

Лекция 05: Термическая обработка

- Общие сведения. Классификация
- Виды термической обработки:
 - отжиг
 - закалка
 - отпуск
 - старение
- Термомеханическая и химико-термическая обработка
- Дефекты термообработки
- Контроль проведения термической обработки



- дополнительный, углубленный материал

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. Особенно эффективна термическая обработка для стали. Однако не все свойства изменяются при термообработке. Одни (структурно чувствительные свойства) зависят от структуры металла (это большинство свойств, в т.ч. механические свойства стали определяются не только её составом, но зависят и от её строения), и, следовательно, изменяются при термической обработке, другие (структурно нечувствительные свойства) практически не зависят от изменений структуры. К последним относятся характеристики жесткости (модуль нормальной упругости E , модуль сдвига G). Твердость и прочность стали могут быть увеличены в результате термической обработки в три - пять раз, а модули упругости при этом изменяются менее чем на 5%. Иногда проводят ТО для снижения твердости

Целью термической обработки является получение необходимой структуры стали, обеспечивающей требуемый комплекс свойств стали при нагреве до определенной температуры и охлаждении. При этом 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. Также к разновидности термической обработки относятся обработка путем насыщения поверхности сплава другим веществом.

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

Важнейшими параметрами режима термической обработки являются температура (T_{max}) и скорость нагрева $U_{нагр}$, длительность выдержки (τ) при заданной температуре и скорость охлаждения стали $U_{охл}$.

Любой процесс термической обработки можно изобразить в виде графика, где по оси ординат откладывается температура, а по оси абсцисс – время. На рисунке 1 приведена элементарная кривая термической обработки (простой режим).

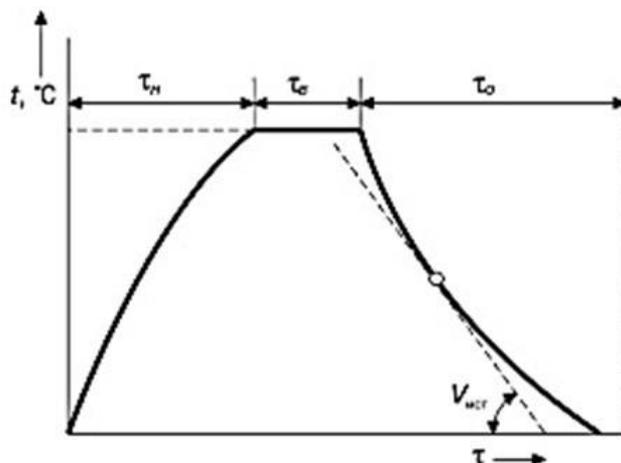


Рисунок 1. Кривая термической обработки (простой режим)

При нагреве всё изделие (или его часть) нагревается до заданной температуры. Одновременно в зависимости от температуры нагрева происходит то или иное изменение структуры. Например, протекающие в стальных изделиях процессы структурных изменений часто описываются с помощью так называемых диаграмм изотермического превращения. Здесь необходимо отметить, что точная оценка структурного превращения не может быть произведена с учетом только одного нагрева, т.к. эти превращения происходят и во время выдержки.

При выдержке протекают два процесса. Во-первых, в течение заданного времени при заданной температуре должно быть достигнуто оптимальное состояние структуры. Во-вторых, при выдержке (в небольшой степени также и при нагреве) изменяется химический состав поверхности изделия. Это изменение проводят специально, либо оно происходит произвольно.

Охлаждение служит для достижения 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.

Диаграмма состояния и критические точки

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

Диаграмма состояния стали 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. Регулируя температуру и время, можно осуществить следующие виды термической обработки стали: отжиг, нормализацию, закалку и отпуск.

Для того чтобы понять взаимосвязь диаграммы с режимами термической обработки введем понятие критических точек.

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 «с1», а при охлаждении – букву «г»: A_{c1} , A_{c2} , A_{c3} – нагрев; A_{r1} , A_{r2} , A_{r3} – охлаждение.

- A_1 – линия PSK (727 °C) – превращение $P \leftrightarrow A$;
- A_2 – линия MO (768 °C, точка Кюри) – магнитное превращение;
- A_3 – линия GOS (переменная T, зависит от содержания углерода в сплаве) – превращение $\Phi \leftrightarrow A$;
- A_4 – линия NJ (переменная T, зависит от содержания углерода в сплаве) – превращение $A \leftrightarrow \Phi$;
- A_{cm} – линия SE (переменная T, зависит от содержания углерода в сплаве) – начало выделения C_{II} .

Температура нагрева сталей выбирается согласно диаграмме железо - цементит в зависимости от их химического состава, положения критических точек и вида термической обработки. Если температура должна быть выше критических точек, то во избежание перегрева она не должна превышать A_1 или A_3 более, чем на $(20 \div 50)$ °C.

Скорость охлаждения зависит от структуры, которую необходимо получить при распаде аустенита, и обеспечивается подбором соответствующих охладителей: вода, минеральное масло, воздух, печь.

