

Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Виды термической обработки (ТО) сталей

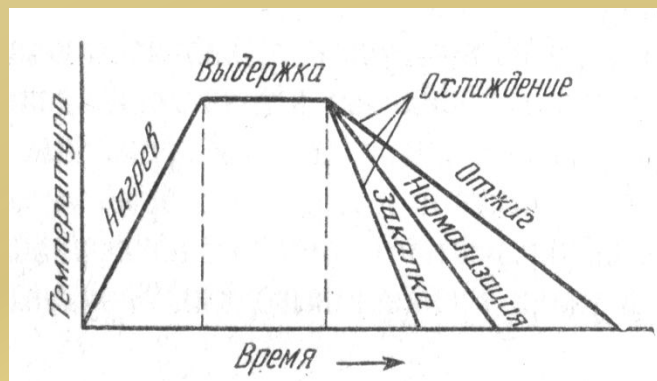
Отжиг и нормализация. Сходство и отличие.

Закалка и ее виды. Особенности.

Отпуск и его виды. Особенности.

Виды химико-термической обработки (ХТО) сталей.

Области применения сталей, подвергнутых ТО и ХТО сталей.



Технология термической обработки стали базируется на теории структурных и фазовых превращений при нагревании и охлаждении стали.

Режим термической обработки обычно представляют в координатах **температура — время**. Типичный график такой обработки включает стадию **нагревания** стали до заданной температуры, **выдержку** при ней и **охлаждение** с требуемой скоростью. Как правило, изделие в процессе изготовления подвергается нескольким операциям термической обработки, каждая из которых выполняет определенную задачу:

– получение равновесного химического состава, фазового и структурного состояния стали (отжиг);

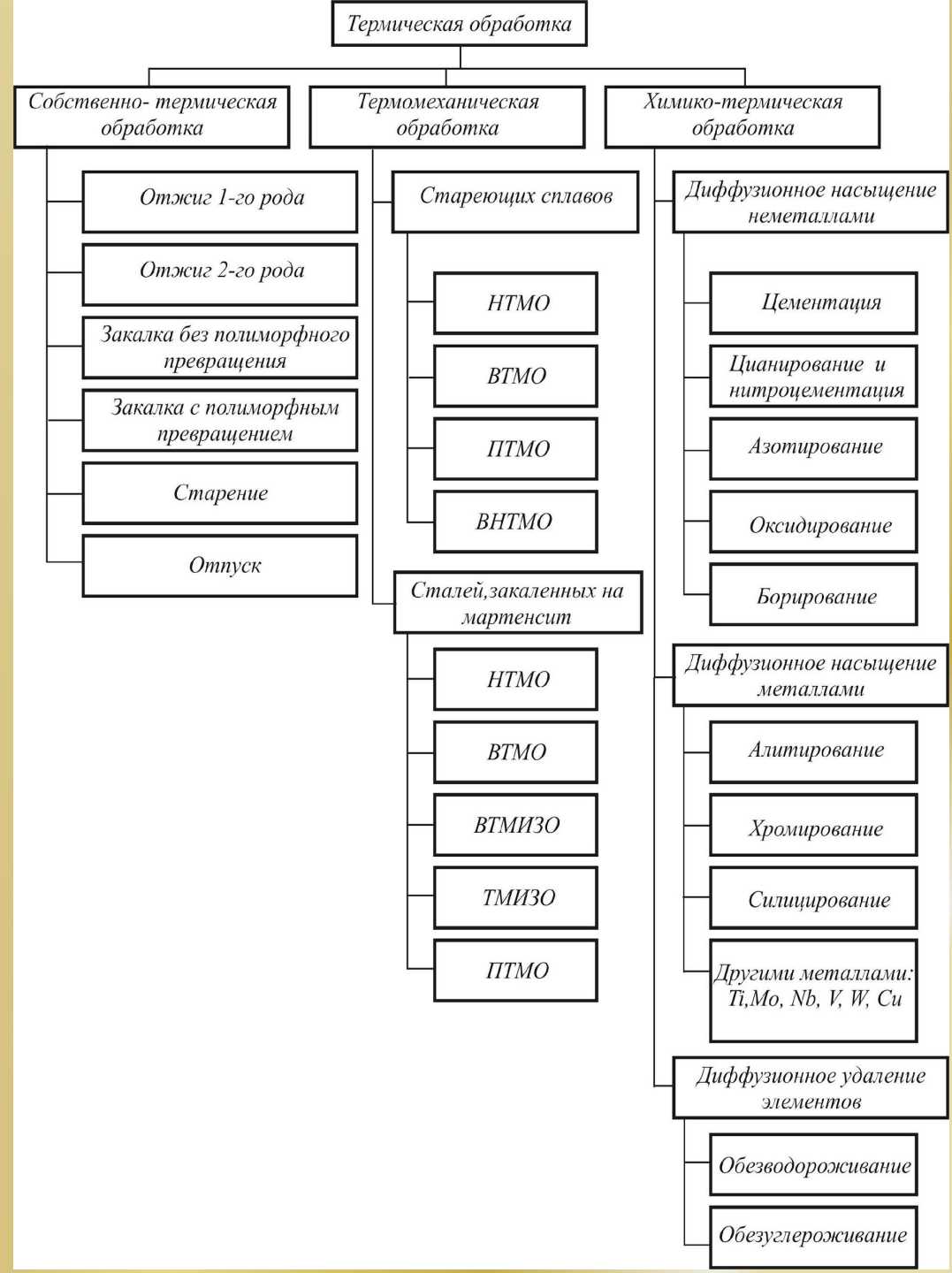
– повышение твердости и прочности (закалка);

– достижение наилучшего сочетания механических свойств (отпуск).



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Классификация основных видов термической обработки металлических материалов (по А.А. Бочвару)



Отжиг первого рода устраняет неоднородность в металлических сплавах, вызванную предшествующей обработкой. Его производят при температуре выше или ниже температуры фазовых превращений металла и подразделяют на гомогенизацию (диффузионный отжиг), рекристаллизационный отжиг и отжиг для снятия остаточных напряжений. Технологические режимы этих видов отжига приведены на рисунке 1.

