь пластинок феррита и цементита – **троостит** (300 HB)

При более быстром охлаждении аустенитной структуры (например в воде) можно достичь достаточно большой скорости охлаждения при которой аустенит не успевает распадаться на ферритно – цементитную смесь, а превращается в *пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -Fe*. Этот раствор называют **мартенситом**. Он чрезвычайно тверд и хрупок (600 НВ)

- При быстром охлаждении углерод не успевает диффундировать из ГЦК γ -Fe и остается в ОЦК α -Fe. А поскольку растворимость углерода в ОЦК меньше – то углерод искажает решетку и вызывает внутренние (закалочные) деформации.
- Минимальная скорость охлаждения, при которой обеспечивается превращение аустенита в мартенсит, называют ***критической скоростью закалки.***

- Толщина пластинок феррита и цементита определяет дисперсность структуры и обозначается Δ_0 . Она зависит от температуры превращения. Продукты распада:

- ✓ $\Delta_0 \approx (0,5 \dots 0,7) 10^{-3}$ мм – **перлит**. Образуется при переохлаждении до $T = 650 \dots 700$ °С.

- ✓ $\Delta_0 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ мм – **сорбит**. Образуется при переохлаждении до $T = 600 \dots 650$ °С. Структура мелкодисперсного перлита характеризуется высоким пределом упругости, достаточной вязкостью и прочностью.

- ✓ $\Delta_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ мм – **троостит** (высокодисперсную феррито-цементитную смесь). Образуется при переохлаждении до $T = 550 \dots 600$ °С.

Характеризуется высоким пределом упругости, малой вязкостью и пластичностью

- *Вывод:* Изменяя скорость охлаждения аустенита можно получать материалы с различными свойствами – от мягких и пластичных до твердых и хрупких.

Термическая обработка может быть разупрочняющей, упрочняющей, стабилизирующей, а также иметь специальное назначение.

- *Разупрочняющую* обработку проводят для придания заготовке необходимых технологических свойств (например, обрабатываемость резанием выше при низких твердости и прочности материала),
- *Упрочняющую* – для получения необходимых эксплуатационных свойств детали,
- *Стабилизирующую* – для стабилизации структуры и, таким образом, формы и размеров.

Существует четыре основных вида термической обработки сталей:

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

Отжиг

- **Отжиг** производится для снятия внутренних напряжений, устранения структурной неоднородности, снижения твердости стальных заготовок перед механической обработкой. **При отжиге** доэвтектоидную и эвтектоидную стали нагревают до температуры аустенитного состояния, а заэвтектоидные до аустенитно-цементитного состояния, затем сталь остужают с самой медленной скоростью – вместе с печью, при этом образуется структура из феррита и перлита. Твердость такого металла низкая.

Нормализация

- **При нормализации** – нагревают до температур выше линии GSE, делают выдержку и остужают на воздухе. При этом структура также состоит из феррита и перлита, но зерна несколько мельче – твердость выше.
- Нормализация позволяет получить более мелкозернистую структуру, разрушить цементитную сетку у заэвтектоидной стали и др.

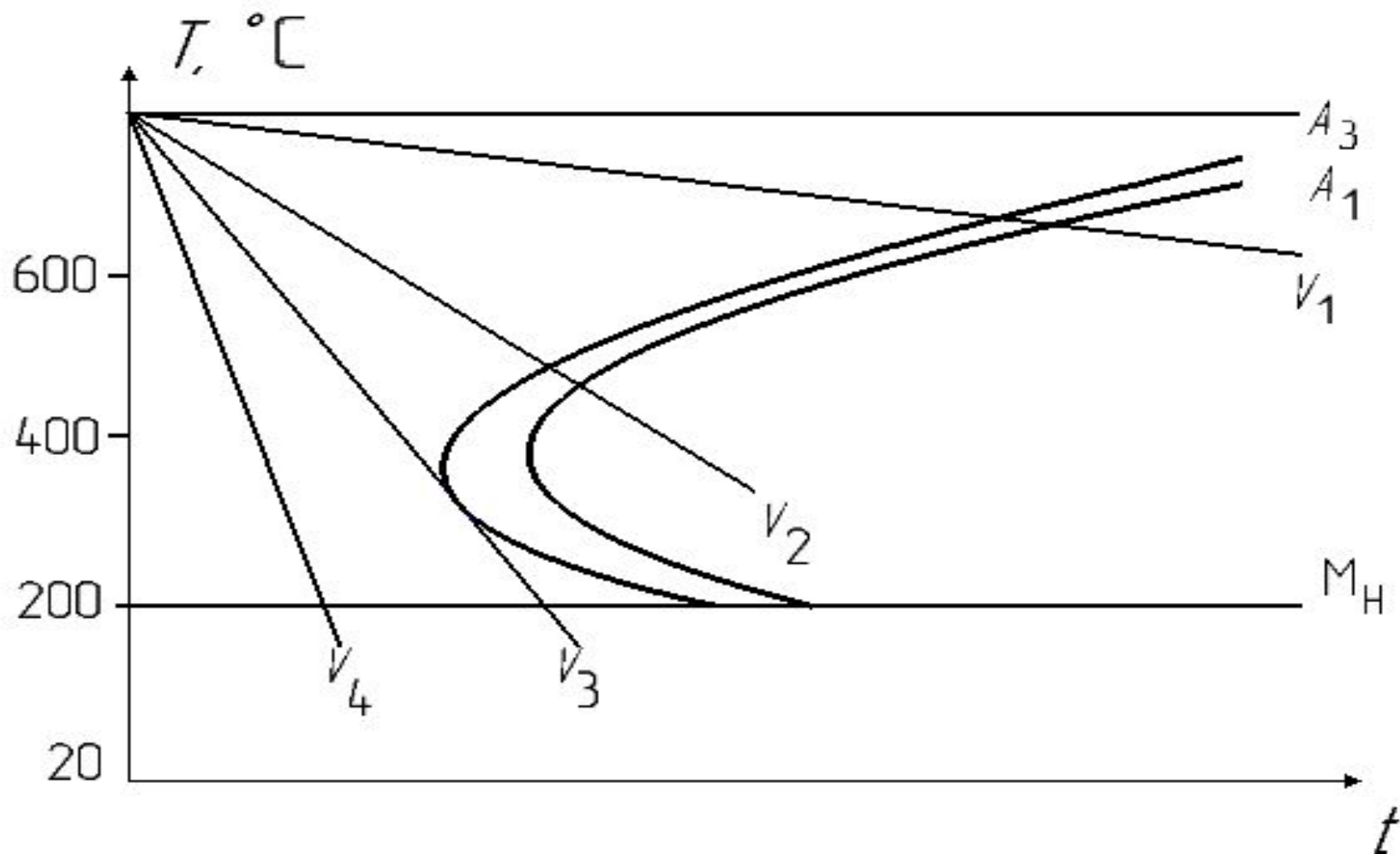
- Для заготовок из **мягкой низкоуглеродистой** стали нормализация в целях экономии времени может заменить отжиг, структура получается более тонкая, а вследствие малого содержания углерода твердость повышается незначительно.
- Средне и высокоуглеродистые стали при нормализации получают структуру *мелкозернистого перлита* (сорбита) прочность при этом повышается.