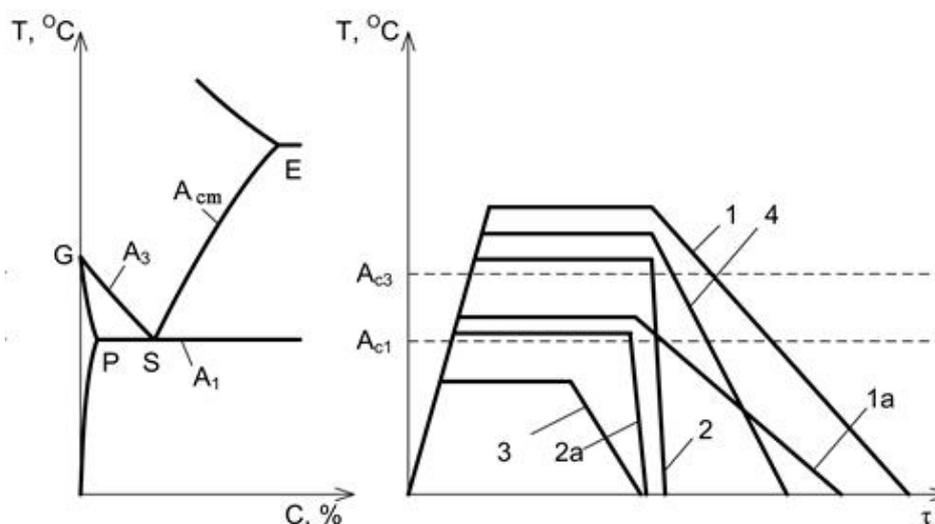


Рисунок 2. Часть диаграммы железо-углерод, соответствующая сталям. Диаграммы (циклограммы) термических обработок. 1 – полный отжиг; 1а – неполный отжиг; 2 – полная закалка; 2а – неполная закалка; 3 – отпуск; 4 – нормализация

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

Классификация и виды термической обработки

Классификация видов термической обработки основывается на происходящих при этом фазовых и структурных изменениях и представлена на Рисунок 3.

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.

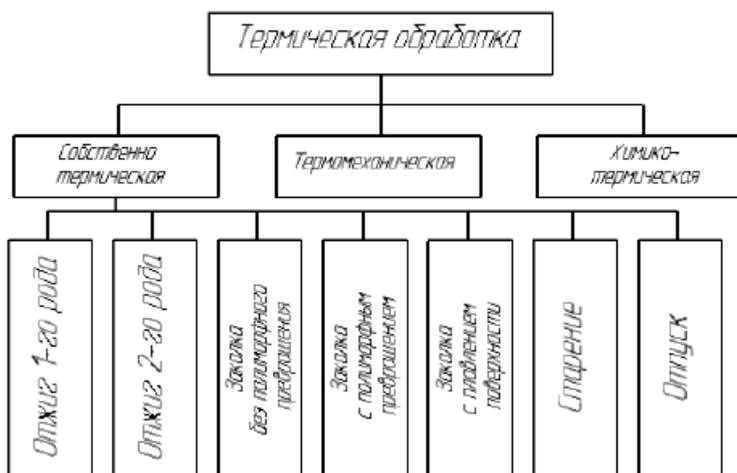


Рисунок 3. Схема классификации основных видов термической обработки металлов и сплавов

Отжиг заключается в нагреве металла, до определенной температуры, выдержке и медленном охлаждении (охлаждении с отключенной печью с минимально возможной скоростью, порядка $50 \div 100$ °С/час). Т.о., 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.

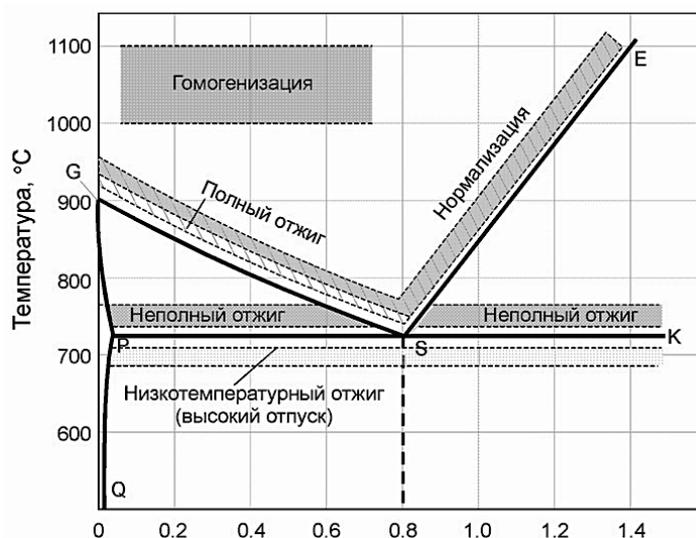
Цели отжига могут быть различными:

- 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 рода и II рода.

