



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Материаловедение

Лекция 5: Термическая обработка

Семенова Елена
Инженер-проектировщик 1 категории

29.10.2024

Термическая обработка. Общие положения



Структуру и свойства металлических сплавов можно изменять в широких пределах с помощью термической обработки, т.е. управлять свойствами и их оптимизировать согласно будущим эксплуатационным требованиям.

Цель термической обработки – получение необходимой структуры стали, обеспечивающей требуемый комплекс эксплуатационных свойств. Не все свойства изменяются при термообработке.

Структурно чувствительные свойства – большинство свойств, в т.ч. механические свойства, определяются не только составом, но зависят и от её строения. Твердость и прочность стали могут быть увеличены в результате термической обработки в 3 - 5 раз. Часто ТО для снижения твердости

Структурно нечувствительные свойства практически не зависят от структуры, это характеристики жесткости: модуль нормальной упругости E (изменяется менее чем на 5%), модуль сдвига G .

Изменения свойств стали должны быть остаточными. Чтобы вызвать остаточное изменение свойств сплава, находящегося в устойчивом состоянии до термической обработки, необходимо, чтобы в сплаве произошли превращения. Т.о., **термическая обработка** – процесс изменения структуры стали, цветных металлов, сплавов при нагревании и последующем охлаждении с определенной скоростью.

Любая термическая обработка состоит (как минимум) из трёх операций: **нагрев** до определённой температуры, **выдержка** при заданной температуре и **охлаждение** с заданной скоростью от температуры нагрева до комнатной температуры. Совокупность этих трех операций – **режим термической обработки**.

Важнейшими параметрами режима термической обработки являются:

- температура
- скорость нагрева
- длительность выдержки при заданной температуре
- скорость охлаждения стали

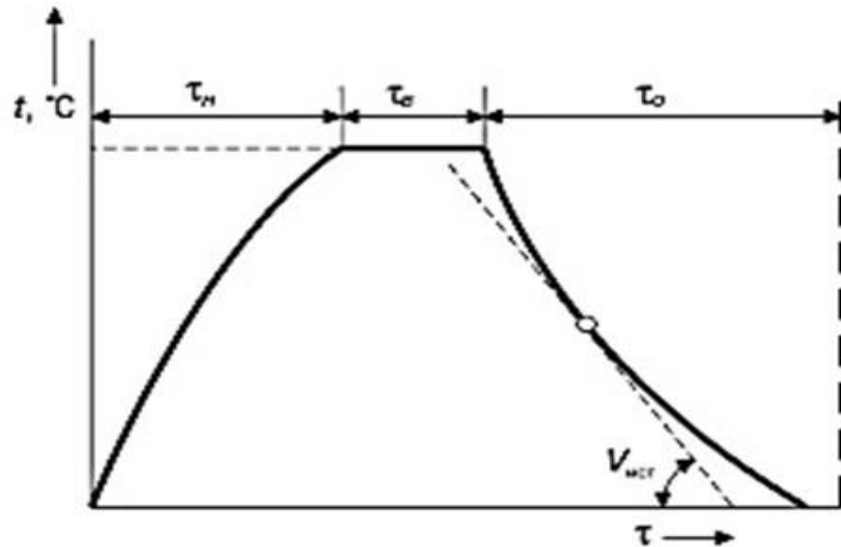
Термическая обработка. Общие положения



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ



Любой процесс термической обработки можно изобразить в виде графика, где по оси ординат откладывается температура, а по оси абсцисс – время. На рисунке приведена элементарная кривая термической обработки



При нагреве всё изделие (или его часть) нагревается до заданной температуры и происходит то или иное изменение структуры. Необходимо помнить, что структурного превращения происходят не только во время нагрева, но и продолжают во время выдержки

При выдержке достигается оптимальное состояние структуры

Охлаждение служит для фиксации оговоренного техническими требованиями структурного состояния и является поэтому весьма важной операцией термообработки. Образующаяся в результате охлаждения структура может быть как конечной, так и промежуточной, получаемой между двумя подпроцессами

Термическая обработка и диаграмма состояний

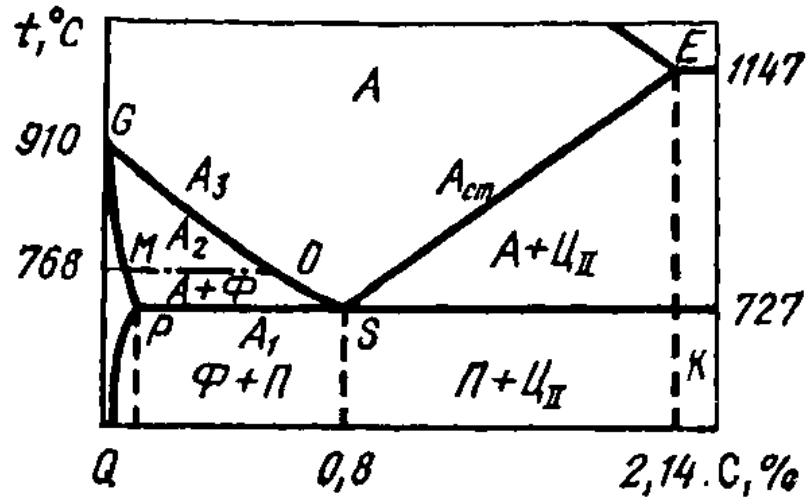


Диаграмма состояния дает ответ, каким видам термической может быть подвергнут сплав и в каких температурных интервалах ее следует производить

Диаграмма показывает структурные превращения, которые протекают в стали при достаточно медленном нагревании и охлаждении ее, когда успевают произойти все превращения, которые могут иметь место в стали

При нагреве и охлаждении в реальных условиях критические точки не полностью совпадают с соответствующими равновесными линиями диаграммы. При нагреве они несколько выше, а при охлаждении – ниже этих линий. Для обозначения точек при нагреве добавляют индекс «с», а при охлаждении – «r»: Ac_1 , Ac_2 , Ac_3 – нагрев; Ar_1 , Ar_2 , Ar_3 – охлаждение

A_1 – линия PSK (727 °C) – превращение П ↔ А

A_2 – линия MO (768 °C, точка Кюри) – магнитное превращение

A_3 – линия GOS (переменная Т, зависит от содержания углерода в сплаве) – превращение Ф ↔ А

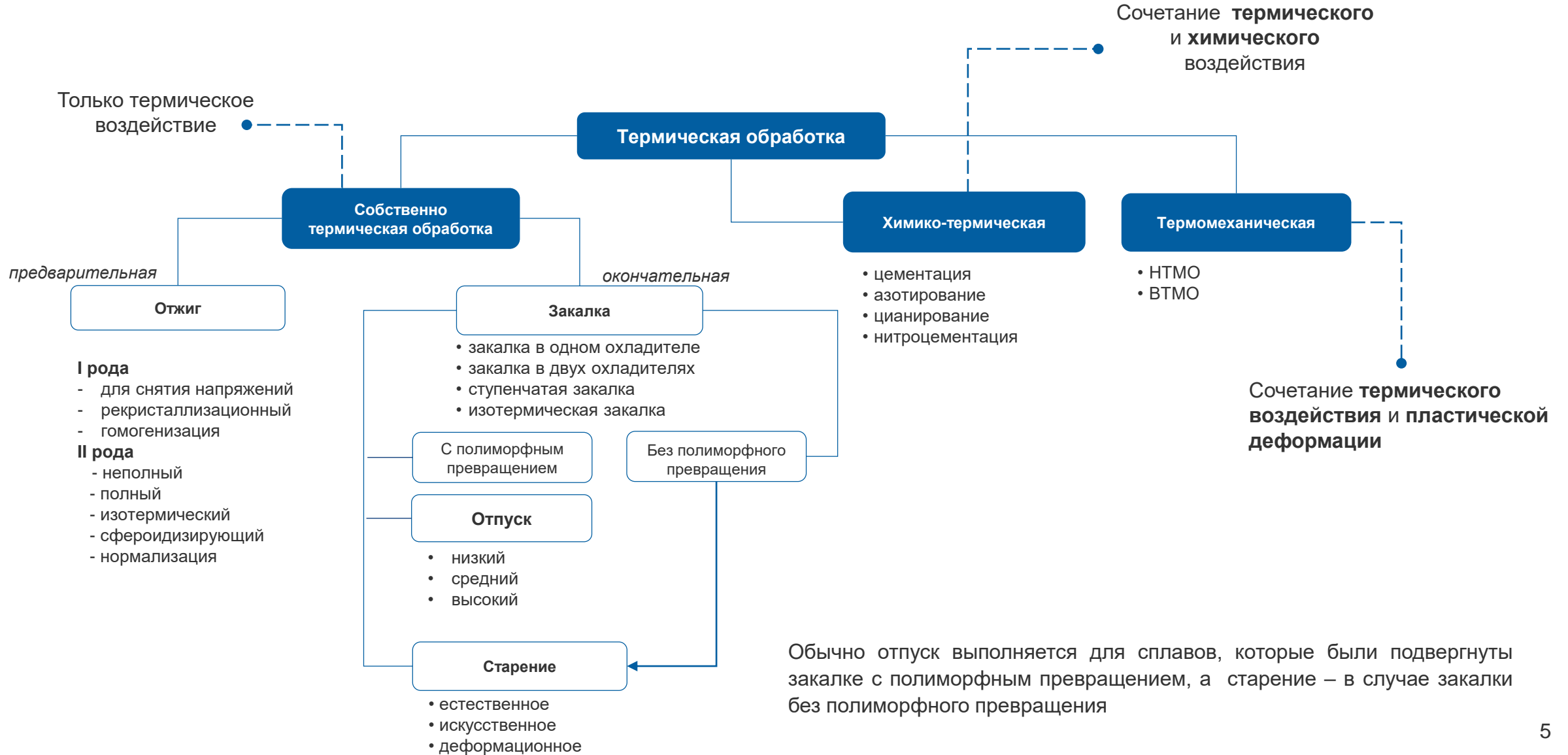
A_4 – линия NJ (переменная Т, зависит от содержания углерода в сплаве) – превращение А ↔ Ф