Гомогенизацию применяют для устранения дендритной или внутрикристаллитной ликвации стальных слитков и крупных отливок. Процесс состоит из операций нагревания изделия до температуры 1100...1200°C, выдержки при этой температуре в течение 8...20 ч и **медленного охлаждения** изделия. Общее время гомогенизации зависит от массы обрабатываемого изделия и может достигать 50...100 ч. Поскольку гомогенизация иногда обуславливает сильный рост зерна стали, часто после такого отжига применяют полный отжиг или нормализацию для измельчения зерна.

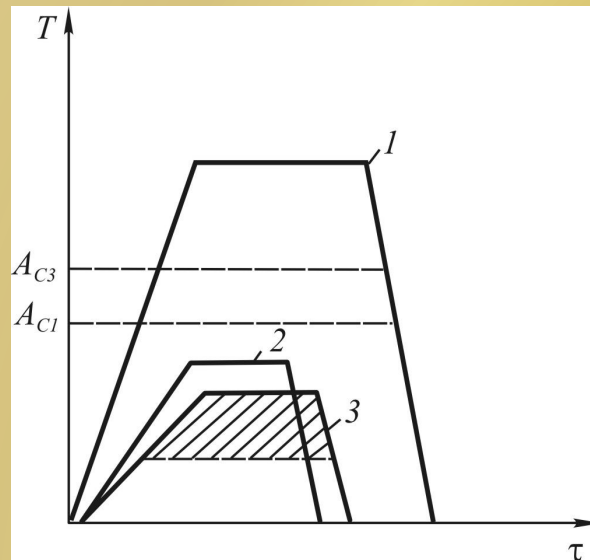


Рисунок 1 - Схема отжига первого рода.

1 – гомогенизация, 2 – рекристаллизационный,
3 – отжиг для снятия остаточных напряжений



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

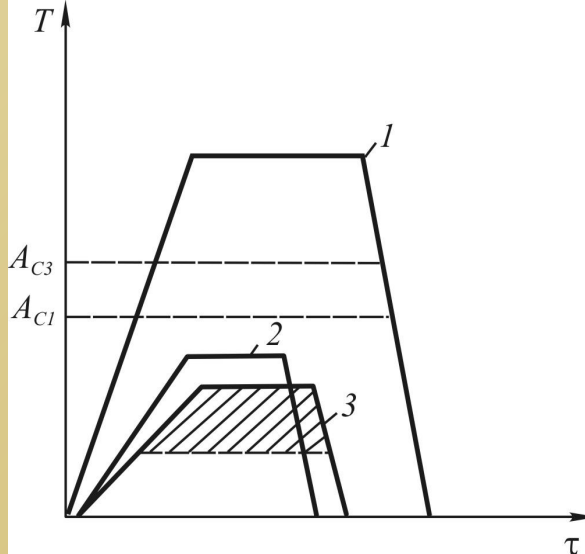


Рисунок 1 - Схема отжига первого рода.

1 – гомогенизация, 2 – рекристаллизационный, 3 – отжиг для снятия остаточных напряжений

Рекристаллизационному отжигу подвергают холоднодеформированную сталь для снятия наклепа. Сплав нагревают выше температурного порога рекристаллизации, выдерживая при этой температуре (обычно 700°C) в течение 0,5...1,5 ч, с последующим охлаждением. В процессе такого отжига кроме рекристаллизации феррита происходит укрупнение и сфероидизация частиц цементита, что способствует дополнительному повышению пластичности стали.

Отжиг для снятия остаточных напряжений используют для стальных изделий после литья, сварки или механической обработки. Его проводят при температурах, которые выбирают в зависимости от вида предшествующей обработки:

после резания — $570...600^{\circ}\text{C}$, после сварки — $650...700^{\circ}\text{C}$, после шлифования — $160...180^{\circ}\text{C}$. Продолжительность такого отжига обычно составляет 2...3 ч. Остаточные напряжения снимаются также в процессе рекристаллизационного отжига, отжига второго рода и при высоком отпуске закаленной стали.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Отжиг второго рода осуществляют для снижения фазовой неоднородности стали и проводят при температурах, превышающих температуру фазовых превращений. В результате такого отжига образуются структурные компоненты стали, соответствующие диаграмме состояния железо — цементит. Различают четыре разновидности отжига второго рода: полный, изотермический и неполный отжиг, а также нормализация (рисунок 2).