Отжиг I рода – термическая операция, состоящая в нагреве металла, в процессе которого фазовые (полиморфные) превращения не протекают, 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.



- 1 – диффузионный; 2 – полный; 3 – изотермический; 4 – неполный; 5 – сфероидизирующий;
6 – рекристаллизационный

Рисунок 4. Виды отжигов

Отжиг для снятия 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. При неравномерном охлаждении наружные слои изделия, охлаждающиеся быстрее, будут уменьшаться в объеме и сжимать внутренние слои, которые еще не успели остыть и поэтому будут препятствовать сжатию наружных слоев. Т.к. этого естественного сокращения размеров при понижении температуры предотвратить нельзя, то это ведет к возникновению внутренних напряжений.

Особенно значительные внутренние напряжения возникают при термической обработке изделий крупных сечений и сложной формы. Такое напряженное состояние металла крайне нежелательно, так как достаточно внутренним напряжениям в какой-либо небольшой зоне превысить предел прочности стали, как образуется трещина. 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. Чтобы эти процессы совершились, достаточно нагреть изделие до температуры в пределах (200 ÷ 700) °С, чаще это - (350 ÷ 600) °С. 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.

Таким образом, отжиг для снятия внутренних напряжений производится при температурах ниже критической A_{c1} (727 °С), следовательно, структурных превращений не происходит. 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. Следует иметь в виду, что если сталь подвергается отжигу для получения мелкозернистой структуры, то для устранения внутренних напряжений не требуется специального отжига. В процессе проведения указанных видов отжига попутно снимутся и внутренние напряжения.

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

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.



Наклеп. Обычно под наклепом понимают упрочнение при обработке давлением. В более широком понимании наклеп – это совокупность структурных изменений и связанных с ними изменений свойств при пластической деформации. С увеличением степени холодной деформации показатели сопротивления деформированию (временное сопротивление, предел текучести и твердость) возрастают, а показатели пластичности (относительное удлинение и сужение) падают

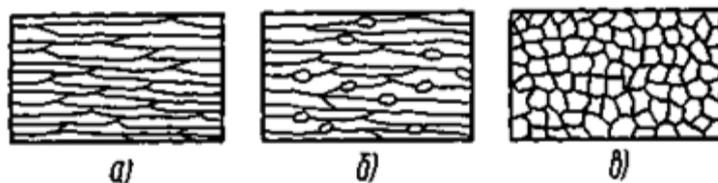
Структура наклепанной стали состоит из вытянутых в одном направлении зерен, кристаллическая решетка такой стали искажена. Чтобы устранить вредное состояние наклепа, нужно изменить структуру стали, устранить искажение кристаллической решетки и вместо вытянутых зерен получить зерна равноосные (примерно 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 (рисунок 5). Зарождение новых зерен при рекристаллизации происходит в участках с наибольшей плотностью дислокаций, обычно на границах деформированных зерен (рисунок 5б). 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. При этом между центром рекристаллизации и деформированной основой появляется высокоугловая граница.



а – наклеп; б – начало рекристаллизации; в – завершение рекристаллизации

Рисунок 5. Изменение микроструктуры деформированного металла при нагреве

Для углеродистых сталей с содержанием углерода (0,08 ÷ 0,20) %, чаще подвергаемых холодной деформации (прокатке, штамповке), температура отжига находится в интервале (680 ÷ 700) °С. Отжиг

калиброванных прутков (холодная протяжка) из высокоуглеродистой легированной стали (хромистой, хромо-кремнистой и др.) проводится при 730 °С в течение от 0,5 до 1,5 ч.

Гомогенизация или диффузионный отжиг

Гомогенизации (диффузионному отжигу) подвергают стали с целью уменьшения 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 ÷ 1200) °С - на (180 ÷ 300) °С выше температуры $A_{сз}$, длительной выдержке (10 ÷ 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.

Перейдем к видам отжига 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.

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 ÷ 40) °С верхней критической точки $A_{сз}$, и медленным охлаждением.

Температуру нагрева для деталей, изготовленных из углеродистых сталей, определяют по диаграмме состояния, а для легированных сталей - по положению их критической точки $A_{сз}$, имеющейся

в справочных таблицах. 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.

Высоколегированные стали целесообразнее подвергать изотермическому отжигу.

Изотермический отжиг

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 $(100 \div 150)^\circ\text{C}$). 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.

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 зёрнами, 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.

Нормализация

Если после нагрева выше A_{c3} произвести охлаждение на воздухе, то это будет первым шагом к отклонению практически равновесного состояния. 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 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; заэвтектоидной – выше A_{cm} также на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, непродолжительной выдержке для прогрева сядки 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.

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) %C 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, но по сравнению с улучшенным состоянием нормализованная сталь

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

Заканчивая рассмотрение операций отжига, нужно заметить, что описанные виды отжига очень часто совмещают друг с другом или с другими термическими операциями.