A_{cm} – линия SE (переменная Т, зависит от содержания углерода в сплаве) – начало выделения C_{II}



Термическая обработка может быть сложной и состоять из многочисленных нагревов, прерывистого или ступенчатого нагрева, охлаждения в области отрицательных температур и т.д.

Термическая обработка. Классификация



Термическая обработка. Классификация



Укрупненно все виды термической обработки в зависимости от назначения разделить на предварительные и окончательные

Предварительная термическая обработка проводится для снятия остаточных напряжений, улучшения обрабатываемости резанием, исправления крупнозернистой структуры, подготовки структуры стали к окончательной термической обработке и т.п. Если предварительная термическая обработка обеспечивает требуемый уровень механических свойств, то окончательная термическая обработка может и не проводиться (кроме нержавеющей сталей). К видам предварительной термической обработки, как правило, относятся: **отжиг, нормализация, улучшение**

Окончательная (упрочняющая) термообработка проводится для придания требуемых эксплуатационных характеристик (прочность, пластичность, твердость, износостойкость и т.д.) поверхностям деталей. К таким операциям относятся: **закалка, отпуск, старение, обработка холодом**

ОТЖИГ

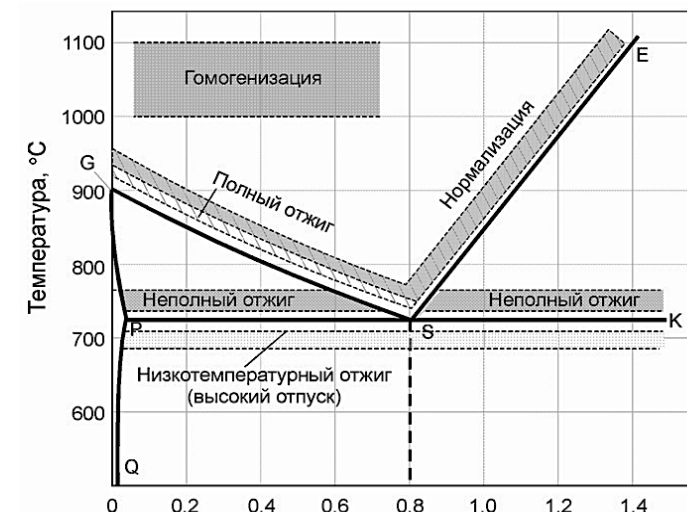


Отжиг – нагрев металла, до определенной температуры, выдержка и медленное охлаждение (охлаждению с отключенной печью с минимально возможной скоростью, порядка $(50 \div 100)$ °С/час). **Отжиг направлен на восстановление равновесного состояния металла (т.е. соответствующего диаграмме Fe-C)**, нарушенного при технологической предыстории получения обрабатываемого изделия. Температура нагрева, время выдержки и скорость охлаждения назначается в зависимости от материала и целей.

Цели отжига могут быть различными:

- выравнивание химического состава (диффузионный отжиг или гомогенизация)
- снятие внутренних напряжений (рекристаллизационный отжиг)
- получение равновесной структуры (полный отжиг)
- изменение формы и величины зерна
- снижение твердости
- улучшение обрабатываемости стали

В зависимости от целей различают отжиг I и II рода.



Отжиг I рода – термическая операция, состоящая в нагреве металла, в процессе которого фазовые (полиморфные) превращения не протекают (нагрев осуществляется до температуры фазовых превращений), а если и протекают, то не оказывают решающего влияния на основные результаты обработки и структуру сплава. Такой отжиг возможен для любых металлов и сплавов. **Цель:** приведение металл в устойчивое состояние. К отжигу I рода относят следующие разновидности: отжиг для снятия напряжений, рекристаллизационный, гомогенизационный.

Отжиг II рода – термическая операция, заключающаяся в нагреве выше температуры превращения с последующим достаточно медленным охлаждением для получения устойчивого структурного состояния сплава. К отжигу II рода относятся следующие виды: полный отжиг, неполный отжиг, изотермический отжиг, нормализационный (нормализация), сфероидизационный.

Отжиг I рода: отжиг для снятия внутренних напряжений



Напряжения, которые образуются в изделиях без воздействия на них внешних сил, **называются внутренними напряжениями**. Образование внутренних напряжений может происходить при затвердевании отливок, при сварке и других процессах. Очень часто внутренние напряжения возникают при термической обработке изделия вследствие неравномерного нагревания его и охлаждения

Особенно значительные внутренние напряжения возникают при термической обработке изделий крупных сечений и сложной формы. Они представляют опасность для прочности изделия и поэтому их нужно устранить или хотя бы снизить до безопасного уровня. Вредные внутренние напряжения можно снять при помощи **отжига при невысокой температуре**

Температура должна быть такой, при которой **проявились бы пластические свойства стали**: сжатые слои растянулись, а растянутые – сжались. Отжиг для снятия внутренних напряжений производится при температурах ниже критической A_{c1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$), следовательно, структурных превращений не происходит. Достаточно нагреть изделие до температуры в пределах $(200 \div 700)\text{ }^{\circ}\text{C}$, чаще это - $(350 \div 600)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем выдержать некоторое время при этой температуре и медленно охладить вместе с печью (чтобы не возникли снова внутренние напряжения). Время выдержки составляет обычно несколько часов и устанавливается опытным путем. При этом требуется, чтобы после нагрева металл охлаждался настолько медленно, чтобы в нем не могло образоваться новых напряжений

Этот вид отжига часто называют **низким отжигом, а иногда высоким отпуском**. При низком отжиге, в связи со снятием внутренних напряжений, достигается некоторое понижение твердости изделия. Поэтому таким видом отжига часто пользуются для уменьшения твердости изделий с целью улучшения их обрабатываемости на станках

Остаточные напряжения снимаются также при других видах отжига (например, рекристаллизационном отжиге с фазовой перекристаллизацией)

Отжиг I рода: рекристаллизационный отжиг



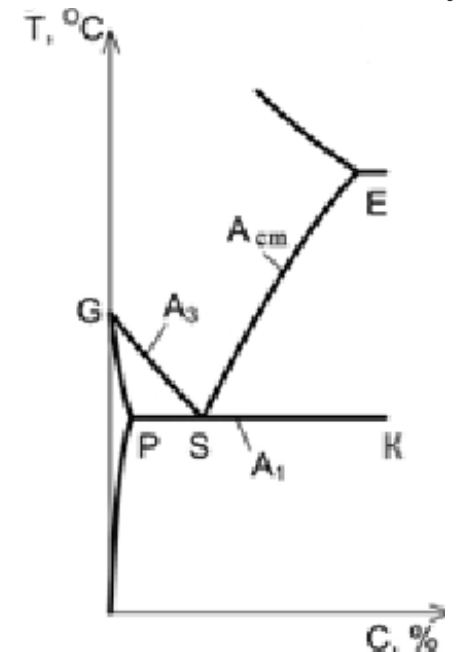
Стальные заготовки и изделия тонкого сечения часто изготавливают путем штамповки, прокатки или волочения в холодном состоянии. При обработке стали давлением в холодном состоянии происходит ее наклеп, т.е. в ней образуются значительные внутренние напряжения, сталь становится весьма прочной и твердой и в то же время очень хрупкой.