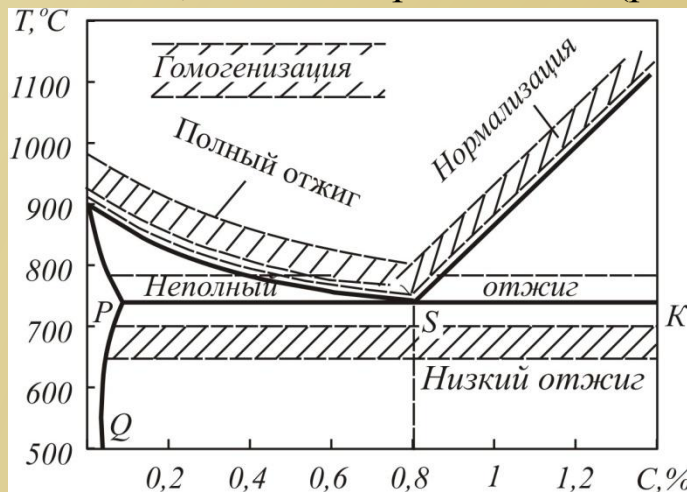


Рисунок 2 - Диапазоны оптимальных

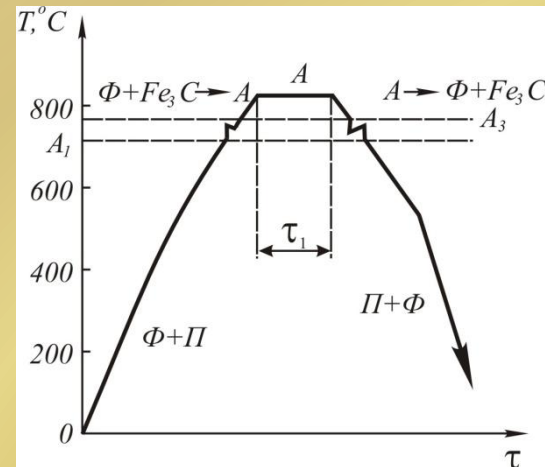


Рисунок 3 - Схема полного

температур нагрева при различных видах отжига отжига доэвтектоидной стали

Полный отжиг применяют для перекристаллизации доэвтектоидной стали с целью измельчения зерна и снятия остаточных напряжений. Отжиг складывается из нагревания изделия до температур на 30..50°C выше температуры A_3 , прогрева до завершения фазового превращения в стали и **медленного охлаждения изделия вместе с печью**. В результате нагревания, скорость которого зависит от типа печи и не ограничена определенным значением, в структуре стали образуется мелкозернистый аустенит, который при охлаждении превращается в мелкозернистый перлит.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Время τ_1 выдержки изделия при температуре отжига выбирают в зависимости от массы изделия из расчета 0,5...1 ч на 1т металла. С целью экономии энергии изделия обычно загружают в печь, еще не остывшую после обработки предыдущей партии изделий. Скорость охлаждения зависит от устойчивости аустенита – чем она больше, тем меньше скорость. Для легированных сталей она составляет 10...100°С/ч, для углеродистых – до 200...250°С/ч.

Изотермический отжиг (рисунок 4) применяют для обработки легированных сталей. Изделие нагревают и выдерживают при температуре на 30...50°С выше A_3 (обычно – 850 °С), а затем охлаждают, перенося в другую печь, в которой поддерживается температура, соответствующая минимальной устойчивости переохлажденного аустенита, т.е. ниже A_1 (обычно 660 – 680°С).

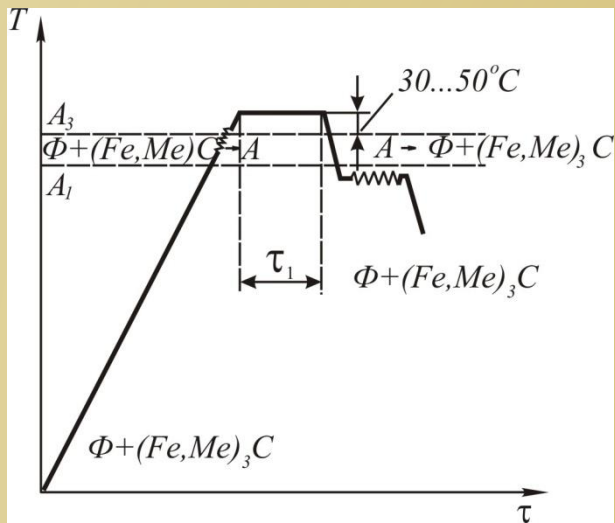


Рисунок 4 - Схема

6 изотермического отжига

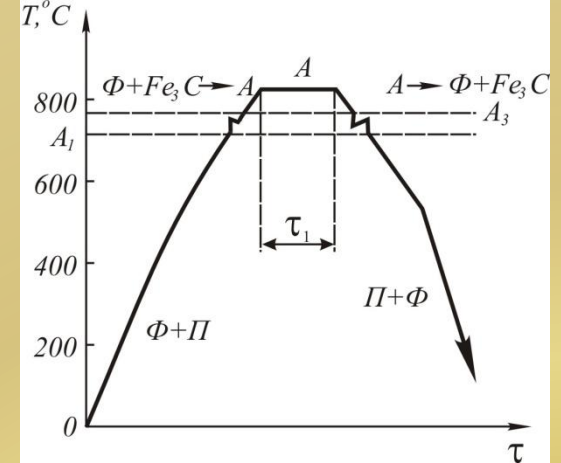


Рисунок 3 - Схема полного отжига доэвтектоидной стали

Во время выдержки при этой температуре протекает перлитное превращение аустенита, после чего изделие охлаждают на воздухе. Для небольших деталей время охлаждения при изотермическом отжиге по сравнению с полным снижается в 2 – 3 раза. После отжига уменьшается шероховатость поверхности деталей и улучшается обрабатываемость резанием.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Неполный отжиг отличается от полного тем, что сталь нагревают до более низкой температуры. Этот вид отжига также называют сфероидизацией, так как он позволяет получить зернистую структуру перлита вместо пластинчатой. Структура приобретает зернистость вследствие того, что при небольшом (на $10...30^{\circ}\text{C}$) превышении температуры A_1 неоднородности в структуре аустенита выполняют роль зародышей последующей кристаллизации. При перлитном превращении в процессе охлаждения стали образуется структура цементита. Если сталь нагреть до более высокой температуры, аустенит гомогенизируется, а цементит почти весь растворяется в нем. Последующее охлаждение приведет к получению пластинчатой структуры перлита.

Температуру нагрева при сфероидизации эвтектоидных сталей выбирают в диапазоне $750...760^{\circ}\text{C}$ и $770...790^{\circ}\text{C}$ – для заэвтектоидных. Охлаждение выполняют с малой скоростью до температуры образования карбидов ($620 - 680^{\circ}\text{C}$), и при этой температуре проводят выдержку стального изделия в течение $1...3$ ч, а затем быстро охлаждают на воздухе. Неполный отжиг эвтектоидных сталей применяют в случаях, когда необходима перекристаллизация только перлитной составляющей стали, чтобы снизить размер её зерна. Сталь с зернистой перлитной структурой обладает меньшей твердостью и большей пластичностью по сравнению с пластинчатой перлитной структурой, что способствует ее обрабатываемости резанием.