Закалка

- **Закалка** – является первой операцией из окончательной термообработки изделий. Закалка обеспечивает получение мартенситной структуры. Сталь нагревают на 30-50 градусов выше GSK , выдерживают некоторое время, и остужают в воде, (в соляных растворах или в масле) *Скорость охлаждения самая высокая – должна превышать критическое значение, чтобы переохлажденный аустенит не успел распасться на феррит и цементит.*

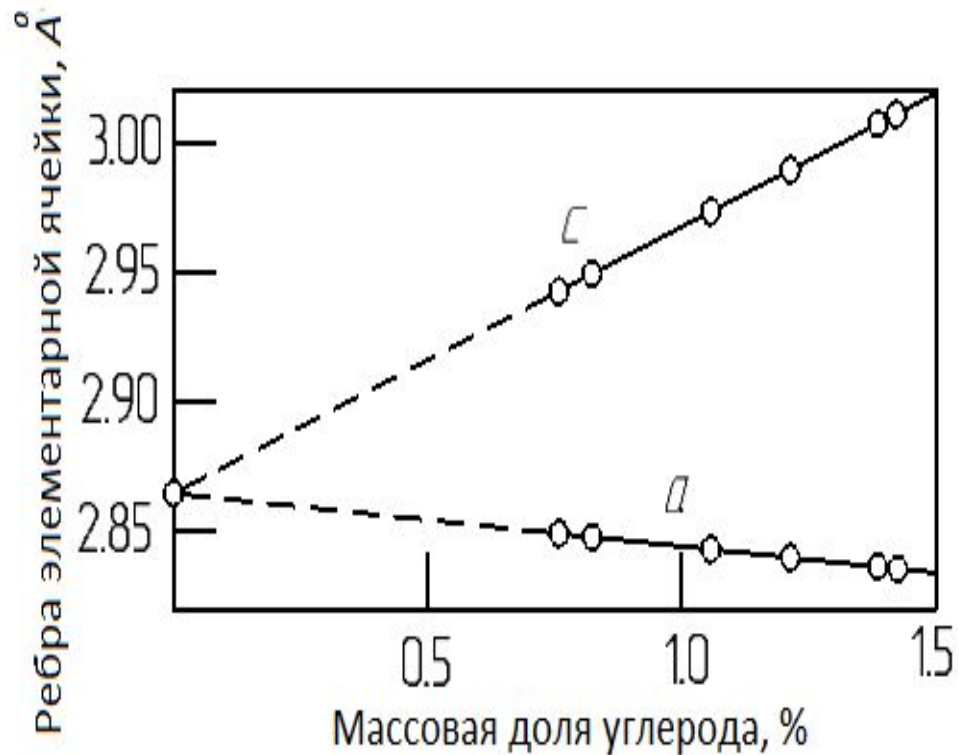
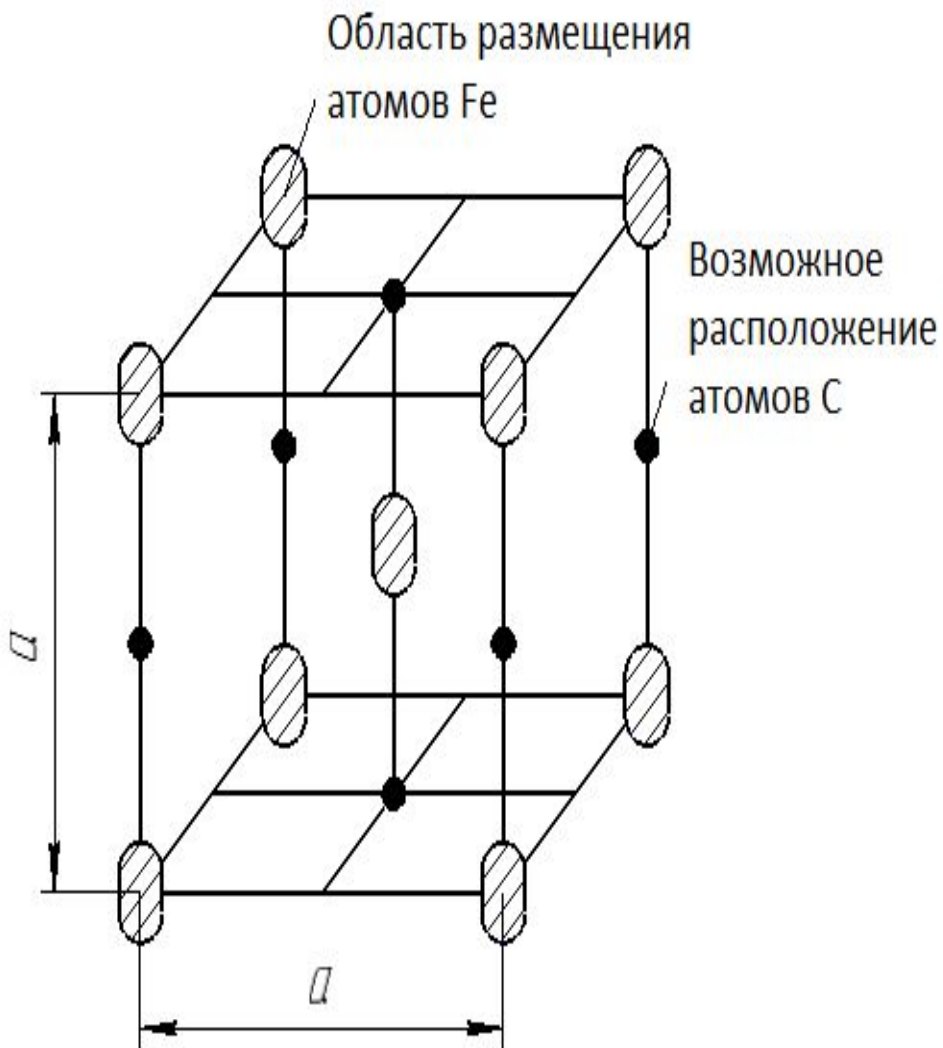
- **Закаливаемость**— Способность стали повышать твердость при закалке. Возрастает с ростом содержания углерода.
- **Прокаливаемость** – способность стали закаливаться на определенную глубину. Зависит от критической скорости охлаждения.
- ***Таким образом для сталей одного и того же состава структуры и твердость после термообработки получаются разными***