Структура наклепанной стали состоит из вытянутых в одном направлении зерен, кристаллическая решетка такой стали искажена. Чтобы устранить вредное состояние наклепа, нужно изменить структуру стали, устранить искажение кристаллической решетки и вместо вытянутых зерен получить зерна равноосные (примерно одинаковые оси вдоль и поперек зерна).

Этот процесс восстановления структуры стали после деформации и подготовки к дальнейшему деформированию называется **рекристаллизацией**, а вид термической обработки, при помощи которой этот процесс осуществляется – рекристаллизационным отжигом. Он применяется перед холодной обработкой давлением и как промежуточная операция для снятия наклепа между операциями холодного деформирования.

Температура отжига для достижения рекристаллизации по всему объему производится при температуре **(650 ÷ 700) °С**, т.е. при **температурах ниже линии PSK** диаграммы **Fe-Fe₃C**. После непродолжительной выдержки изделия при указанной температуре (для прогрева по всему сечению) производится охлаждение его на воздухе. Охлаждение должно быть достаточно медленным: при ускоренном охлаждении вновь возникают внутренние напряжения. В результате такой термической обработки уменьшаются твердость и прочность стали, но зато повышаются ее вязкость и пластичность.

При рекристаллизации из деформированных зерен вырастают новые кристаллы, близкие к равновесным. Чем выше степень пластической деформации, тем больше возникает центров рекристаллизации. Они представляют собой зародившиеся микроскопические области с минимальным количеством точечных и линейных дефектов, которые возникают путем перераспределения и частичного уничтожения дислокаций.



Отжиг I рода: гомогенизация (диффузионный отжиг)



Цель: уменьшение дендритной или внутрикристаллической ликвации.



- Ликвация неблагоприятно влияет на свойства стали, особенно заметно она снижает ударную вязкость.
- Ликвация вызывает анизотропию свойств (разные свойства в различных направлениях) и приводит к возникновению таких дефектов, как шиферность (слоистый излом) и флокены (тонкие внутренние трещины, наблюдаемые в изломе в виде белых овальных пятен). Образовавшаяся зональная ликвация практически не может быть устранена. Внутрикристаллическую ликвацию можно значительно ослабить при помощи гомогенизирующего отжига. Этому виду отжига обычно подвергаются стальные слитки крупных размеров, претерпевающие при затвердевании значительную ликвацию.
- Ликвация по химическому составу может быть как в отдельных частях слитка (зональная ликвация), так и внутри отдельных кристаллов (внутрикристаллическая, или дендритная, ликвация). В стали особенно сильно ликвируют сера и фосфор.

Нагрев при гомогенизации должен быть достаточно высоким ($1100 \div 1200$) °C, на $(180 \div 300)$ °C выше температуры A_{C3} , длительной выдержке ($10 \div 20$) часов при этой температуре и последующем медленном охлаждении. Только при таких температурах **атомы элементов приобретают большую подвижность. Происходит перемещение атомов из мест с большей концентрацией химических элементов в места с меньшей концентрацией.** В результате такой диффузии обеспечивается выравнивание химического состава слитка или отливки по объему. В результате длительной выдержки при высокой температуре сталь приобретает крупнозернистое строение, что легко устраняется в процессе дальнейшейковки или прокатки слитка.

Фасонные отливки после гомогенизации подвергают полному отжигу или нормализации для измельчения зерен и улучшения свойств. Если химическая неоднородность стали не очень значительна, то она устраняется при горячей обработке слитка давлением без предварительного его отжига.

Отжиг II рода



Отжиг 2-го рода основан на использовании **диффузионных фазовых превращений** при охлаждении металлов и сплавов. Принципиальную возможность применения к сплаву отжига 2-го рода можно установить по диаграмме состояния. В твердом состоянии протекают разнообразные фазовые превращения: полиморфное, эвтектоидное, растворение одной фазы в другой при нагреве и обратное выделение при охлаждении и др.

Отжиг 2-го рода можно проводить с полным **изменением фазового состава**, когда фазы, существовавшие при комнатной температуре, исчезают при нагреве, а фаза, стабильная при повышенной температуре, исчезает при охлаждении. Примером являются превращение перлита в аустенит и распад аустенита с образованием перлита

Отжиг II рода: полный отжиг



Полный отжиг осуществляется главным образом после горячей механической обработки и отливок из углеродистых и легированных сталей. **Основной целью полного отжига является измельчение зерна, смягчение металла для улучшения его обработки режущим инструментом и устранение внутренних напряжений.** Это достигается нагревом, не превышающим $(20 \div 40)^\circ\text{C}$ верхней критической точки A_{C3} , и медленным охлаждением

При нагреве до температуры выше A_3 на $(20 \div 40)^\circ\text{C}$ образуется аустенит, характеризующийся мелким зерном; поэтому при охлаждении возникает мелкозернистая структура, обеспечивающая высокую вязкость, пластичность и возможность достижения высоких свойств после окончательной термической обработки

Время выдержки при температуре отжига обычно складывается из времени, необходимого для полного прогрева всей массы деталей, и времени, нужного для окончания структурных превращений

После отжига сталь медленно охлаждают вместе с печью. **Охлаждение при отжиге проводят с такой малой скоростью, чтобы аустенит распадался при небольшой степени переохлаждения.** Так как в легированной стали аустенит более склонен к переохлаждению, то их следует охлаждать при отжиге с меньшей скоростью, чем углеродистые. Детали, изготовленные из углеродистой стали, охлаждают со скоростью $(180 \div 200)^\circ\text{C}/\text{час}$, из низколегированных сталей - со скоростью $(90 \div 100)^\circ\text{C}/\text{час}$, из высоколегированных - со скоростью примерно $50^\circ\text{C}/\text{час}$. После распада аустенита в перлитной области дальнейшее охлаждение можно ускорять и выполнять даже на воздухе. Если отжиг предназначается и для снятия напряжений, например, в отливках сложной конфигурации, медленное охлаждение с печью проводится почти до комнатной температуры

Структура литых деталей обычно неоднородная, т. е. состоит из очень крупных и мелких зерен, а механические свойства такой стали неудовлетворительны. Поэтому для повышения механических свойств, измельчения зерна и снятия внутренних напряжений литые детали нужно обязательно подвергать полному отжигу

Отжиг II рода: изотермический отжиг



Высоколегированные стали целесообразнее подвергать изотермическому отжигу

В этом случае сталь нагревают, как и для полного отжига, и сравнительно быстро охлаждают (обычно переносом в другую печь) до температуры ниже A_1 (обычно на $(100 \div 150)$ °С). При этой температуре осуществляется изотермическая выдержка, необходимая для полного распада аустенита, после чего следует охлаждение на воздухе

Одно из преимуществ изотермического отжига – **сокращение длительности процесса**, особенно для легированных сталей, которые для заданного снижения твердости приходится охлаждать очень медленно

Другое преимущество изотермического отжига заключается в **получении более однородной структуры**. При изотермической выдержке температура по сечению изделия выравнивается, и превращение по всему объему стали происходит при одинаковой степени переохлаждения. Изотермическому отжигу подвергаются поковки и другие заготовки небольших размеров

Время выдержки устанавливается по диаграмме изотермического превращения аустенита для данной стали; оно колеблется обычно в пределах от 2 до 5 час. По окончании выдержки изделия вынимают из печи и охлаждают на воздухе. Продолжительность изотермического отжига в $(2 \div 3)$ раза меньше обычного. Следует, однако, иметь в виду, что после изотермического отжига твердость стали получается более высокой, чем при обычном отжиге

Отжиг II рода: неполный отжиг, сфероидизация



Неполный отжиг

Если до отжига структура стали была удовлетворительная, но сталь обладает повышенной твердостью и в деталях имеются внутренние напряжения, то целесообразнее применять неполный отжиг. Неполный отжиг отличается от полного тем, что сталь нагревается до более низкой, немного превышающей точку A_{C1} . При неполном отжиге происходит частичная перекристаллизация только перлитной составляющей стали. Внутренние напряжения снимаются полностью, и сталь получает пониженную твердость и хорошо обрабатывается механически. **Целесообразно проводить для доэвтектоидных сталей**