Краткая характеристика видов предварительной термической обработки и область их применения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Виды предварительной термической обработки

Наименование обработки	Краткая характеристика и применение	Режим
Отжиг	Отжиг, чаще всего, это предварительная термическая обработка, которая заключается в медленном охлаждении нагретой стали (с печью, в горячей золе, песке, цементе и т.п. с минимально возможной скоростью, порядка (50 ÷ 100) °C/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. В зависимости от температуры нагрева подразделяется: <ul style="list-style-type: none"> - полный; - неполный; - диффузионный; - рекристаллизационный 	Скорость охлаждения: до (50 ÷ 100) °C/час для углеродистых; (20 ÷ 60) °C/час для легированных сталей, затем на воздухе
I рода		
Отжиг для снятия напряжений	Снятие внутренних напряжений в изделии после технологических процессов изготовления, в т.ч. после	Температура нагрева ниже критической A_{c1} (727 °C),

Наименование обработки	Краткая характеристика и применение	Режим
(низким отжиг или высокий отпуск)	проведения термической обработки по другим режимам	структурных превращений не происходит
Рекристаллизационный отжиг	Снимает наклеп, увеличивая пластичность и уменьшая твердость; улучшает обрабатываемость. Все стали после холодной штамповки либо грубой механической обработки	Температура нагрева на $(20 \div 50)^\circ\text{C}$ ниже A_{c1}
Диффузионный отжиг (гомогенизация)	Выравнивает химический состав по всему сечению. Отливки из легированных доэвтектоидных сталей	Температура нагрева $(1100 \div 1200)^\circ\text{C}$ - на $(180 \div 300)^\circ\text{C}$ выше температуры A_{c3} , длительной выдержке $(10 \div 20)$ часов при этой температуре и последующем медленном охлаждении
II рода		
Полный отжиг	выравнивает структуру по всей площади сечения; снижает твердость и облегчает обрабатываемость; снимает внутренние напряжения; ликвидирует перегрев, измельчая структуру. Применяется для поковок и отливок только из доэвтектоидных сталей. Для заэвтектоидных сталей полный отжиг с нагревом выше A_{cm} вообще не используют, так как при медленном охлаждении после такого нагрева образуется грубая сетка вторичного цементита, ухудшающая механические свойства	Температура нагрева на $(30 \div 50)^\circ\text{C}$ выше A_{c3}
Неполный отжиг (сфероидизация)	Обеспечивает получение зернистого перлита, обладающего лучшей обрабатываемостью, чем пластинчатый перлит	Температура нагрева на $(30 \div 40)^\circ\text{C}$ выше A_{c1}
Нормализация	- выравнивает и измельчает структуру; - улучшает механические свойства стали; - разрушает карбидную сетку у заэвтектоидных сталей. Применяется после горячей или грубой механической обработки стали, перед цементацией и после нее	Температура нагрева на $(30 \div 80)^\circ\text{C}$ выше A_{c3} (A_{cm}), охлаждение на спокойном воздухе

Окончательная (упрочняющая) термообработка

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

Рассмотрим отдельно каждый вид.

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 отличных один от другого вида закалки:

- 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. Закалку на мартенсит применяют не только к сталям, но и к некоторым сплавам цветных металлов.

Закалка без полиморфного превращения в сочетании со старением является основным способом упрочнения сплавов на основе цветных металлов. Ее промышленное использование началось одновременно с применением дуралюмина в авиастроении.

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

Температура нагрева и время выдержки должны быть такими, чтобы произошли необходимые фазовые изменения, например, образование высокотемпературной фазы из одной или нескольких низкотемпературных фаз, растворение избыточной фазы в матричной и др. 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.

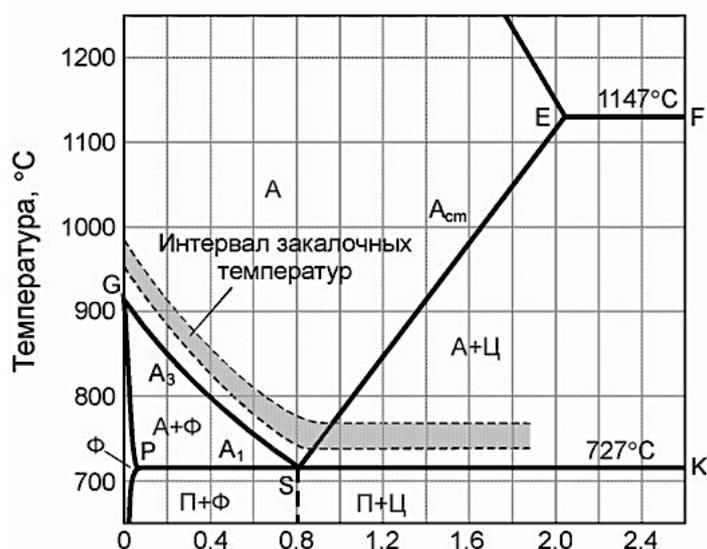


Рисунок 6. Интервал закалочных температур

Т.о. закалка предотвращает превращение аустенита в перлит. В результате при нормальной температуре сохраняются состояния мартенсита, троостита или сорбита. Для достижения максимальной твердости стремятся получить мартенситную структуру.