Превращение аустенита в мартенсит при высоких скоростях охлаждения.



- Минимальная скорость охлаждения $V_{K'}$ при которой весь аустенит переохлаждается до температуры точки M_n и превращается, называется **критической скоростью закалки.**
- Так как процесс диффузии не происходит, то весь углерод аустенита остается в решетке Fe_α и располагается либо в центрах тетраэдров, либо в середине длинных ребер

Кристаллическая решетка мартенсита (а) и влияние углерода на параметры a и c решетки мартенсита (б)

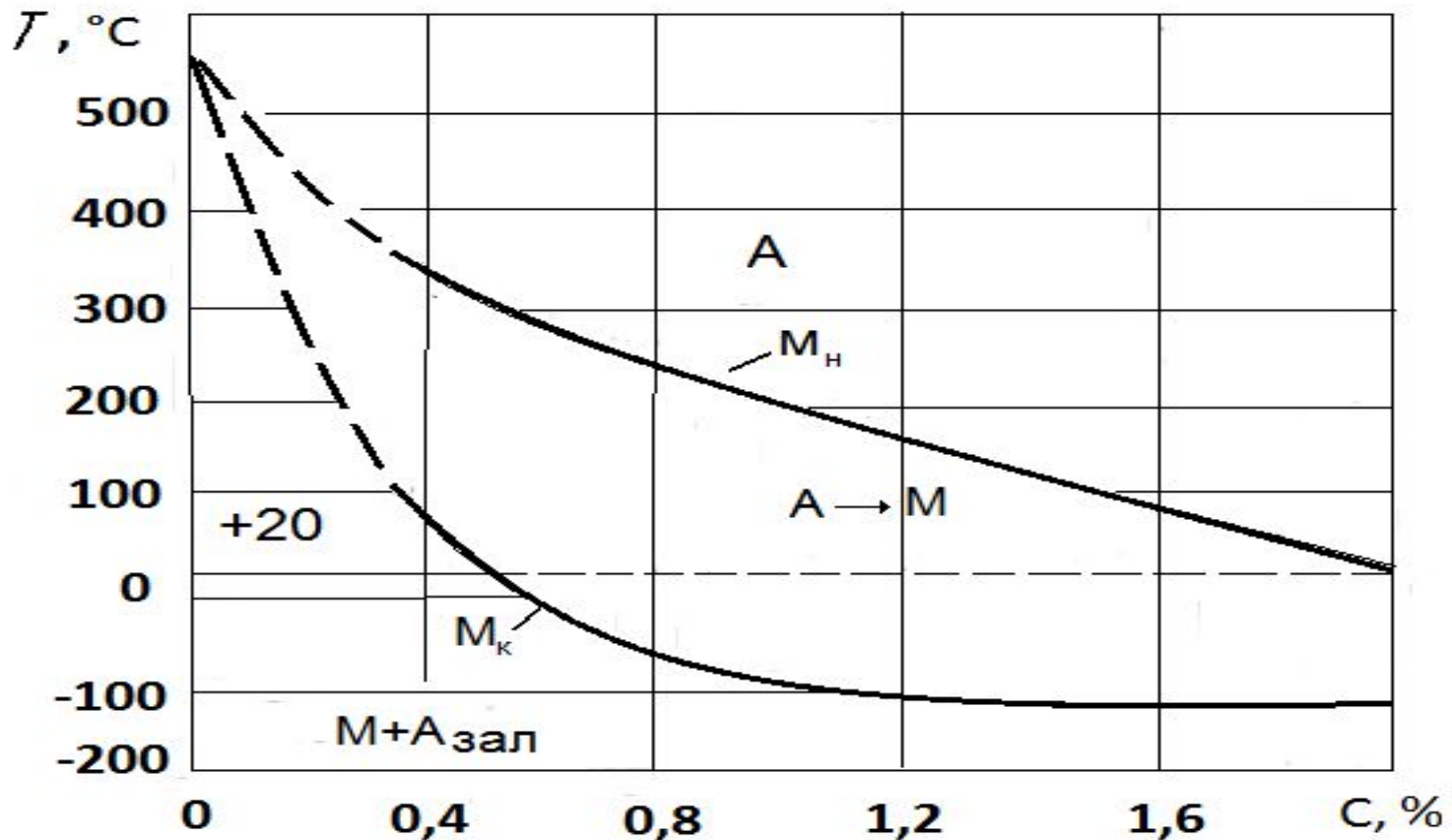


Механизм мартенситного превращения имеет :

1. Бездиффузионный характер. Превращение осуществляется по сдвиговому механизму.
2. Ориентация кристаллов мартенсита. Кристаллы имеют форму пластин, сужающихся к концу, под микроскопом такая структура выглядит как игольчатая.



3. Высокая скорость роста кристалла, до 1000 м/с.
4. Мартенситное превращение происходит только при непрерывном охлаждении.



Температуру начала мартенситного превращения называют **мартенситной точкой M_H** , а температуру окончания превращения – M_K . Температуры M_H и M_K зависят от доли углерода и не зависят от скорости охлаждения.

Для сталей с долей углерода выше 0,6 % M_K уходит в область отрицательных температур.

5. Превращение необратимое. Получить аустенит из мартенсита невозможно. Свойства мартенсита обусловлены особенностями его образования. Мартенсит характеризуется высокой твердостью и низкой пластичностью, что обуславливает хрупкость.