Сфероидизация

Отжиг на зернистый перлит, применяется для заэвтектоидных сталей. Заэвтектоидные высокоуглеродистые инструментальные стали со структурой пластинчатого перлита имеют плохую обрабатываемость режущим инструментом. Поэтому заэвтектоидные углеродистые и легированные стали подвергают отжигу только на зернистый перлит в результате которого образуется структура зернистого перлита (сфероида)

Режим отжига для получения зернистого перлита достигается режимом близким к неполному отжигу. Сталь нагревают немного выше A_{C1} с последующим охлаждением сначала до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем до $(550 \div 600)\text{ }^{\circ}\text{C}$ и далее на воздухе. Особенно важным для получения зернистого перлита является точное соблюдение температурного режима, так как при очень медленном охлаждении зернистый перлит получается с крупными зернами, а часто с отдельными пластинками перлита, а при более быстром охлаждении образуется мелкозернистый (точечный) перлит. Поэтому для получения зернистого перлита целесообразно применять циклический отжиг, т.е. циклы нагрева и охлаждения повторяют несколько раз

Сталь со структурой зернистого перлита обладает наименьшей твердостью, легче обрабатывается резанием

Отжиг II рода: нормализация



Этот режим отжига является переходной ступенью ко второму виду термообработки – закалке

Нормализационный отжиг (нормализация) заключается в нагреве до аустенитного состояния: для доэвтектоидной стали – это до температуры, превышающей A_{C3} на 50 °С; заэвтектоидной – выше A_{cm} также на 50 °С, непродолжительной выдержке для прогрева садки и завершения фазовых превращений и охлаждении на спокойном воздухе. Таким образом, от отжига нормализация отличается более быстрым охлаждением изделия (примерно в 2 раза)

Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали:

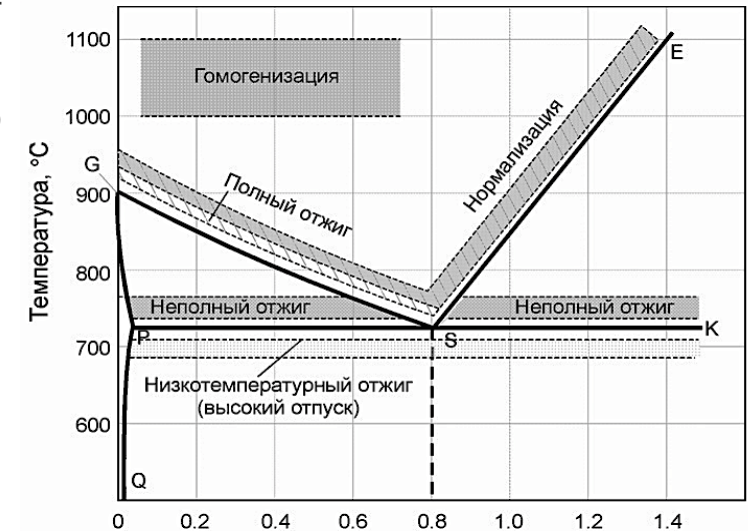
- для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига
- для отливок из среднеуглеродистой стали нормализация или нормализация с высоким отпуском применяется вместо закалки и высокого отпуска. В этом случае механические свойства несколько ниже, но детали будут подвергнуты меньшей деформации по сравнению с получаемой при закалке, и вероятность появления трещин практически исключается

Нормализация горячекатаной стали повышает ее сопротивление хрупкому разрушению, что характеризуется снижением порога хладноломкости и повышением работы развития трещины

После нормализации углеродистые стали имеют ту же структуру, что и после отжига, но перлит будет более дисперсным (тоньше пластинки ферритоцементитной смеси). После нормализации твердость и прочность стали будут выше, чем при отжиге.

Нормализация применяется для устранения крупнозернистой структуры, выравнивания механических свойств

Нормализация – более дешевая операция, чем отжиг, т.к. печи используют только для нагрева и выдержки при температуре нормализации. Охлаждение осуществляют на воздухе, вне печи



Отжиг II рода: нормализация



Часто отжиг, а особенно нормализация, являются **окончательной термической обработкой**. Это происходит в том случае, когда после отжига или нормализации сталь имеет свойства, удовлетворительные с точки зрения эксплуатации детали, и не требуется дальнейшего их улучшения с помощью закалки и отпуска

Для низкоуглеродистых нелегированных сталей разница в свойствах между отожженным и нормализованным состояниями практически отсутствует. Эти стали рекомендуется подвергать не отжигу, а нормализации

Для среднеуглеродистых сталей (0,3 ÷ 0,5) %С различие в свойствах стали после отжига и нормализации существенно. В этом случае нормализация не может заменить отжига. Но для этих сталей (если речь не идет о деталях ответственного назначения) нормализация может заменить более дорогую термическую обработку – улучшение. Нормализация в этом случае придает стали по сравнению с отожженным состоянием более высокую прочность

Стали, содержащие свыше 0,4 % углерода, после нормализации получают повышенную твердость. Такие стали лучше отжигать. На практике и такие стали часто подвергают нормализации вместо отжига, а затем высокому отпуску при температурах (650 ÷ 700) °С для уменьшения твердости. Нормализацию применяют для получения мелкозернистой структуры в отливках и поковках, для устранения внутренних напряжений и наклепа, для подготовки структуры стали к закалке

У стальных отливок процесс перекристаллизации протекает труднее, чем у ковальной и катаной стали, поэтому выдержка стальных отливок при температуре отжига должна быть более длительной. Охлаждение их производится со скоростью (80 ÷ 120) °С в час, т. е. несколько медленнее, чем кованных и катаных изделий, которые можно охлаждать со скоростью (100 ÷ 200) °С в час. Если и при этих условиях не удастся получить мелкозернистую структуру, то применяют двойной отжиг, причем первый отжиг производится при повышенной температуре 950 °С

Окончательная термообработка. Закалка



Закалка – это термическая обработка, при которой главным процессом является формирование **неравновесной** структуры **во время ускоренного охлаждения**. Это фиксация состояния сплава, характерное для высоких температур

Существуют два принципиально отличающихся типом фазовых превращений:

- закалка с полиморфным превращением
- закалка без полиморфного превращения

Из самого названия этих видов термической обработки видно, что они различаются типом фазовых превращений

Закалка с полиморфным превращением (или закалка на мартенсит) – это основной способ упрочнения сталей. Закалка без полиморфного превращения в сочетании со старением является основным способом упрочнения сплавов на основе цветных металлов



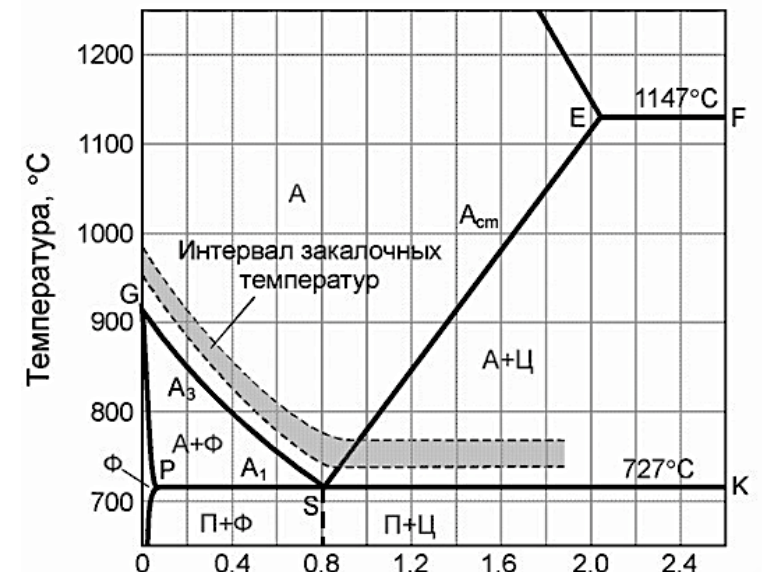
Полиморфное превращение — это изменение типа кристаллической решётки твёрдого тела в зависимости от температуры

Основные параметры закалки – температура нагрева, время выдержки и скорость охлаждения.

Температура нагрева и время выдержки должны быть такими, чтобы произошли необходимые фазовые изменения. В этом отношении закалка аналогична отжигу 2-го рода.