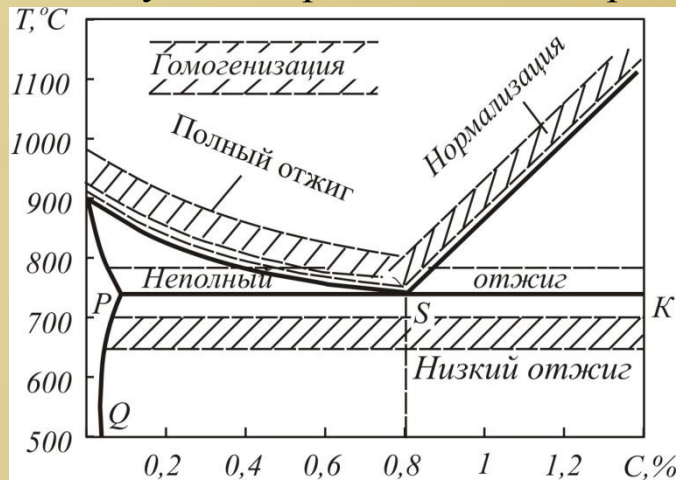


Рисунок 5 - Диапазоны оптимальных температур нагрева при различных видах отжига



Лекция 12 Технологии

термической и химико-

термической обработки сталей

Нормализация отличается от полного отжига в основном условиями охлаждения, которое проводят на воздухе с большей скоростью, чем при обычном отжиге. Так же, как и при полном отжиге, в процессе этой обработки происходит перекристаллизация стали и устраняется ее крупнозернистость. **Прочность и твердость нормализованной стали на 15...20% выше соответствующих характеристик отожженной стали.** Для низкоуглеродистых сталей нормализацию назначают вместо отжига, чтобы при некотором повышении твердости улучшить обрабатываемость резанием и улучшить качество обработанной поверхности деталей. Для среднеуглеродистых сталей нормализацию часто используют вместо закалки. Нормализацией в сочетании с высоким отпуском заменяют полный отжиг легированных сталей. Такое сочетание является более экономичным и производительным, чем отжиг.

З а к а л к а — основной вид упрочняющей термической обработки конструкционных и инструментальных сталей. Поскольку в процессе закалки структура стали становится резко неравновесной и в ней возникают большие остаточные напряжения, после закалки обычно следует отпуск, позволяющий оптимизировать механические свойства стали.

Главным отличием закалки от других операций термической обработки является **высокая скорость охлаждения, достигаемая применением специальных закалочных сред.**

Для доэвтектоидной стали температура должна превышать A_3 на **30...50°C**, чтобы завершилось превращение феррита в аустенит. Для эвтектоидных и заэвтектоидных сталей конечная температура нагрева выбирают в интервале температур, на 30...50°C превышающих A_1 . Перегрев углеродистых сталей, выше указанных на рисунке 5 температур при закалке приводит к ухудшению структуры, т.к. имеющийся в структуре таких сталей избыточный цементит переходит в аустенит. Для легированных сталей, содержащих специальные карбиды, допускается перегрев на 150...250°C.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

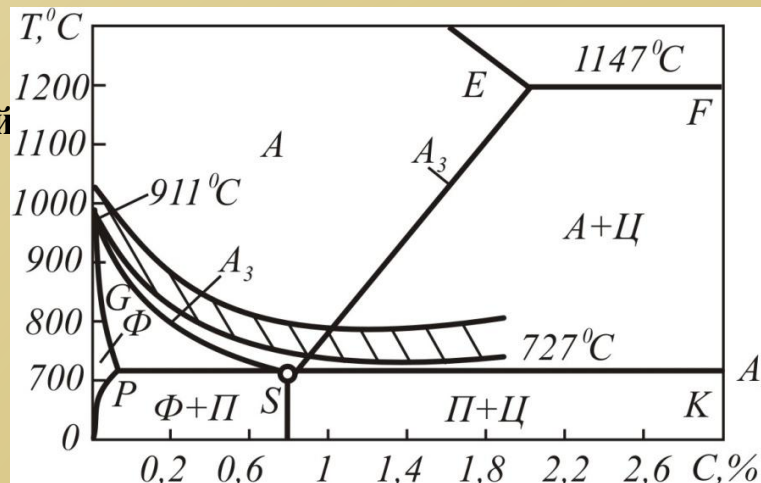


Рисунок 5 - Оптимальный интервал закалочных температур углеродистой стали соответствует заштрихованному участку диаграммы

Продолжительность нагревания и выдержки изделия при заданной температуре выбирают из условия равномерности прогрева всего объема изделия. Поскольку определение оптимальной длительности нагревания и выдержки изделия при температуре закалки зависит от многих факторов (форма и размер изделия, расположение его в печи, тип печи и т. д.), режимы закалки выбирают экспериментально. Ориентировочные значения длительности нагрева составляют

для электропечей 1...2 мин на 1 мм толщины изделия,

пламенных печей – 1 мин на 1 мм толщины изделия,

в соляной ванне – 0,2...0,5 мин на 1 мм толщины изделия,

в свинцовой ванне – 0,1...0,15 мин на 1 мм толщины изделия.

Продолжительность выдержки изделия при температуре закалки обычно составляет 15...25 % от длительности нагревания.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Для предотвращения **обезуглероживания и окисления металла** требуется контролировать состав газовой среды в печи, в которой изделия нагревают под закалку. Обычно используют смеси оксидов углерода, водорода, метана, азота (например, эндотермическую – 21% CO, 40% H₂, 2% CH₄, 37 % N₂ или 20% CO, 20% H₂ и 60% N₂; экзотермическую – 10% CO, 15...16% H₂, до 1,5% CH₄, 68...72 % N₂ или 2% CO, 2% H₂ 96% N₂), а также диссоциированный аммиак – 75 % H₂ и 25 % N₂; технический азот – 2...4% H₂, 98...96% N₂; аргон; гелий и водород. Специальные стали нагревают в основном в вакуумных печах.