Закалка стали заключается в нагреве (выше температуры фазовых превращений) на $(30 \div 50) \text{ }^\circ\text{C}$ выше $A_{с3}$ для доэвтектоидных сталей или $A_{с1}$ для заэвтектоидных сталей, выдержке для завершения фазовых превращений и последующем охлаждении со скоростью выше критической.

Критическая скорость закалки или минимальная скорость охлаждения ($u_{кр}$) – 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 $(30 \div 50)^\circ\text{C}$ 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 $(30 \div 50)^\circ\text{C}$ 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. Нагрев выше A_{Cm} при полной закалке приводит к укрупнению зерна аустенита, а в результате быстрого охлаждения – к образованию крупно игольчатого мартенсита с повышенным количеством остаточного аустенита. В этом случае твердость и прочность стали будут ниже, чем при неполной закалке.

Охлаждающие среды

Различная скорость охлаждения изделия при закалке достигается путем применения той или иной охлаждающей (закалочной) жидкости: воды, масла, растворов солей в воде. При охлаждении изделия в жидкости оно отдает часть своей теплоты на превращение в пар соприкасающейся с ним жидкости. Закалка очень часто производится в воду.

Для углеродистых сталей необходимо очень резкое охлаждение ($\approx 1000^\circ\text{C}/\text{сек}$), 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.

Многие легированные стали приобретают мартенситную структуру при охлаждении в холодных или подогретых маслах ($\approx 100^\circ\text{C}/\text{сек}$), а высоколегированные – на воздухе ($\approx 10^\circ\text{C}/\text{сек}$).

Выбор способа охлаждения нагретой под закалку стальной детали также зависит от ее формы, размеров и химического состава стали. Чем сложнее форма 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. Тем тщательнее должен быть выбор способа охлаждения при закалке.

При выборе охлаждающей среды необходимо учитывать такие характеристики стали как закаливаемость и прокаливаемость стали.

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

Разные сорта и марки стали имеют различную закаливаемость, т.е. способность воспринимать закалку. Закаливаемость оценивается по наибольшей твердости, получаемой в результате 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 с мартенситной и троосто-мартенситной структурой, обладающей высокой твердостью, на определенную глубину. 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).

Т.о., выбор того или иного способа охлаждения при закалке определяется, во-первых, получением наибольшей прокаливаемости; во-вторых, минимальным уровнем остаточных внутренних напряжений, чтобы уменьшить коробление деталей.

Используются несколько способов закалки, которые классифицируются по методу охлаждения:

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

Закалка в двух охладителях (через воду в масло). 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 $\text{KOH}+\text{NaOH}$), 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 закаляются 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 стали холодом. Обработку стали 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 ÷ 1,5) часа. Обработка холодом обычно применяется для инструмента из быстрорежущих сталей и деталей шарикоподшипников с целью повышения твердости; для стабилизации размеров точного измерительного инструмента (например, калибров).

Все рассмотренные выше виды закалки можно отнести к объемной. Далее рассмотрим такой как поверхностная закалка.

Поверхностная закалка

Поверхностная закалка (см. Рисунок 7) характеризуется изменением 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.

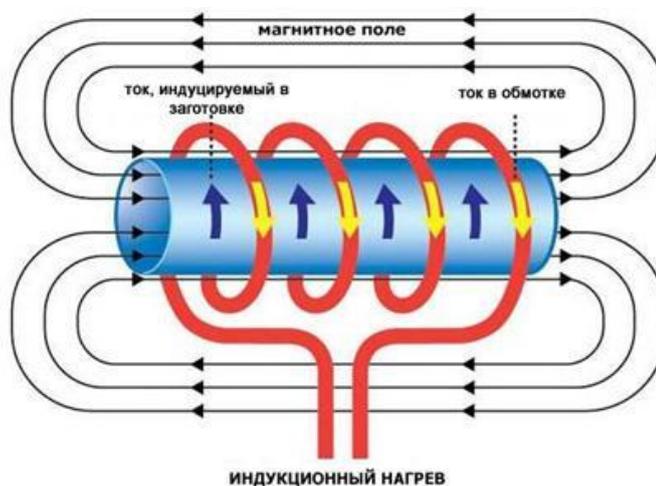


Рисунок 7. Метод поверхностной закалки

Высокочастотный нагрев основан на следующем явлении. 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.

Применение нагрева ТВЧ для поверхностной закалки машинных деталей и инструмента позволяет резко сократить продолжительность технологического процесса термической обработки.

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;
- существенное 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: нагреваемый слой во многих случаях составляет небольшую часть деталей. Данный факт сказывается на стоимостных характеристиках готового изделия;
- возможность изготовления из более дешевой углеродистой стали.