Скорость охлаждения при закалке должна быть достаточно большой, чтобы при понижении температуры были подавлены диффузионные фазовые превращения и образовывалась метастабильная структура. Этим закалка отличается от отжига 2-го рода

Закалка предотвращает превращение аустенита в перлит





Закалка стали заключается в **нагреве** (выше температуры фазовых превращений) на $(30 \div 50) \text{ }^\circ\text{C}$ выше A_{C3} для доэвтектоидных сталей или A_{C1} для заэвтектоидных сталей, выдержке для завершения фазовых превращений и последующем охлаждении со скоростью выше критической

Критическая скорость закалки или минимальная скорость охлаждения (укр) – это скорость, охлаждая с которой в **стали не происходит диффузионного распада аустенита с образованием структур перлитного типа**, аустенит переходит в мартенсит

Нагревать изделия, особенно крупные, нужно постепенно, чтобы избежать местных напряжений и трещин, а время выдержки нагретого изделия должно быть достаточным, чтобы переход перлита в аустенит полностью завершился

В зависимости от температуры нагрева закалку подразделяют **на полную и неполную**. Для доэвтектоидной стали обычно применяют полную закалку, а для заэвтектоидной – неполную

Полная закалка: нагрев на $(30 \div 50) \text{ }^\circ\text{C}$ выше A_{C3} или A_{Cm} . Полная закалка осуществляется из аустенитной области. После охлаждения с критической скоростью закалки у всех углеродистых сталей образуется структура **мартенсита с некоторым количеством остаточного аустенита**. Полной закалкой доэвтектоидных сталей исключается образование мягких ферритных включений

Неполная закалка: нагрев стали на $(30 \div 50) \text{ }^\circ\text{C}$ выше A_{C1} , но ниже A_{C3} или A_{Cm} , т.е. закалка из промежуточных, двухфазных областей (А + Ф), (А+ЦII), В результате охлаждения с критической скоростью в доэвтектоидных сталях образуется структура **(Ф + М), а в заэвтектоидных – (М + ЦII)**. Наличие феррита в структуре закаленной доэвтектоидной стали снижает твердость, поэтому такая закалка применяется редко для этих сталей. Наличие избыточного цементита в структуре закаленной заэвтектоидной стали, наоборот, полезно. Кристаллы цементита тверже кристаллов мартенсита, поэтому твердость заэвтектоидной стали выше, чем при полной закалке

Наиболее благоприятная структура заэвтектоидных сталей достигается тогда, когда включения вторичного цементита имеют зернистую форму. Цементитная сетка по границам зерен недопустима, т.к. увеличивает хрупкость стали. Поэтому заэвтектоидные стали предварительно подвергают сфероидизации, поэтому избыточный ЦII округлой формы не вызывает снижения вязкости

Закалка. Охлаждающие среды



Различная скорость охлаждения изделия при закалке достигается путем применения охлаждающей (закалочной) жидкости: воды, масла, растворов солей в воде

Выбор способа охлаждения зависит от формы изделия, размеров и химического состава стали. Чем сложнее форм и больше сечение детали, тем выше напряжения, возникающие при закалке, и больше опасность образования трещин. Чем выше содержание углерода в стали, тем большие объемные изменения протекают при превращении, тем больше опасность деформации и образования трещин

Для **углеродистых сталей** необходимо очень резкое охлаждение (≈ 1000 °C/сек), поэтому в качестве охлаждающей среды используют холодную воду или воду с добавлением соли или едкого натра. Водные растворы едкого натра или поваренной соли обладают большей охлаждающей способностью

Легированные стали приобретают мартенситную структуру при охлаждении в холодных или подогретых маслах (≈ 100 °C/сек), а высоколегированные – на воздухе (≈ 10 °C/сек)

По методу охлаждения закалку классифицируют:

- закалка в одном охладителе
- закалка в двух охладителях
- ступенчатая закалка
- изотермическая закалка

Закалка. Охлаждающие среды



При выборе охлаждающей среды необходимо учитывать закаливаемость и прокаливаемость стали

Закаливаемость – способность стали к повышению твердости при закалке. Закаливаемость определяется содержанием углерода

Закаливаемость оценивается по наибольшей твердости после закалки. Стали, содержащие менее 0,20 %С, не обладают закаливаемостью. С ростом содержания углерода закаливаемость быстро растет, достигает наибольшей величины при 0,8%С и затем почти не меняется

Прокаливаемость – способность получать закаленный слой на определенную глубину с мартенситной и троосто-мартенситной структурой, обладающей высокой твердостью. За глубину закаленной зоны принимают расстояние от поверхности до середины слоя, где в структуре одинаковые объемы мартенсита и троостита. Чем меньше критическая скорость закалки, тем выше прокаливаемость. Укрупнение зерен повышает прокаливаемость. Если скорость охлаждения в сердцевине изделия превышает критическую, то сталь имеет сквозную прокаливаемость. Нерастворимые частицы и неоднородность аустенита уменьшают прокаливаемость

Характеристикой прокаливаемости является **критический диаметр**

Критический диаметр – максимальное сечение, прокаливающееся в данном охладителе на глубину, равную радиусу изделия. С введением в сталь легирующих элементов закаливаемость и прокаливаемость увеличиваются (особенно увеличивают молибден и бор, кобальт – наоборот)

Охлаждающие среды. Способы



Закалка в двух охладителях (через воду в масле). Первоначальное охлаждение в воде позволяет быстро пройти область наименьшей устойчивости аустенита и достичь температур, при которых он более устойчив. Дальнейшее более замедленное охлаждение в масле позволяет несколько выровнять перепад температур по сечению изделия. При этом виде закалки требуется очень точно выбрать время смены закалочных сред. Такой режим закалки позволяет уменьшить внутренние напряжения и снизить вероятность появления трещин

Ступенчатая закалка заключается в том, что после нагрева детали помещают в среду (печь-ванну), нагретую до температуры немного выше начала образования мартенсита (на $20 \div 30$) °С т.е. до $(350 \div 400)$ °С, выдерживают небольшое время для выравнивания температуры по сечению, а затем охлаждают в масле или на воздухе. При этом обеспечивается быстрое охлаждение стали в верхней области температур, а затем делается выдержка, во время которой температура по сечению детали выравнивается, и термические напряжения уменьшаются. Твердость после такой закалки такая же, как и в предыдущих способах, но напряжения и вероятность образования трещин еще меньше

В качестве жидких сред для ступенчатой закалки используют расплавы щелочей (обычно КОН+NaОН), селитры, легкоплавких металлов. **Ступенчатая закалка применяется только для мелких изделий (до 10 мм) из углеродистых сталей.** Для легированных сталей, обладающих высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, такую закалку применять нецелесообразно, так как они обычно хорошо закаливаются в масле, которое достаточно медленно охлаждает при температурах образования мартенсита

Изотермическая закалка проводится так же, как и ступенчатая, но в расплаве щелочей детали выдерживают более длительное время. При этом существенных напряжений не возникает, но твердость получается ниже, чем при других способах закалки. Изотермическая закалка позволяет получать сталь с меньшей твердостью, чем после обычной закалки, но с большей вязкостью, после такой закалки не требуется отпуск. Изотермическая закалка обычно применяется для деталей сложной формы, склонных к деформациям и образованию трещин

Обработка холодом. Применяют для уменьшения количества остаточного аустенита в закаленных высокоуглеродистых сталях. При охлаждении до (минус $70 \div$ минус 190) °С остаточный аустенит превращается в мартенсит. Обработку холодом проводят непосредственно после закалки путем погружения изделий в **смесь авиационного бензина с жидким азотом на $(1 \div 1,5)$ часа.** Обработка холодом обычно применяется инструмента с целью повышения твердости и для стабилизации размеров

Поверхностная закалка



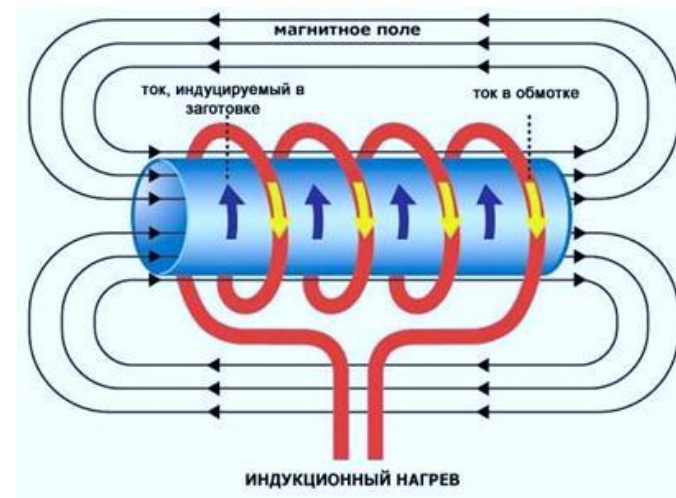
Поверхностная закалка – изменение свойств только верхнего слоя изделия. Такая обработка придает особую прочность или мягкость только верхнему, небольшому по толщине слою стали, при этом внутренняя структура изделия остается неизменной. Поверхностная закалка применяется для повышения прочности таких изделий, как ведущие шестерни, валы, металлорежущего инструмента и т.д.