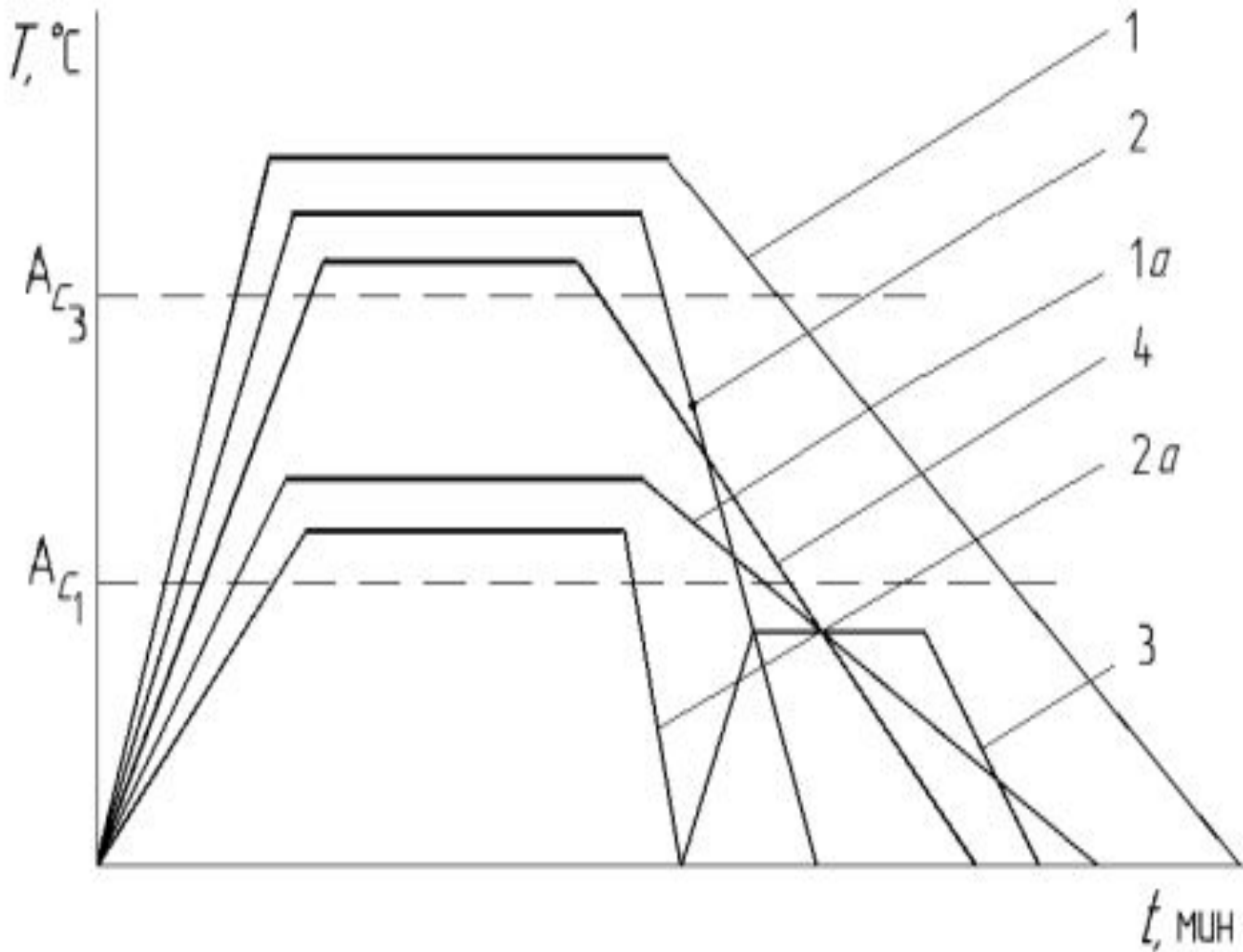
Отпуск

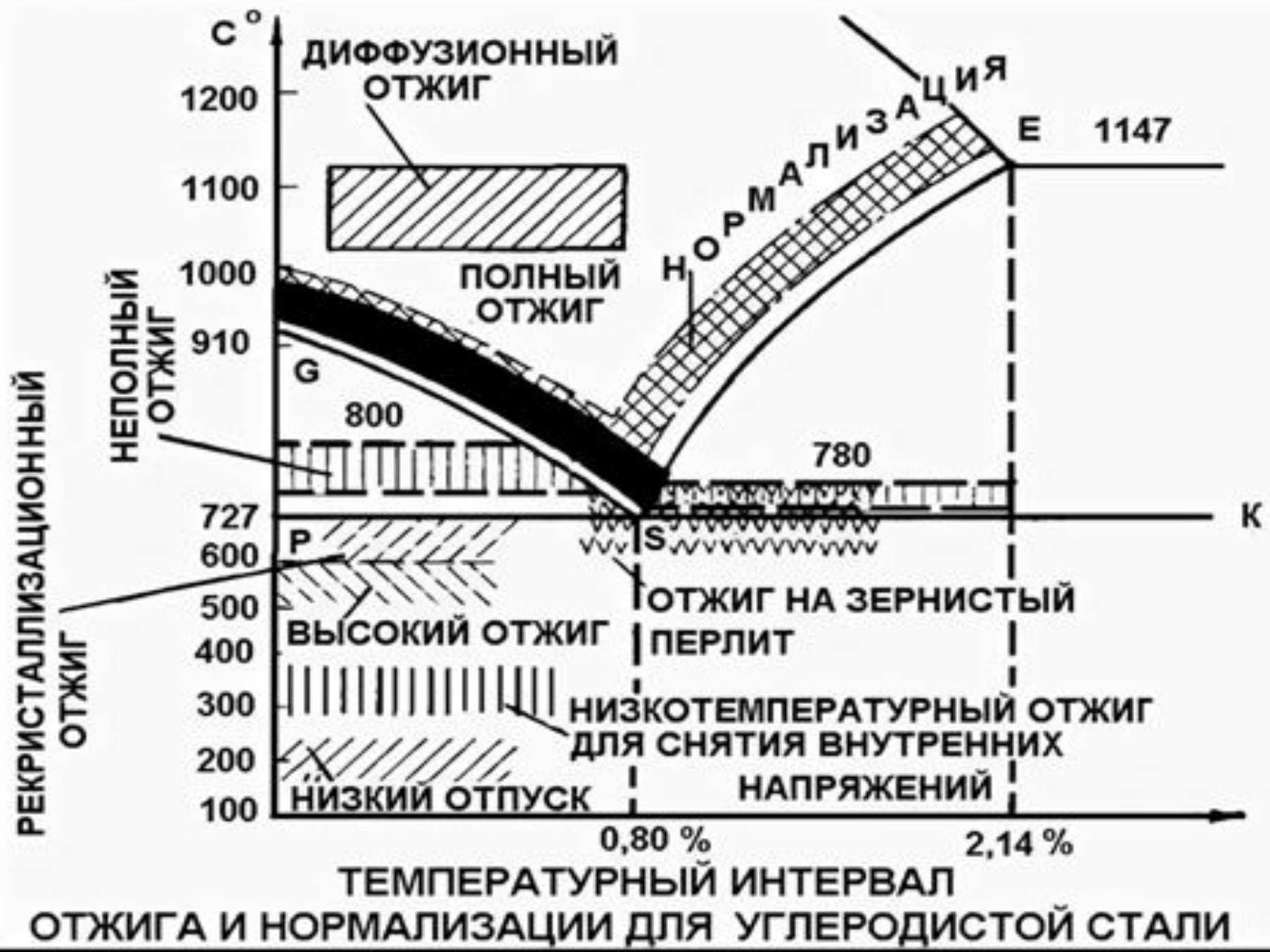
- **Отпуск** – является окончательной термической обработкой.
- Целью отпуска является *трансформирование полученного при закалке мартенсита в структуру с определенными требуемыми свойствами*. При этом происходит повышение вязкости и пластичности, снижение твердости и уменьшение внутренних напряжений закаленных сталей.
- При отпуске сталь нагревают до определенной температуры – меньшей чем 727 0С, выдерживают для завершения необходимых структурно-фазовых превращений и охлаждают с любой скоростью.