Закалка не является окончательной операцией термической обработки. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжения, вызванные закалкой, и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки обязательно подвергается отпуску.

Отпуск

Закаленная сталь очень твердая, но хрупкая, обладает низкой пластичностью и имеет большие внутренние напряжения. В таком состоянии изделие не работоспособно, не надежно в эксплуатации. Поэтому для уменьшения внутренних напряжений и повышения пластичности, снижения твердости после закалки всегда следует еще одна операция термической обработки, которая называется отпуск. При отпуске происходит распад мартенсита, переход к более устойчивому состоянию. Механизм протекающих превращений при отпуске сталей – диффузионный, он определяется температурой и продолжительностью нагрева.

Отпуск стали заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже A_{c1} , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью. Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате которой сталь приобретает требуемые механические свойства. Внутренние напряжения, возникающие при закалке, в результате отпуска снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска и чем медленнее охлаждение, тем меньше остаточных напряжений. По этой причине изделия сложной формы во избежание их коробления после отпуска при высоких температурах следует охлаждать медленно.

Основное влияние на свойства стали оказывает температура отпуска. Чем выше температура отпуска, тем меньше твердость отпущенной стали. Различают три вида отпуска.



Первое превращение, протекающее в интервале (80 ÷ 200) °С, соответствует выделению из мартенсита тонких пластин – карбида Fe₂C. Выделение углерода из решетки приводит к уменьшению степени ее тетрагональности. Полученный при этом мартенсит, имеющий степень тетрагональности, близкую к 1, называется отпущенным. При нагреве закаленной стали выше 300 °С происходит полное выделение углерода из раствора и снятие внутренних напряжений. Сталь состоит из мелкодисперсной смеси феррита и цементита (троостит отпуска). При нагреве до температуры выше 480 °С идет процесс коагуляции (укрупнения) карбидных частиц и максимальное снятие остаточных напряжений. Формируется структура сорбита отпуска.

Низкий отпуск проводится с нагревом при (150 ÷ 200(250)) °С. При этом снижаются внутренние напряжения и некоторое уменьшение хрупкости мартенсита. Повышается прочность и немного улучшается вязкость без заметного снижения твердости. Закаленная сталь после такого отпуска 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 ÷ 1,3) %С. Структура после низкого отпуска – мартенсит отпуска.

Средний отпуск выполняется при (350 ÷ 500) °С. Цель среднего отпуска состоит в некотором снижении твердости при значительном увеличении предела упругости. и применяется, главным образом, для пружин и рессор, а также для штампов. Он обеспечивает высокие пределы упругости и выносливости. Температуру отпуска надо выбирать так, чтобы не вызвать необратимой отпускной хрупкости.

Средний отпуск применяют для стали с содержанием углерода (0,5 ÷ 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 ÷ 680) °С. Цель высокого отпуска – 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.

Время выдержки при низком отпуске составляет от 1 до (10 ÷ 15) часов, так как при таких низких температурах диффузия углерода идет медленно. Для среднего и высокого отпуска обычно достаточно (1 ÷ 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.

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

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

Отпускная хрупкость

При определенных температурах и медленном охлаждении в сталях появляется отпускная хрупкость (temper brittleness).

Обычно с повышением температуры отпуска ударная вязкость увеличивается, а скорость охлаждения не оказывает влияния. Но для некоторых сталей наблюдается снижение ударной вязкости. Отпускной хрупкостью называют резкое падение ударной вязкости при отпуске при определенных температурах.

Различают два вида отпускной хрупкости – *низкотемпературную* (I рода) и *высокотемпературную* (II рода).

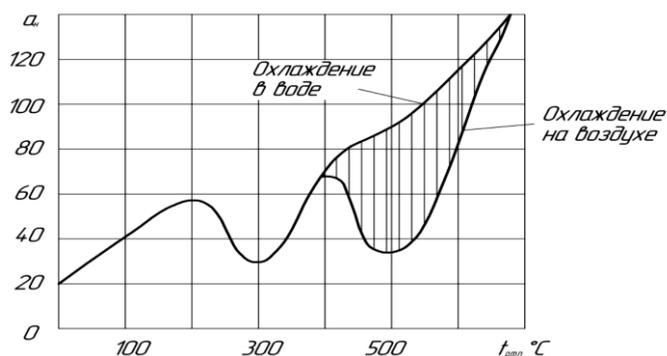


Рисунок 8. Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска

Отпускная хрупкость I рода (необратимая): наблюдается при отпуске как легированных, так и углеродистых сталей в температурном интервале (250 ÷ 400) °C. Она не зависит от скорости охлаждения. Это явление связано с неравномерностью превращения отпущенного мартенсита по границам 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) °C не приводит к отпускной хрупкости.

Отпускная хрупкость II рода (обратимая): наблюдается у легированных сталей при медленном охлаждении после отпуска в области (450 ÷ 650) °C. При этом 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.