Механизм ТВЧ. При прохождении переменного электрического тока высокой частоты по медному индуктору вокруг последнего образуется магнитное поле, которое проникает в стальную деталь, находящуюся в индукторе, и индуцирует в ней вихревые токи Фуко. Эти токи и вызывают нагрев металла.

Особенностью нагрева ТВЧ является то, что индуцируемые в стали вихревые токи распределяются по сечению детали не равномерно, а оттесняются к поверхности. Неравномерное распределение вихревых токов приводит к неравномерному ее нагреву: поверхностные слои очень быстро нагреваются до высоких температур, а сердцевина или совсем не нагревается или нагревается незначительно благодаря теплопроводности стали.

Преимущества закалки ТВЧ:

- уменьшение хрупкости изделий. Хрупкость уменьшается в результате образования пластичной и вязкой сердцевины, а во многих случаях вследствие местного расположения закаленного слоя только на участках, твердость которых должна быть высокой
- уменьшение деформаций, во время нагрева и охлаждения, достигаемое за счет жесткости холодной сердцевины
- практически полное устранение окисления и обезуглероживания, что при уменьшении деформации позволяет в некоторых случаях производить закалку окончательно готовых деталей без шлифования
- уменьшение затрат энергии на нагрев: нагревается лишь часть изделия
- возможность применения более дешевой углеродистой стали





Закаленная сталь очень твердая, но хрупкая ($M+A_{ост}$), обладает низкой пластичностью и имеет большие внутренние напряжения. Для снижения внутренних напряжений и повышения пластичности, снижения твердости после закалки всегда следует еще одна операция термической обработки – **отпуск**. Напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска и чем медленнее охлаждение

Механизм протекающих превращений при отпуске сталей – диффузионный, он определяется температурой и продолжительностью нагрева.

Отпуск стали – нагреве закаленной стали до температуры ниже A_{c1} (т.е. до температур не выше критических точек и перевод его в более устойчивое состояние без доведения до полного равновесия, в противном случае это был бы отжиг), выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью. **Чем выше температура отпуска, тем меньше твердость отпущенной стали.** Отпуск – окончательная операция термической обработки, в результате сталь приобретает требуемые механические свойства

Различают три вида отпуска:

- низкий (перестройка M с менее искаженной кристаллической решеткой, мелкие карбиды)
- средний (распад $A_{ост}$, формирование Φ и Ψ , роста карбидов. Образуется мелкодисперсная смесь Троостит отпуска)
- Высокий (формирование Φ и Ψ с нормальными решетками, коагуляция Ψ и перевод в равновесное состояние - Сорбит отпуска)

Низкий отпуск проводится с нагревом при $(150 \div 200) ^\circ C$. При этом снижаются внутренние напряжения и некоторое уменьшение хрупкости мартенсита. Повышается прочность и немного улучшается вязкость без заметного снижения твердости. Закаленная сталь сохраняет твердость, а, следовательно, высокую износостойкость. Однако такое изделие (если оно не имеет вязкой сердцевины) не выдерживает значительных динамических нагрузок. Закалке и низкому отпуску подвергают стали с $(0,7 \div 1,3) \%C$. Структура после низкого отпуска – мартенсит отпуска. Время выдержки при низком отпуске составляет от 1 до $(10 \div 15)$ часов

Средний отпуск выполняется при $(350 \div 500) ^\circ C$. Цель – снижению твердости при значительном увеличении предела упругости, обеспечивает высокие пределы упругости и выносливости. Применяют для стали с содержанием углерода $(0,5 \div 0,65) \%$. Структура стали после среднего отпуска – троостит отпуска, обеспечивающий высокие пределы прочности, упругости и выносливости и увеличение сопротивляемости действию ударных нагрузок

Высокий отпуск осуществляется при $(500 \div 680) ^\circ C$. Цель – достижение оптимального сочетания прочностных, пластических и вязких свойств. Структура стали после него – сорбит отпуска с зернистым цементитом. Высокий отпуск создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали

Для среднего и высокого отпуска обычно достаточно $(1 \div 2)$ часа. Для дисков газовых и паровых турбин, валов, цельнокованных роторов в теплоэнергетике требуется до 8 часов, потому что их структура должна быть максимально стабильной

Улучшение



Термическая обработка, состоящая из закалки с высоким отпуском, называется **улучшением стали**

Улучшению подвергают среднеуглеродистые (с содержанием углерода $(0,3 \div 0,5) \%$) конструкционные стали, к которым предъявляются высокие требования по пределам текучести, выносливости и ударной вязкости. При этом износостойкость улучшенной стали вследствие ее пониженной твердости невысока. Улучшение значительно повышает конструктивную прочность стали, уменьшая чувствительность к концентраторам напряжений, работу развития трещины и снижая температуру верхнего и нижнего порогов хладноломкости

Отпускная хрупкость



Отпускной хрупкостью называют **резкое падение ударной вязкости при отпуске при определенных температурах**, возникает при определенных температурах и медленном охлаждении. Наблюдается не у всех сталей

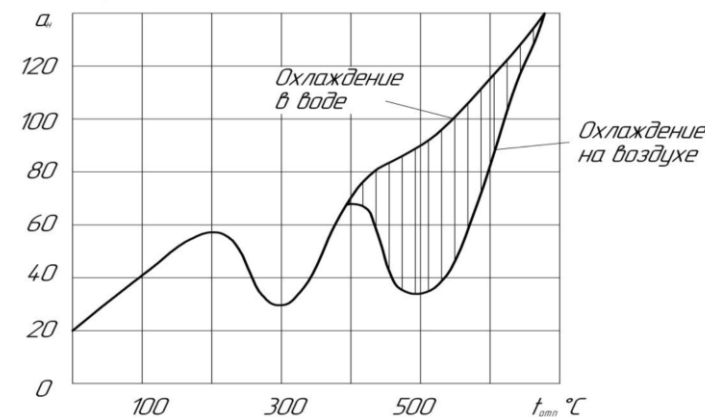
Различают два вида отпускной хрупкости:

- низкотемпературную (I рода)
- высокотемпературную (II рода)

Отпускная хрупкость I рода (необратимая): наблюдается при отпуске как легированных и углеродистых сталей в температурном интервале (250 ÷ 400) °С. Не зависит от скорости охлаждения. **Связана с неравномерностью превращения отпущенного мартенсита по границами и внутри зерна.** Вблизи границ карбиды выделяются интенсивнее, там создается концентрация напряжений, что делает границы зерен более хрупкими. При повышении температуры отпуска или увеличении продолжительности нагрева структура по сечению зерна выравнивается, и отпускная хрупкость устраняется. Повторный отпуск при температуре (250 ÷ 400) °С не приводит к отпускной хрупкости.

Отпускная хрупкость II рода (обратимая): наблюдается у легированных сталей при медленном охлаждении после отпуска в области (450 ÷ 650) °С. Быстрое охлаждение с температур высокого отпуска, например, в воде, предотвращает развитие отпускной хрупкости.