Оптимальный выбор **закалочной среды** – один из главных факторов, определяющих качество закалки. В качестве закалочных сред обычно используют **жидкости**, но для некоторых **легированных сталей** достаточная скорость охлаждения обеспечивается применением **атмосферного или сжатого воздуха**. В контакте нагретого металла с кипящей жидкостью интенсивность теплоотвода, а значит, и скорость охлаждения, в большой мере зависят от температуры металла. При погружении закаливаемой детали в жидкость на поверхности детали образуется сплошная паровая рубашка, которая ограничивает отвод теплоты. По мере охлаждения детали эта рубашка прорывается и теплоотвод интенсифицируется (стадия пузырькового кипения).

Выбор закалочной среды в основном определяется маркой стали и видом изделия.

Воду с температурой 18...25°C используют в основном при закалке деталей простой формы и небольших размеров, выполненных из углеродистой стали.

Детали более **сложной формы** из углеродистых и легированных сталей закаляют в **маслах**.

Для закалки **легированных сталей** наряду с маслами часто используют **водные растворы NaCl и NaOH**, обладающие высокой охлаждающей способностью, а также **водные растворы ПАВ и синтетических полимеров**.



Среда	Скорость охлаждения (°C/с) в интервале температур	
	650...550°C	300...200°C
Вода при температуре, °C		
18	600	270
25	500	270
50	100	270
75	30	220
Мыльная вода	30	200
Эмульсия нефтяного масла в воде	70	200
Вода, насыщенная углекислотой	150	200
10%-й водный раствор (при 18 °C):		
едкого натра	1200	300
поваренной соли	1100	300
соды	800	270
5%-й раствор марганцевокислого калия	450	100
Керосин	160...180	40...60
Масло промышленное	120	25
Атмосферный воздух	3	1
Сжатый воздух	30	10



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Свойства углеродистых сталей, подвергнутых закалке, зависят от методов закалки, определяющихся режимами проведения операций нагрева, выдержки и охлаждения. При этом осуществляется предотвращение нежелательного роста напряжений, возникающих в стальных деталях при закалке.

Прерывистую закалку в двух средах используют при обработке изделий из **инструментальных высокоуглеродистых сталей**. Быстрое охлаждение изделий на первой стадии и медленное – на второй. Первую стадию охлаждения осуществляют обычно в воде, затем изделие переносят в масло.

Ступенчатая закалка разработана для упрочнения инструментальных низко- и среднелегированных сталей. Изделие вначале погружают (с выдержкой) в жидкую среду, имеющую температуру выше начала мартенситного превращения стали, а затем окончательно охлаждают на воздухе. Во время выдержки в жидкости температура выравнивается во всем объеме изделия. При ступенчатой закалке иногда используют эффект сверхпластичности сталей в момент мартенситного превращения для правки изделий в специальных приспособлениях, после чего окончательно охлаждают изделия.

Изотермическую закалку применяют для обработки конструкционных легированных сталей, содержащих 0,3...0,5% углерода. Изотермическая выдержка при постоянной температуре стабилизирует структурный и фазовый состав.

Закалка с самоотпуском происходит, если в закалочную среду погружают только часть изделия, а теплота, сохранившаяся в остальной его части, после извлечения изделия из среды вызывает отпуск закаленной части. Такая закалка обеспечивает необходимое для некоторых изделий (например, ударный инструмент) неравномерное распределение твердости. Неравномерная закалка происходит при обрызгивании части изделия закалочной средой (*струйчатая закалка*).



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Закалку некоторых сталей, используемых для изготовления **измерительного инструмента, пружин, деталей подшипников качения**, дополняют немедленной обработкой холодом, которая обуславливает полный перевод в мартенсит остаточного аустенита. Одновременно стабилизируются размеры изделия. Обработку холодом в температурном диапазоне минус (30...196)°С завершают отпуском для снятия напряжений.

Важными **характеристиками** стали, которые необходимо учитывать при назначении технологических режимов закалки, являются **закаливаемость и прокаливаемость**.

Закаливаемость характеризует способность стали к повышению твердости при закалке и **зависит** главным образом **от содержания углерода** в стали. Закаливаемость оценивают по твердости поверхностного слоя стального образца после закалки, поскольку на поверхности скорость охлаждения максимальна.

Прокаливаемость при прочих равных условиях **характеризует толщину закаленного слоя** в образце стали и оценивается расстоянием от поверхности образца до слоя, в котором содержится не менее 50 % мартенсита. Поскольку прокаливаемость зависит от многих факторов (технологическая предыстория, состав стали, режимы закалки и др.), в справочной литературе обычно приводят полосу прокаливаемости стали данной марки (с учетом разброса). Знание прокаливаемости позволяет обоснованно назначать технологический режим закалки.

Прокаливаемость стали зависит от устойчивости аустенита (чем он более устойчив, тем меньше критическая скорость охлаждения) и размера зерна (с его ростом растет прокаливаемость). Легирование стали повышает устойчивость переохлажденного аустенита и в значительной мере способствует увеличению ее прокаливаемости.



Во многих случаях для увеличения характеристик механических свойств достаточно упрочнить поверхностный слой изделия. Достичь этого можно методами **поверхностной закалки**. Все они основаны на быстром нагревании поверхностного слоя выше температур фазовых превращений и создании градиента температуры по сечению детали.

Быстрое последующее охлаждение приведет к тому, что **слой I**, нагретый выше температуры A_3 , закалится полностью, **слой II** (диапазон температур $A_1 \dots A_2$) — **частично**, **слой III** ($T < A_1$) останется **незакаленным**.