Старение

Закаленный сплав находится в метастабильном состоянии и обладает повышенной энергией Гиббса. При закалке без полиморфного превращения и в подавляющем большинстве случаев при закалке с полиморфным превращением образуется пересыщенный твердый раствор и закаленный сплав стремится понизить свою энергию и перейти в более равновесное состояние, в результате чего твердый раствор распадается.

Уже 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.

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.

Главным процессом при старении и отпуске большинства закаленных промышленных сплавов является распад метастабильного твердого раствора. При этом сплав переходит в более стабильное состояние, хотя обычно и далекое от истинного равновесия, для которого характерен абсолютный минимум энергии Гиббса. Процессы распада пересыщенного раствора в закаленном сплаве протекают самопроизвольно с выделением теплоты превращения.

Факт нагрева сплава не противоречит представлению о самопроизвольности процессов, происходящих в сплаве при старении и отпуске, так как 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 подчиненную роль.

Поэтому главным процессом является распад пересыщенного твердого раствора. В результате старения происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска, после старения увеличиваются прочность и твердость, и уменьшается пластичность.

Старение сплавов связано с переменной растворимостью избыточной фазы, а упрочнение при старении происходит в результате дисперсионных выделений при распаде пересыщенного твердого раствора и возникающих при этом внутренних напряжений.

Основное назначение старения – повышение прочности и стабилизация свойств.

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.

Краткая характеристика видов окончательной термической обработки и область их применения представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Виды окончательной термической обработки

Наименование обработки	Краткая характеристика и применение	Режим
Закалка	Закалка предотвращает превращение аустенита в перлит. В результате при нормальной температуре сохраняются состояния мартенсита, троостита или сорбита. Для достижения максимальной твердости стремятся получить мартенситную структуру. Высокий нагрев и прогрев всего объема или определенных поверхностных слоёв до температуры закалки, выдержка и последующее охлаждение со скоростью, обеспечивающей преимущественное образование мартенсита, с целью упрочнения стали. В зависимости от температуры нагрева закалка подразделяется на полную и неполную. Широко применяется для всех групп сталей	Скорость охлаждения и охлаждающая среда (вода, масло, воздух и т.п.) назначаются в зависимости от химического состава стали и требований, предъявляемых к детали
Полная закалка	Применяется для эвтектоидных и доэвтектоидных сталей, обеспечивая максимально возможную твердость	Температура нагрева на $(30 \div 50)^\circ\text{C}$ выше A_{c3}
Неполная закалка	Применяется для заэвтектоидных сталей, обеспечивая им максимально возможную твердость	Температура нагрева на $(30 \div 50)^\circ\text{C}$ выше A_{c1}
Поверхностная закалка	Повышает твердость только поверхностного слоя. Применяется в тех случаях, когда необходима высокая износостойкость поверхности и мягкая сердцевина детали	Нагрев поверхностного слоя при помощи токов высокой частоты (ТВЧ) или горелок до температуры выше A_{c3} с последующим быстрым охлаждением
Отпуск	нагрев и прогрев после предварительно проведенной закалки при температуре ниже температуры начала образования аустенита эвтектоидного состава (A_{c1}), выдержка и последующее охлаждение для перевода структуры из неравновесного состояния в состояние, близкое к равновесию. Служит для придания стали необходимых механических свойств. В зависимости от температуры нагрева подразделяется на: низкий, средний и высокий	Нагрев ниже A_{c1} , скорость охлаждения назначается в зависимости от химического состава
Низкий отпуск	Понижает внутренние напряжения, возникшие в процессе закалки, без заметного снижения твердости и хрупкости. Режущий инструмент,	Температура нагрева $(150 \div 250)^\circ\text{C}$. Для специальных легированных

Наименование обработки	Краткая характеристика и применение	Режим
	не подвергающийся ударам; измерительный инструмент; поверхности деталей, работающих в условиях трения	сталей интервал температур иной
Средний отпуск	Снижает внутренние напряжения и хрупкость, возникшие в процессе закалки, при некотором понижении твердости. Режущий инструмент, подвергающийся ударным нагрузкам; пружины	Температура нагрева (300 ÷ 500) °С. Для специальных легированных сталей интервал температур иной
Высокий отпуск	Снижает внутренние напряжения и хрупкость, возникшие в процессе закалки; увеличивает вязкость и значительно понижает твердость; после высокого отпуска возможна обработка лезвийным инструментом. Ответственные детали машин; валы, шатунные болты и т.п.	Температура нагрева (500 ÷ 700) °С. Для специальных легированных сталей интервал температур иной
Улучшение	Двойная термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска	См. закалку и высокий отпуск
Искусственное старение (прерывистое)	Стабилизирует размеры детали. Применяется после отпуска при обработке особо точных изделий, например, калибров, прецизионных деталей топливной аппаратуры	Нагрев до (110 ÷ 140) °С, выдержка 2 ÷ 3 часа, охлаждение в масле при (20 ÷ 25) °С. Операция повторяется 3 ÷ 4 раза. Иногда заменяется выдержкой до 100 ч
Обработка холодом	Увеличивает твердость, переводя остаточный аустенит в мартенсит. Применяется немедленно после закалки (до отпуска) для деталей ответственного назначения и инструмента, изготовленных из углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода свыше 0,6 %. После обработки холодом необходим низкий отпуск	Температура охлаждения от минус 20 до минус 100 °С в зависимости от химического состава стали