При высоком отпуске по границам зерен происходит образование и выделение дисперсных включений карбидов. Приграничная зона обедняется легирующими элементами. При последующем медленном охлаждении происходит диффузия фосфора к границам зерна. Приграничные зоны обогащаются фосфором, снижаются прочность и ударная вязкость. Этому дефекту способствуют хром, марганец и фосфор. Уменьшают склонность к отпускной хрупкости II рода молибден и вольфрам, а также быстрое охлаждение после отпуска. Отпускная хрупкость II рода «обратима», то есть при повторных нагревах и медленном охлаждении тех же сталей в опасном интервале температур дефект может повториться. Стали, склонные к отпускной хрупкости II рода, нельзя использовать для работы с нагревом до 650 °С без последующего быстрого охлаждения



Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска

Старение



Под старением металлов и сплавов понимают **процессы, происходящие в них «самопроизвольно»**, т. е. без воздействия внешних факторов, и проявляющиеся в изменении свойств металла с течением времени. Старение бывает различным, в зависимости от происходящего процесса. Например, старением называют процесс уменьшения напряжений, наблюдаемый в крупных отливках (особенно чугунных), при длительном их «вылеживании» при нормальной температуре. Но большей частью старение наблюдается после закалки сплавов, вследствие процессов, происходящих в неравновесных (неустойчивых) фазах, причем и здесь старение может быть различным по характеру.

При закалке образуется пересыщенный твердый раствор, закаленный сплав находится в метастабильном состоянии и стремится понизить свою энергию, т.е. перейти в более равновесное состояние, в результате чего твердый раствор распадается. Главным процессом при старении и отпуске большинства закаленных промышленных сплавов является распад метастабильного твердого раствора

Даже при комнатной температуре могут образовываться выделения из пересыщенного раствора, однако в большинстве сплавов диффузионная подвижность атомов при комнатной температуре недостаточна, чтобы распад раствора прошел в необходимой степени за приемлемое время. Поэтому для изменения структуры и свойств закаленного сплава его нагревают – подвергают старению или отпуску. Нагрев необходим лишь для ускорения диффузии, лежащей в основе всех структурных изменений при распаде пересыщенных растворов

Основные параметры старения и отпуска – температура и время выдержки. Скорости нагрева и охлаждения обычно играют второстепенную роль

В отличие от отпуска, после старения увеличиваются прочность и твердость, уменьшается пластичность, стабилизируются свойства

Упрочнение при старении происходит в результате дисперсионных выделений при распаде пересыщенного твердого раствора и возникающих при этом внутренних напряжениях

Исторически сложилось так, что для одних сплавов, например, алюминиевых, использовали преимущественно термин «старение», для других, например, углеродистых сталей, – «отпуск», а для третьих, например, бронз и титановых сплавов, оба эти термина использовали на равных правах. Принято термин «отпуск» применять к тем сплавам, которые были подвергнуты закалке с полиморфным превращением, а термин «старение» – в случае закалки без полиморфного превращения

Старение



Различают старение естественное, искусственное и деформационное после пластической деформации

Естественным старением называется самопроизвольное повышение прочности и уменьшение пластичности закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре

Нагрев сплава увеличивает подвижность атомов, что ускоряет процесс. Повышение прочности в процессе выдержки при повышенных температурах называется **искусственным старением**

Предел прочности, предел текучести и твердость сплава с увеличением продолжительности старения возрастают, достигают максимума и затем снижаются (явление перестаривания). При естественном старении перестаривания не происходит. С повышением температуры стадия перестаривания достигается раньше

Если закаленный сплав, имеющий структуру пересыщенного твердого раствора, подвергнуть пластической деформации, то также ускоряются процессы, протекающие при старении – это деформационное старение

Если при старении происходит только выделение выделения упрочняющих фаз, такое явление называют – дисперсионным твердением

Основное назначение старения – повышение прочности и стабилизация свойств

Термомеханическая обработка стали (ТМО)



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Термомеханическая обработка (ТМО) – это процесс нагрева стали до температуры выше A_{C3} , выдержка, пластическая деформация аустенита при высокой температуре и последующее охлаждение с целью получения особой мартенситной структуры. Пластическое деформирование при ТМО производится прокаткой, штамповкой и другими способами обработки давлением. Различаются два основных способа ТМО - высокотемпературная (ВТМО) и низкотемпературная (НТМО)

При ВТМО сталь нагревается до температуры выше A_{C3} , пластически деформируется при этой температуре и закаливается

При НТМО сталь нагревается до температуры выше A_{C3} , охлаждается до температуры относительной устойчивости аустенита, но ниже температуры рекристаллизации, пластически деформируется при этой температуре и закаливается. В обоих случаях после закалки следует низкий отпуск. ВТМО можно подвергать любые стали, а НТМО проводят только для легированных сталей

По сравнению с обычной закалкой после ТМО механические свойства получаются более высокими. Наибольшее упрочнение достигается после НТМО

Химико-термическая обработка (ХТО)



Способность металла растворять в себе различные элементы позволяет при повышенных температурах, когда атомы вещества, окружающего поверхность металла, диффундируют внутрь него, создавать поверхностный слой измененного состава. Обработка, в результате которой изменяется состав поверхностных слоев, носит название *химико-термической обработки*.

Химико-термическая обработка (ХТО) – поверхностное насыщение стали неметаллами или металлами (например, углеродом, азотом, алюминием, хромом и др.) путем их диффузии в атомарном состоянии из внешней среды при высокой температуре.

В ходе данных процессов изменяется химический состав, микроструктура и свойства поверхностных слоев изделий. При ХТО обрабатываемые детали нагревают в каких-либо химически активных средах. Основные параметры обработки - температура нагрева и продолжительность выдержки. ХТО обычно осуществляется за длительное время. Температуру процесса выбирают конкретно для каждого вида обработки.

Основными видами химико-термической обработки стали:

- цементация
- азотирование
- нитроцементация
- цианирование

При определении толщины диффузионного слоя, полученного при насыщении стали тем или иным элементом, обычно указывается не полная его величина с измененным составом, а только глубина до определенной твердости или структуры – эффективная толщина

Химико-термическая обработка. Цементация



Цементация – процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом с целью повышения работоспособности деталей, испытывающих в процессе эксплуатации статические, динамические и переменные нагрузки и подверженных изнашиванию. При этом изделия из низкоуглеродистых сталей (0,10 ÷ 0,25)% С, нагревают в среде, содержащей углерод. Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом при цементации, сохраняла высокую вязкость после закалки. На цементацию детали поступают после механической обработки нередко с припуском на шлифование (0,05 ÷ 0,10) мм

Цементацию проводят в твердом, газообразном и жидком карбюризаторах. Изделия, подлежащие цементации, после предварительной очистки укладывают в ящики. Ящики заполняют карбюризатором, накрывают крышкой и помещают в печь. Нагревают до (900 ÷ 950) °С. Продолжительность выдержки при рабочей температуре зависит от требуемой толщины слоя и размеров ящика: в среднем выдержка составляет (6 ÷ 15) ч. После цементации ящики охлаждают на воздухе до (400 ÷ 500) °С и затем раскрывают

После цементации изделия подвергают закалке с отпуском. Это обеспечивает получение в поверхностном слое изделий высокой твердости при сохранении мягкой вязкой сердцевины, возникновение напряжений сжатия, увеличивающих предел выносливости и долговечность деталей

Химико-термическая обработка.

Азотирование



Азотирование – поверхностный слой детали насыщается азотом. Процесс осуществляется в атмосфере аммиака, который при нагревании разлагается. При этом увеличиваются не только твердость и износостойкость, а также предел выносливости и коррозионная стойкость в таких средах, как воздух, вода, пар и т. д.

Продолжительность процесса зависит от требуемой толщины азотированного слоя. Чем выше температура насыщения, тем ниже твердость и больше его глубина. Последующее охлаждение осуществляют вместе с печью

Азотирование – завершающая операция при изготовлении деталей. Детали подвергаются азотированию после окончательной механической и термической обработок – закалки с высоким отпуском. Сравнивая цементацию и азотирование, можно отметить следующее: продолжительность первого вида обработки меньше; упрочненный слой получается более глубоким и допускает большие удельные давления при эксплуатации; твердость науглероженного слоя в $1,5 \div 2,0$ раза меньше и сохраняется при нагреве только до $(180 - 125) ^\circ\text{C}$, в то время как азотированный удерживает твердость до $(600 \div 650) ^\circ\text{C}$

ХТО. Нитроцементация, цианирование



Нитроцементация – называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно **углеродом и азотом при (840 ÷ 860) °С в газовой среде**, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4 ÷ 10 ч. Основное назначение нитроцементации - повышение твердости, износостойкости и предела выносливости стальных деталей.

После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже вслед за повторным нагревом, применяют и ступенчатую закалку. Далее за закалкой проводят отпуск при (160 ÷ 180) °С. Твердость поверхности после закалки и низкого отпуска HRC 58 ÷ 60.