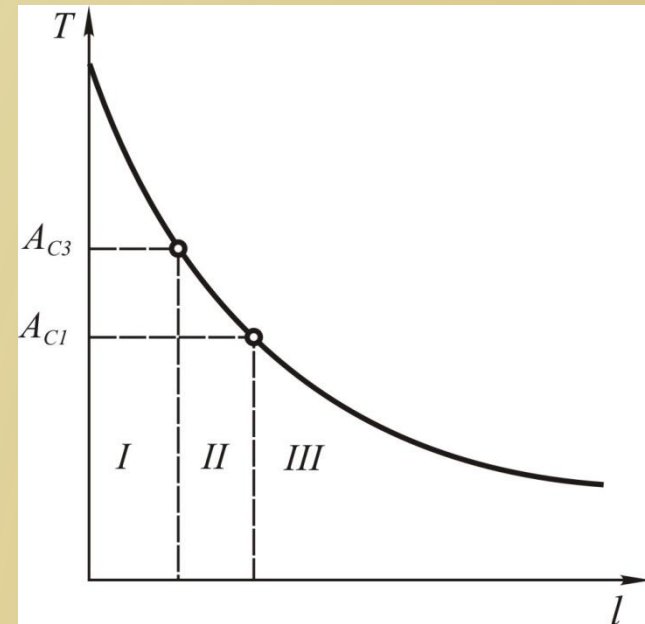


Рисунок 6 - Распределение температуры по сечению образца (l от поверхности в глубину образца) при поверхностной закалке

Наиболее распространены следующие методы поверхностной закалки:

- закалка с индукционным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ);
- газопламенная поверхностная закалка;
- лазерная закалка.



Рисунок 7 - Микроструктура мартенсита:
а – игольчатого, б – речного



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Закалку с индукционным нагревом (нагревом ТВЧ) используют при массовой обработке стальных изделий. Она основана на выделении теплоты при пропускании через изделие переменного тока высокой частоты, который индуцируется индуктором, создающим переменное электромагнитное поле. Нагревание локализуется в поверхностном слое изделия.

Глубину закалки ТВЧ обычно назначают в зависимости от условий работы детали. Обычно она составляет от **1,5...3 мм** (усталостное изнашивание) до **10...15 мм** (высокие контактные нагрузки). **Источником ТВЧ** служат специальные **генераторы** различной мощности. Поскольку закалка с индукционным нагревом экономически оправдана только при обработке больших партий изделий, обычно ее выполняют на автоматизированных установках. Схема устройства для обработки цилиндрических деталей приведена на рисунке 8. В зависимости от размеров изделий применяют различные сочетания нагрева и охлаждения.

Закалку с индукционным нагревом используют в основном для сталей, содержащих 0,4...0,5% углерода (40, 45, 40X, 45X, 40XН и др.). Индукционному нагреву на большую глубину (объемно-поверхностная закалка) подвергают специальные **стали пониженной прокаливаемости**, содержащие 0,55...0,63% углерода и менее 0,5 % примесей (55ПП), а также стали регламентированной прокаливаемости, содержащие около 0,5% углерода, 1% марганца и 0,1% титана (47ГТ).

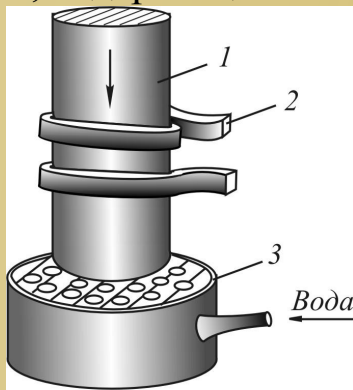


Рисунок 8 - Схема устройства для закалки с нагревом ТВЧ.

- 1 – деталь;**
- 2 – индуктор, подключаемый к генератору ТВЧ;**
- 3 – спрейер, орошающий нагретое изделие водой.**



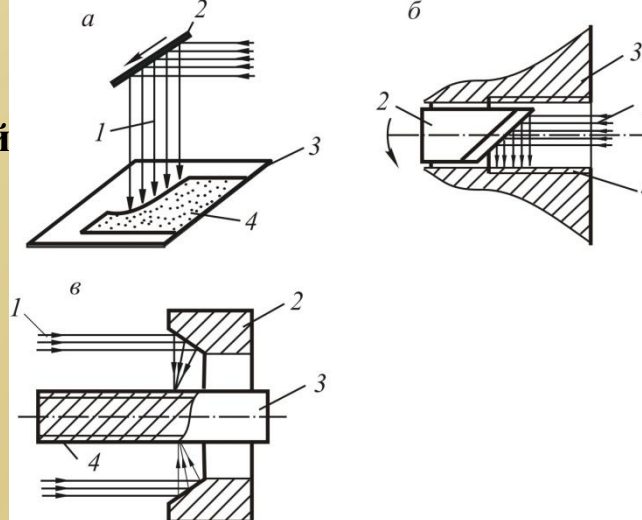


Рисунок 9 - Схемы нагревания с помощью лазера изделий под закалку: *а* – поверхность листового железа, *б* – внутренняя поверхность отверстия, *в* – наружная поверхность цилиндрического изделия.

1 – световой поток; 2 – зеркало; 3 – деталь; 4 – зона закалки

Газопламенную поверхностную закалку применяют для единичных крупных изделий или их малых партий (коленчатые валы особо мощных двигателей, прокатные валы и т. п.). Нагревание поверхностного слоя изделия осуществляют пламенем сгорающего газа ($T \sim 2400...3000^{\circ}\text{C}$). При этом виде закалки в крупном изделии создаются меньшие напряжения, чем при обычной объемной закалке.

Закалка в электролите основана на том, что при пропускании тока через водный электролит (5...10% - ный раствор кальцинированной соды) на катоде (закаливаемая деталь) образуется газовая рубашка водорода. Ток при этом сильно возрастает и деталь нагревается, после чего, отключив ток, можно сразу закалить ее в том же электролите. Способ применяется для закалки небольших деталей массового производства.

При **лазерной закалке** осуществляют высокоскоростной разогрев поверхностного слоя металлического изделия с помощью лазерного луча. Этот вид поверхностного упрочнения предпочтителен по сравнению с традиционными методами в случаях, когда нужно повысить износостойкость поверхностного слоя изделия. Лазерной закалкой можно упрочнять в различных режимах тонкие (до 0,2 мм) и сравнительно толстые (до 3 мм) слои как на небольших участках изделий, так и на поверхностях большой площади.