Термомеханическая обработка стали (ТМО)

Термомеханическая обработка (ТМО) – это процесс нагрева стали до температуры выше $A_{с3}$, 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 $A_{с3}$, пластически деформируется при этой температуре и закаливается.

При НТМО сталь нагревается до температуры выше $A_{с3}$, 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).

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, состоящие 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.

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 в обоих случаях 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 ÷ 2,0 раза меньше и

сохраняется при нагреве только до (180 – 125) °С, в то время как азотированный удерживает твердость до (600 ÷ 650) °С.

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 термической обработки и критерии оценки качества термообработки

Выбор вида 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.

Разработка технологических процессов термической обработки в общем случае включает в себя следующие работы:

- определение последовательности и содержания технологических операций;
- назначение и расчет режимов обработки;
- выбор оборудования;
- нормирование процесса;
- выбор средств контроля и испытаний;
- оформление рабочей документации на технологический процесс.

Дефекты термической обработки

Нарушения технологии проведения термической обработки металлических изделий приводят к возникновению разнообразных дефектов.

Основные из них переведены ниже.

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.

Кроме того, 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 защиты деталей и заготовок от окисления и обезуглероживания при высоких температурах в рабочее пространство печи вводят защитные газы. Можно также создать защитную (контролируемую) атмосферу, которая может быть науглероживающей.

Контролируемые атмосферы обычно вводят при отжиге или закалке в рабочее пространство печи. В зависимости от химического состава контролируемые атмосферы могут быть нейтральными, восстановительными или науглероживающими.

Контролируемые атмосферы получают различными методами: разложением аммиака на азот (25%) и водород (75%), газификацией древесного угля, осветительного керосина и т. п.

Наиболее универсальной и эффективной газовой средой является эндотермическая, получаемая в результате переработки природного газа в специальных установках-эндотермических генераторах.

Под эндотермической понимается атмосфера, получаемая в генераторах, где реакции протекают с поглощением тепла.

Эндотермическая атмосфера имеет следующий состав: ~ 20% CO; - 40% H₂; ~40% N₂. Она может быть использована почти для всех термических и химико-термических операций, причем состав ее можно регулировать по точке росы.

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.

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 возникновению пятнистой закалки 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 проведения термической обработки

При термической обработке заготовок (деталей), сварных соединений и наплавленных деталей следует контролировать соблюдение требований ТД и 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, в которых изделия нагреваются под термическую обработку, должны обеспечить распределение температуры в рабочей части печи в пределах допуска, указанного в режиме термической обработки. Все печные агрегаты должны по установленному графику (инструкциям) проходить проверку на распределение температуры по поду и высоте печи.

После ремонта печного агрегата, а также при замене нагревателей, следует производить регулирование печи с контрольной проверкой. При проверке устанавливается рабочая зона печи, в пределах которой можно располагать детали, заготовки, сварные сборки при термической обработке.

Перед началом каждой смены необходимо проверять состояние пирометрической аппаратуры, регулирующей и контролирующей температуры печи.

Для контроля режимов термической обработки деталей изделий АС следует использовать термоэлектрические преобразователи (термопары) с устройствами для автоматической записи параметров режима. Термопары должны быть установлены в печи непосредственно на подвергаемых термической обработке сварных (наплавленных) изделиях. Количество и расположение термопар должны обеспечивать возможность контроля по всему объему печи при общей термической обработке

и контроля зон нагрева при местной термической обработке. При внепечной термической обработке допускается использование других средств контроля режимов термической обработки, обеспечивающих требуемую точность измерения температуры (радиационные пирометры и др.).

При термической обработке изделий АС со сварными соединениями III категории по согласованию с головной материаловедческой организацией допускается контроль режимов термической обработки производить по термопаре, установленной в печи. При этом должны проводиться контрольные нагревы с периодичностью не реже одного раза в три месяца, подтверждающие, что разность показаний термопар, установленных в печи и непосредственно на термообрабатываемом изделии (в конкретной точке), не превышает 15 °С, с записью результатов контроля в специальном журнале.

После выполнения термической обработки должны быть зафиксированы номер садки и номер печи (для печной термической обработки), для проведения термической обработки, данные партии металла и производственный шифр (номер) сварного (наплавленного) изделия или сварного соединения.

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 окалины зависит от температуры и продолжительности нагрева, химического состава металла. Стали окисляются 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 зёрнами 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.