Цианирование – совместное насыщение поверхности стали **углеродом и азотом** вследствие окисления расплавленных цианистых солей при нагревании до (820 ÷ 960) °С. Продолжительность насыщения определяется требуемой глубиной слоя и составляет 30 мин. до 6 часов. После цианирования проводят закалку (непосредственно из цианистой ванны) и низкотемпературный отпуск (180 ÷ 200) °С. Твердость цианированного слоя после термической обработки - HRC 58 ÷ 62. Этот вид цианирования применяют для мелких деталей. Структура цианированного слоя после закалки такая же, как цементованного. Глубокое цианирование применяют на некоторых заводах вместо цементации.

Выбор вида термической обработки



Выбор вида и режима термической обработки начинается с анализа комплекса необходимых свойств металла детали (требования к уровню механических свойств, твердости, пластичности и т.п.)

Технологический процесс термической обработки деталей включает в себя подготовительные, основные, отделочные, контрольные операции

Подготовительные операции – комплекс мероприятий, направленных на предохранение изделий от образования трещин и других видов дефектов

Основные операции включают – нагрев изделий для закалки, нормализации, отжига, отпуска и пр., Выдержки и охлаждения. Выбор вида термической обработки обуславливается техническими требованиями к поверхностям деталей по физико-механическим свойствам

Отделочные операции состоят из очистки поверхности деталей, рихтовки и правки после коробления и т.д.

Контрольные операции являются заключительными в технологическом процессе. В них входят контроль разрушающими методами (на образцах), так и неразрушающими методами. Наиболее часто в качестве критериев оценки качества проводится анализ микроструктуры изделия и определение твердости металла после термообработки

Дефекты термической обработки



Окисление. При нагреве в пламенных или электрических печах поверхность стальных деталей взаимодействует с печными газами. В результате металл окисляется и на деталях образуется окалина. С повышением температуры и времени, выдержки окисление резко возрастает. Образование окалины не только вызывает угар (потерю) металла, но и искажает геометрическую форму деталей. Поверхность стали под окалиной получается разъединенной и неровной, что затрудняет обработку металла режущим инструментом. Окалину с поверхности деталей удаляют или травлением в серной кислоте, или очисткой в дробеструйных установках.

Обезуглероживание. Обезуглероживание, т. е. выгорание углерода с поверхности деталей, всегда происходит при окислении стали. Обезуглероживание резко снижает прочностные свойства конструкционной стали. Детали с обезуглероженной поверхностью, склонны к закалочным (трещинам и короблению). Особенно большое обезуглероживание наблюдается при нагреве металла в электрических печах.

Для предохранения деталей от окисления, а следовательно, и от обезуглероживания, в процессе отжига, нормализации и закалки применяют неокисляющие (контролируемые) атмосферы. Для в рабочее пространство печи вводят защитные газы.

Перегрев. Возникает, когда сталь перегревается до температуры намного выше критической, или же в случае, когда температура находилась в допустимом диапазоне, но была слишком долгая выдержка. При перегреве зерна в стали укрупняются, что ведет к снижению прочности, вязкости и образованию закалочных трещин. Механические свойства стали находятся на крайне низком уровне. Такой дефект стали устраняют повторным правильным отжигом или нормализацией.

Пережог. Пережог возникает в случае, когда сталь была нагрета до температуры, которая близка к температуре плавления. При высокой температуре нагрева кислород из окружающей печной атмосферы проникает внутрь нагретой стали, при этом границы зерен сильно окисляются. Сталь теряет пластические свойства, прочность и становится настолько хрупкой, что при малейших ударах разрушается. Пережженную сталь, исправить термической обработкой невозможно, поэтому она идет на переплавку.

Дефекты термической обработки



Недогрев. Недогрев стали возникает в том случае, когда сталь во время обработки нагревается до температуры ниже критической. В результате такой термической обработки, требуемая структура будет не достигнута и необходимые свойства не будут получены.

Закалочные трещины. Закалочные трещины возникают при резком нагреве или охлаждении металла. Предотвращения данных дефектов достаточно просто, достаточно придерживаться правильной технологии нагрева и охлаждения стали.

Коробление. Коробление возникает в результате неравномерного охлаждения отдельных частей детали (мест), в результате этого процесса происходит изменение внешней формы. На данный процесс большое значение оказывает, как форма детали, так и способ погружения для охлаждения.

Пятнистая закалка. Пятнистая закалка является дефектом, который возникает при неравномерном охлаждении поверхности детали, которое осуществляется в процессе проведения закалки. Способствовать может наличие на поверхности окалины, грязи или в соприкосновение деталей между собой.

Результатом пятнистой закалки является неравномерная твёрдость. Средством профилактики пятнистой закалки является защита поверхности детали от окалины, её очистка и правильный способ охлаждения.

Контроль термической обработки



При термической обработке заготовок (деталей), сварных соединений и наплавленных деталей следует контролировать соблюдение требований ТД и требований чертежей деталей, а для изделий АС также «Правил АЭУ», ПК в части:

- методов и видов термической обработки;
- применяемого термического оборудования;
- последовательности и порядка выполнения термической обработки и отдельных ее этапов (в том числе предварительных, промежуточных и окончательных отпусков);
- режимов термической обработки (температуры печи при загрузке, скорости нагрева, температуру и продолжительности выдержек, условий, среды или скорости охлаждения);
- методов и порядка контроля температурных режимов (расположение термопар или других устройств для измерения температуры, их количество и т.п.);
- температуры в точках, предусмотренных в ОП, при контроле требуемой зоны нагрева сварного соединения и прилегающих к нему участков;
- условий, обеспечивающих свободное расширение сварных (наплавленных) изделий и предохраняющих их от пластических деформаций под действием собственной массы

Печные агрегаты должны обеспечить распределение температуры в рабочей части печи в пределах допуска, указанного в режиме термической обработки. Все печные агрегаты должны проходить проверку на распределение температуры по поду и высоте печи

Для контроля режимов термической обработки деталей изделий АС следует использовать термопары с устройствами для автоматической записи параметров режима. Количество и расположение термопар должны обеспечивать возможность контроля по всему объему печи при общей термической обработке и контроля зон нагрева при местной термической обработке

После выполнения термической обработки должны быть зафиксированы номер садки и номер печи

Объем контроля качества изделий, прошедших термическую обработку и сдаточные характеристики устанавливаются чертежом и с учетом требований НП-071-06

Необходимо помнить



Структура стали после отжига – перлит + феррит, перлит или перлит + цементит и другие продукты перлитного превращения (бейнит, сорбит, тростит). Структуры закаленной стали – мартенсит и аустенит

В процессе нагрева в результате взаимодействия поверхности металла с кислородом воздуха (атмосферы печи) на поверхности образуется окалина, толщина слоя окислы зависит от температуры и продолжительности нагрева, химического состава металла. Сталь окисляется наиболее интенсивно при нагреве больше 900 °С, при нагреве в 1000 °С окисляемость увеличивается в 2 раза, а при 1200 °С – в 5 раз. Хромоникелевые стали практически не окисляются

Углеродистые стали при нагреве теряют углерод с поверхностного слоя в (2 ÷ 4) мм. Это грозит металлу уменьшением прочности, твердости стали и ухудшается закаливанию. Особенно пагубно обезуглероживание для поковок небольших размеров с последующей закалкой

Заготовки из углеродистой стали с сечением до 100 мм можно быстро нагревать и потому их кладут холодными, без предварительного прогрева, в нагретую печь. Во избежание появления трещин высоколегированные и высокоуглеродистые стали необходимо нагревать медленно

При перегреве металл приобретает крупнозернистую структуру и его пластичность снижается. Поэтому необходимо обращаться к диаграмме «Fe-C», где определены температуры для начала и концаковки. Однако перегрев заготовки можно при необходимости исправить методом термической обработки, но на это требуется дополнительное время и энергия. Нагрев металла до еще большей температуры приводит к пережогу, от чего происходит нарушение связей между зернами и такой металл полностью разрушается при ковке

В деталях, испытывающих в процессе эксплуатации растягивающие и сжимающие нагрузки, напряжения по сечению распределены более или менее равномерно. Для таких деталей применяют сквозную закалку и отпуск

В деталях, работающих на изгиб, кручение или при высоких контактных нагрузках, сквозное упрочнение сечения не обязательно, но, желательно поверхностное упрочнение при сохранении вязкой сердцевины

**Спасибо
за внимание**

Семенова Елена

Semanova_es@aep.ru