Схемы некоторых видов лазерной закалки приведены на рисунке 9.



Отпуск является заключительной операцией ТО стали, его цель – придание стальной детали заданного комплекса механических свойств, а также полное или частичное устранение закалочных напряжений. В практике термообработки стальных изделий используют три вида отпуска: низкий, средний и высокий, а также операцию искусственного старения. Общая схема всех этих видов обработки включает **нагрев изделий, выдержку при заданной температуре и охлаждение**.

Низкий отпуск применяют для обработки **углеродистых и низколегированных сталей**, из которых изготавливается **режущий и измерительный инструмент**. Изделия нагревают до $150...200^{\circ}\text{C}$, выдерживают при этой температуре в течение **1...1,5 ч** (в зависимости от размеров) и охлаждают. Закаленная сталь после низкого отпуска имеет структуру отпущенного мартенсита, твердость ее почти не снижается по сравнению с твердостью закаленной стали (**58...63 HRC**), а прочность и вязкость повышаются. Низкому отпуску, как правило, подвергают изделия, прошедшие поверхностную закалку или химико-термическую обработку.

Средний отпуск чаще всего используют для обработки **пружин, рессор и некоторых видов штампового инструмента, изготовленных из углеродистых и легированных сталей**. Схема такого отпуска включает нагрев до $350...500^{\circ}\text{C}$, выдержку при этой температуре от **1...2 до 3...8 ч** в зависимости от массы деталей и охлаждение, выполняемое, как правило, на воздухе. После отпуска при $400...450^{\circ}\text{C}$ охлаждение часто проводят в воде, что позволяет повысить выносливость пружинящих деталей за счет возникновения остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое. При среднем отпуске мартенсит закаленной стали переходит в структуру троостит отпуска, который характеризуется твердостью **40...50 HRC** и наилучшим сочетанием предела упругости и предела выносливости.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Высокий отпуск назначают в основном для деталей из **среднеуглеродистых** конструкционных сталей, для которых совмещение высокого отпуска с закалкой дает наилучшее сочетание прочности и вязкости, поэтому **последовательное применение закалки с последующим высоким отпуском** получило название как одного процесса – **улучшение**. Схема отпуска включает нагревание детали до **500...680°C**, выдержку в течение **1...8 ч** и охлаждение на воздухе (для легированных сталей – в воде или масле с целью предотвращения отпускной хрупкости). Структура закаленной стали после высокого отпуска – **сорбит отпуска (25...30 HRC)**.

Искусственное старение назначают обычно для стабилизации размеров **измерительного инструмента**. Его схема включает нагрев до **120...150°C** и выдержку в течение **10...35 ч** при этой температуре. Выдержка позволяет, не снижая твердости закаленной стали, стабилизировать состояние углерода в ее структуре за счет выделения его в виде дисперсных карбидов.



Химико-термической обработкой (ХТО) называется тепловая обработка металлических изделий в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев. Такая обработка позволяет повысить **твердость, износостойкость, усталостную долговечность и контактную выносливость**, а также **стойкость изделия к окислению и электрохимической коррозии**.

Возможности химико-термической обработки стали во многих случаях шире, чем термической или механической поверхностной обработки (поверхностная закалка, поверхностное пластическое деформирование и т. д.), поскольку в ее процессе **изменяются не только структура, но и химический состав поверхностного слоя изделия**. Модифицирование химического состава поверхностного слоя в большинстве способов химико-термической обработки происходит по **диффузионному механизму**. Главными факторами, определяющими конечный результат такой обработки, являются температура процесса, концентрация на поверхности изделия активного химического компонента и длительность его взаимодействия с обрабатываемым изделием. Наиболее распространенный метод химико-термической обработки стали – диффузионное **насыщение ее углеродом и азотом**. Кроме того, применяют насыщение поверхностного слоя стального изделия **кремнием, бором, а также хромом, алюминием**.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Стадии ХТО:

I стадия – адсорбция модифицирующих атомов на поверхности изделия. Эти атомы должны быть реакционноспособными, и поэтому требуется диссоциация молекул газовой или жидкой технологической среды, окружающей обрабатываемое изделие. В случае ионной имплантации (облучения поверхности потоком ионов) активные ионы модификатора внедряются на некоторую глубину в поверхностный слой изделия.

II стадия:

По мере накопления адсорбированных атомов на обрабатываемой поверхности создается градиент их концентрации, обуславливающий диффузию этих атомов в глубь материала. Кинетика их диффузии определяется тремя главными факторами – температурой, продолжительностью процесса и начальной концентрацией диффундирующих атомов в поверхностном слое изделия.