- различают три вида отпуска: **низкий** (250 С), **средний** (350-500 С), **высокий** (500-680 С), при этом получаются разные структуры, имеющие различные свойства:
- *Низкий отпуск* с температурой нагрева $T_H = 150 \dots 300^\circ\text{C}$.
- В результате его проведения частично снимаются закалочные напряжения. Получают структуру – **мартенсит отпуска**. (Проводят для инструментальных сталей;)
- *Средний отпуск* с температурой нагрева $T_H = 300 \dots 450^\circ\text{C}$.
- Получают структуру – **троостит отпуска**, сочетающую высокую твердость 40...45HRC с хорошей упругостью и вязкостью. (Используется

- *Высокий отпуск* с температурой нагрева $T_H = 450 \dots 650^\circ\text{C}$.
- Получают структуру, сочетающую достаточно высокую твердость и повышенную ударную вязкость (оптимальное сочетание свойств) – ***сорбит отпуска***.
- Используется для деталей машин, испытывающих ударные нагрузки.
- **Закалку с высоким отпуском** называют **улучшением стали** – т.к. получается наилучшее сочетание твердости, прочности и вязкости.

Графики видов термообработки:
отжига (1, 1а), закали (2, 2а),
отпуска (3), нормализации (4)





Химико-термическая обработка сталей

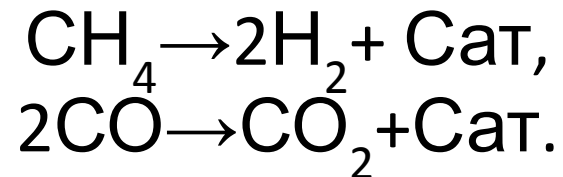
- Многие детали в процессе эксплуатации подвергаются износу. Повышение износостойкости прежде всего связано с повышением твердости поверхности.
- Химико-термическая обработка – процесс насыщения поверхности деталей другими элементами (металлами и неметаллами) путем их диффузии в поверхностные слои при высокой температуре)

- Основными разновидностями химико-термической обработки являются:
- *цементация* (насыщение поверхностного слоя углеродом);
- *азотирование* (насыщение поверхностного слоя азотом);
- *нитроцементация* или *цианирование* (насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом);
- *диффузионная металлизация* (насыщение поверхностного слоя различными металлами).

- **ХТО**– процесс поверхностного насыщения деталей различными элементами путем их диффузии из внешней среды.
- Процесс ХТО состоит из трех стадий:
- **диссоциации**, которая заключается в распаде молекул и образовании активных атомов диффундирующего элемента. Например, диссоциация оксида углерода с образованием атомарного углерода ($2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$), аммиака с образованием атомарного азота ($2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}$);
- **адсорбции** – осаждение активных атомов диффундирующего элемента на поверхности;
- **диффузии** – проникновения насыщающего элемента в глубь металла.

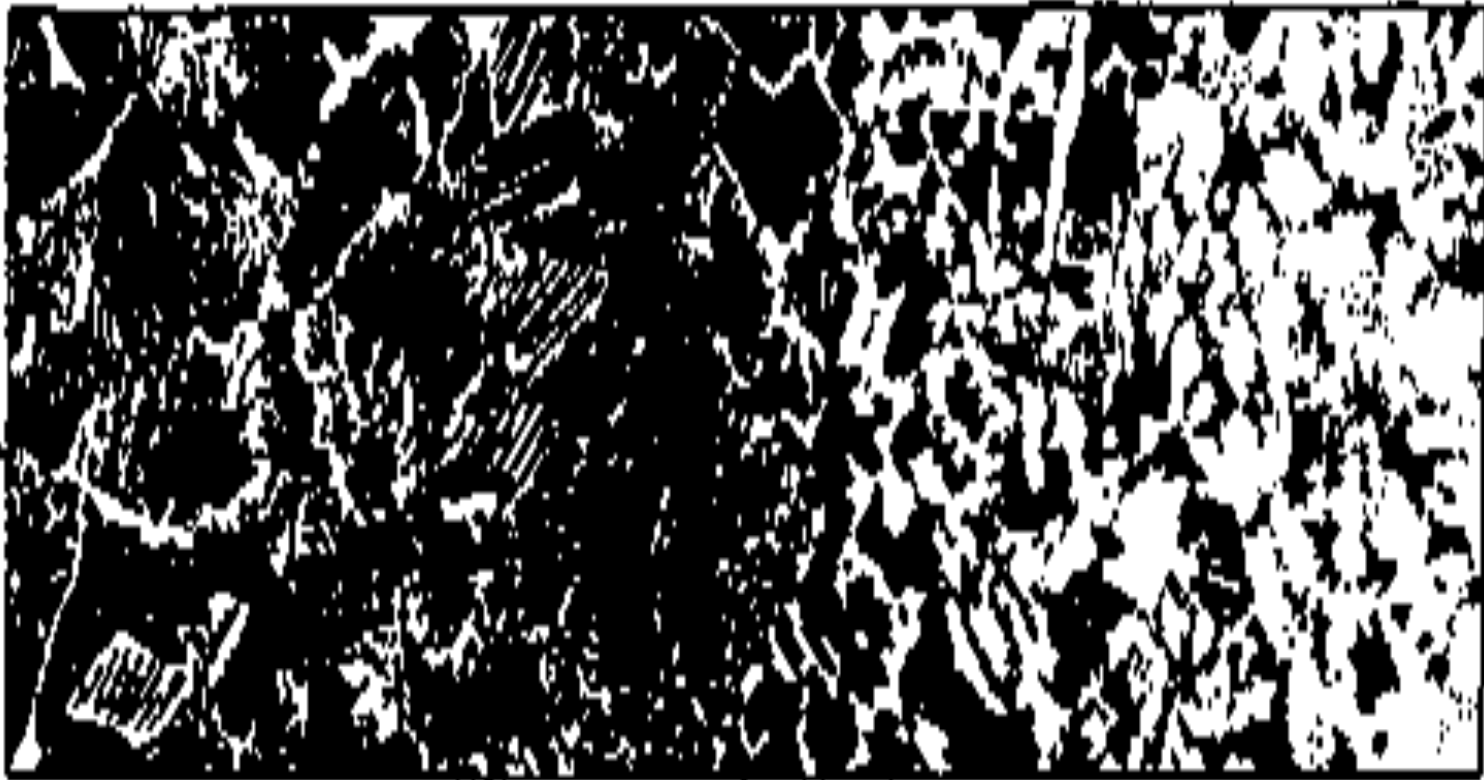
- **Цементация** – ХТО, это диффузионное насыщение поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры **900 – 950 °С**. Цементации подвергают стали с низкой долей углерода (**до 0,25 %**), которые называют **цементируемыми**.
- **Это доэвтектоидные** стали, их структура в равновесном (отожженном) состоянии – феррит (большая часть) и перлит. Твердость и прочность этих сталей низкие, а пластичность и ударная вязкость высокие. Из-за низкой доли углерода они практически не закаливаются.
- Нагрев изделий осуществляют в среде, **карбюризаторе**, содержащих **углерод**, при **900 – 950 °С**, т.е. выше точки **A_{c3}** – в области устойчивого аустенита, легко отдающей углерод. Подобранные режимы обработки, поверхностный слой насыщают углеродом до требуемой глубины.
- **Глубина цементации h** – расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита ($h = 1...2$ мм). **Степень цементации** – средняя доля углерода в

- **Твердая цементация** осуществляется в карбюризаторе, содержащем активированный древесный уголь (70 %) и порошки углекислых солей: BaCO_3 (25 %) для интенсификации процесса и CaCO_3 (5 %) для предотвращения спекания угольных гранул (при значении температуры **930 – 950 °С**)
- **Газовая цементация** характерна для серийного и массового производства. Осуществляется она в среде газов, содержащих углерод. Часто используется карбюризатор, состоящий из смеси метана CH_4 (природный газ) и оксида углерода CO , при диссоциации которых образуется атомарный углерод:



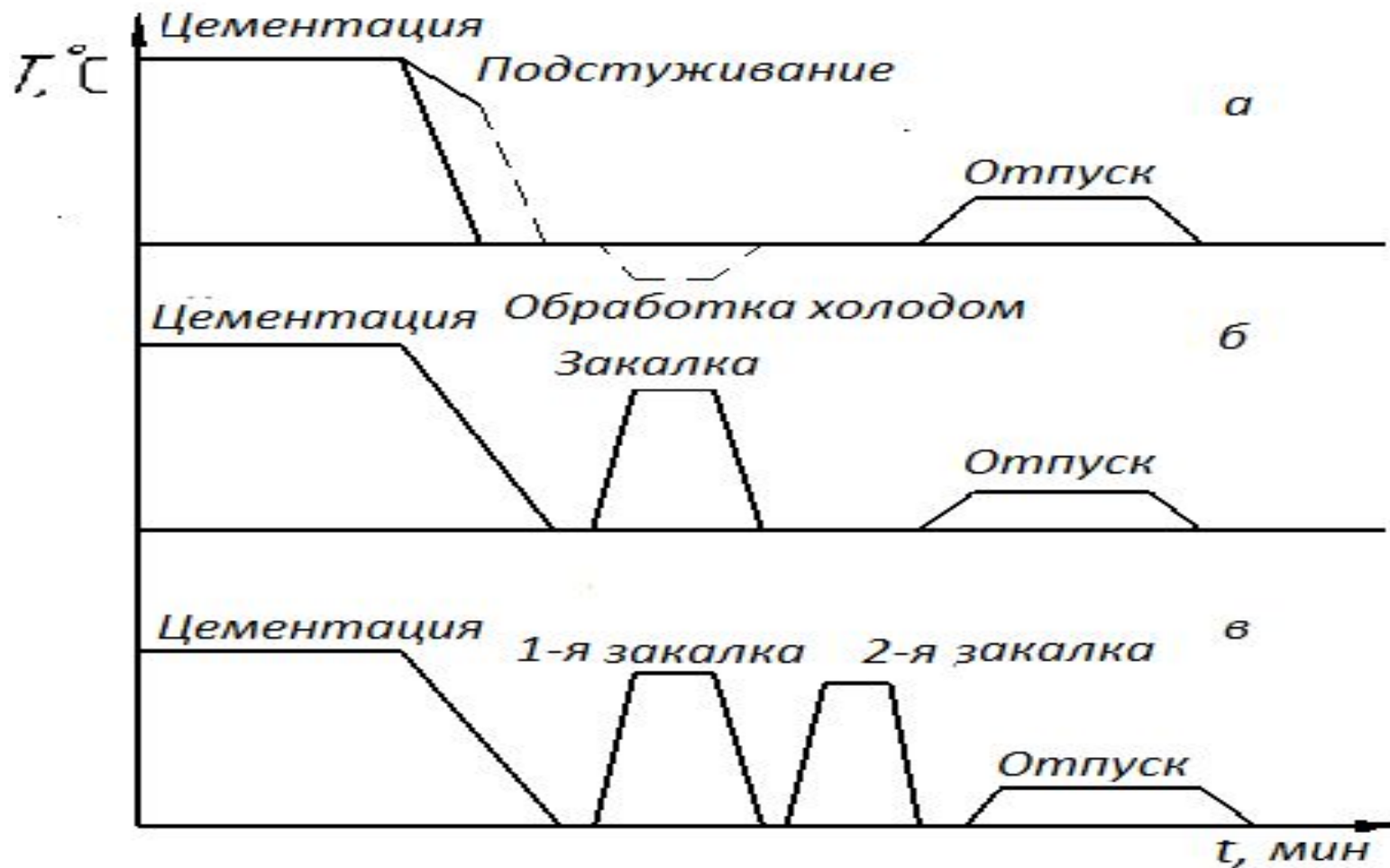
Структура цементованного слоя

Поверхность



Середина

Режимы термической обработки цементованных изделий



- **Азотирование** – это насыщение поверхности стали азотом, при азотировании увеличиваются твердость и износостойкость, и повышается коррозионная стойкость.
- При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак NH_3 с определенной скоростью. При **480 – 560 °C** аммиак диссоциирует по реакции **$2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$** .
- Атомарный азот **поглощается** поверхностью и **диффундирует вглубь** изделия. Растворимость в стали азота больше, чем углерода, – **0,1 % при 591 °C** .
- Для азотирования используют **среднеуглеродистые легированные стали**, содержащие алюминий, молибден, хром, ванадий, потому что углеродистые стали при азотировании практически не упрочняются.
- Азот образует с легирующими элементами нитриды, которые дисперсны и обладают высокой твердостью и термической устойчивостью.

- **Цианирование и нитроцементация** – это процессы диффузионного насыщения поверхностных слоев стальных изделий одновременно углеродом и азотом.
- **Нитроцементация** осуществляется в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака при значениях температуры 840 – 860 °С в течение 2 – 10 ч. При этом получают слой толщиной 0,2 – 0,8 мм с 0,7 – 0,9 % углерода и до 0,3 – 0,4 % азота.
- По сравнению с газовой цементацией нитроцементация имеет преимущества. Более низкие температуры процесса не вызывают рост аустенитного зерна и большие деформации. Остаточный аустенит обеспечивает хорошую прирабатываемость трущихся деталей.
- **Цианирование** выполняется в жидкой среде, состоящей из расплава солей, содержащих в качестве источника углерода и азота цианогруппу CN:
 - цианида натрия NaCN;
 - желтой кровяной соли $K_4Fe(CN)_6$ и некоторых других.
- **Цианирование** проводят путем погружения изделий в ванну, которая наполнена расплавом. Различают высокотемпературное, среднетемпературное и низкотемпературное цианирование.

Преимущества цианирования перед цементацией:

- меньшая продолжительность процесса, более высокая износостойкость упрочненного слоя,
- меньшие деформации и коробление, возможность упрочнения только части детали, погруженной в ванну.

Недостатки процесса цианирования – высокие токсичность и стоимость цианистых солей. Цианирование проводят в специальных помещениях, обеспечивают хорошую вытяжку от зеркала ванн.

- **Диффузионная металлизация** – это процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стали металлами.
- При насыщении хромом процесс называют **хромированием**,
- *алюминием – алитированием*,
- **кремнием – силицированием**,
- *бором – борированием*.
- Диффузионную металлизацию можно проводить в **твердых, жидких и газообразных средах**.

- **При твердой диффузионной металлизации** металлизатором является ферросплав с добавлением хлористого аммония (NH_4Cl). В результате реакции металлизатора с HCl или Cl_2 образуется соединение хлора с металлом (AlCl_3 , CrCl_2 , SiCl_4), которые при контакте с поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.
- **Жидкая диффузионная металлизация** проводится погружением детали в расплавленный металл, например в алюминий.
- **Газовая диффузионная металлизация** проводится в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.

- **Диффузионная металлизация** – процесс дорогостоящий, осуществляется при высоких температурах (1000 – 1200 °С) в течение длительного времени.
- Одним из основных свойств металлизированных поверхностей является жаростойкость, поэтому жаростойкие детали для рабочих значений температуры **1000 – 1200 °С** изготавливают из простых углеродистых сталей с последующим **алитированием, хромированием или силицированием**

- Спасибо за внимание!