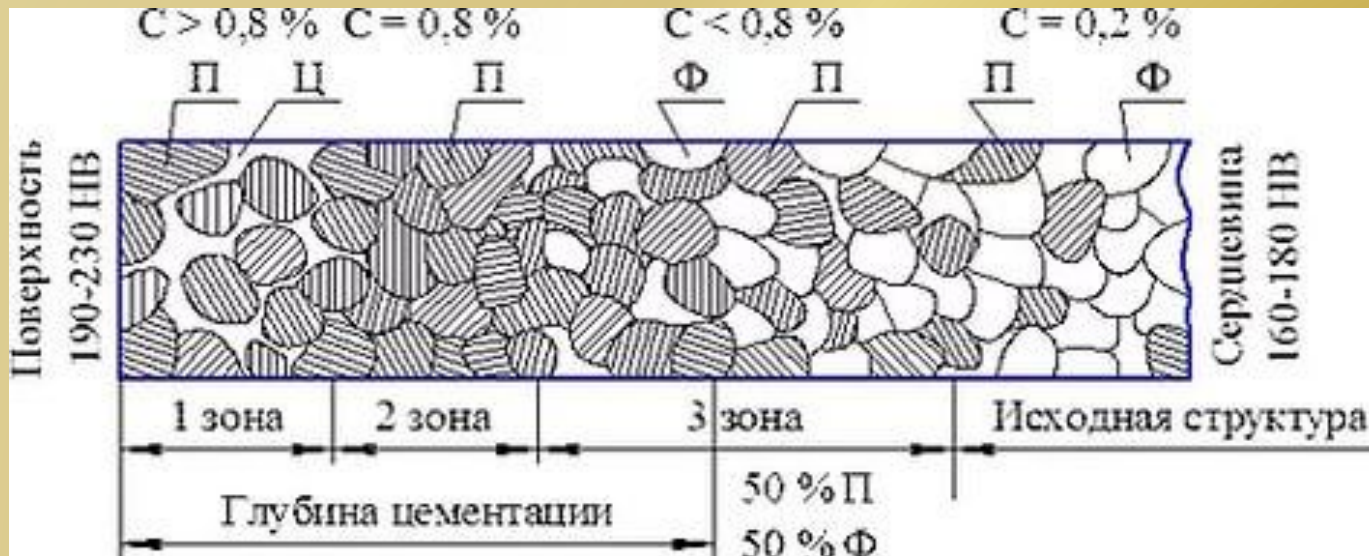


Рисунок 10 – Влияние ХТО на изменение состава структурных составляющих в поверхностном слое сталей



Ц е м е н т а ц и я — насыщение углеродом поверхностных слоев стальных изделий для повышения их закаливаемости, а следовательно – и **твердости, износостойкости и предела прочности**. После цементации изделие подвергают **закалке и низкому отпуску**, а затем обычно шлифуют для улучшения качества поверхности. Цементируют, как правило, стали с содержанием углерода **0,08...0,23%**, поэтому после закалки сердцевина стального изделия сохраняет вязкость, а поверхностный слой (с содержанием углерода **около 1%**) приобретает высокие **твердость и износостойкость**.

Иногда цементируется только часть поверхности изделия, а остальная поверхность защищается электролитическим медным покрытием или специальными защитными обмазками.

Наиболее часто цементации подвергают детали подвижных сопряжений, работающие в условиях трения и высоких контактных давлений (шестерни, валы, пальцы, кулачки и т. д.).

Диффузионное насыщение поверхностного слоя стали углеродом при цементации происходит из среды, называемой **карбюризатором**. Температура, при которой проводится цементация, превышает температуру A_3 , т. е. углерод поглощается аустенитом. Предельное содержание углерода в аустените (2,14%) не достигается даже в непосредственной близости от поверхности контактирования с карбюризатором (оно составляет обычно до 1,1%) и быстро убывает по толщине поверхностного слоя (рисунок 10). У поверхности детали располагается заэвтектоидная зона, состоящая из перлита и цементита, затем эвтектоидная (перлит) и доэвтектоидная (перлит и феррит).



Рисунок 11- Схема структуры цементированного слоя в стальном изделии



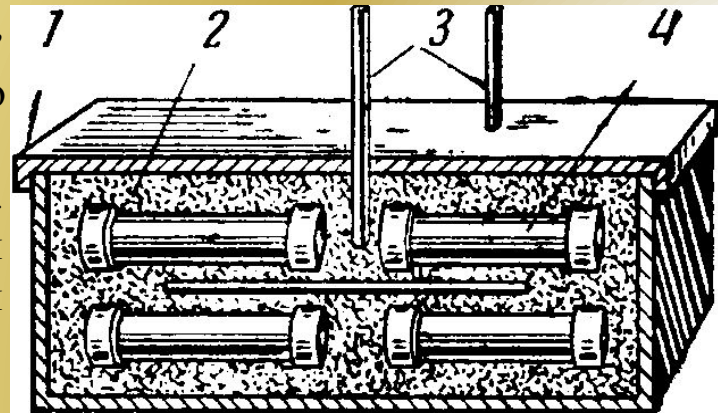
Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Структура поверхностного слоя сразу после цементации обычно получается **крупнозернистой**, что связано с выдержкой стали при высокой температуре. Термическая обработка изделий после цементации служит для исправления структуры, измельчения зерна и повышения комплекса механических свойств поверхностного слоя. С этой целью применяют закалку от температуры выше A_1 стали, находящейся в сердцевине изделия. При этом измельчается зерно как поверхностного слоя, так и сердцевины. Если изделия изготовлены из наследственно мелкозернистых сталей, закалку часто проводят, используя нагрев для цементации с последующим подстуживанием до температуры 840...860°C .

Особо ответственные изделия подвергают двойной закалке. Первую проводят от 880...900°C для исправления структуры сердцевины и устранения цементитной сетки, вторую – от 760... 780°C для повышения твердости цементированного слоя и измельчения его зерна.

После закалки в структуре цементированного слоя присутствуют мелкоиглочатый мартенсит, остаточный аустенит (до 20%), а иногда и включения избыточных карбидов. Низкий отпуск при 160...180°C назначают как после одинарной, так и после двойной закалки. При этом мартенсит закалки переходит в отпущенный мартенсит и снижаются напряжения в детали. Твердость поверхностного слоя достигает 58...62 HRC, повышается предел выносливости стали и снижается ее чувствительность к концентраторам напряжений.

Цементацию в твердом карбюризаторе проводят в специальных ящиках, засыпанных смесью древесного угля (или полукокса и торфяного кокса) с углекислыми барием, кальцием или натрием. Изделия в ящике перекладывают слоями карбюризатора так, чтобы общий объем изделий составлял 10...15% от объема карбюризатора.



Минимальный размер ящика, мм	Общая продолжительность процесса (ч), обеспечивающая глубину цементации, мм			
	0,5...0,7	0,7...0,9	0,9...1,2	1,2...1,5
100	4...5	5...6	6...7,5	7,5...9
150	4,5...6,5	5,5...6,5	6,5...8,5	свыше 9 до 10
200	5,5...6,5	6,5...7,5	7,5...9,5	10...12
250	6,5...7,5	7,5...8,5	8,5...10,5	11...14

При цементации в твердом карбюризаторе протекают следующие процессы. В результате взаимодействия карбюризатора с кислородом воздуха углерод окисляется до оксида углерода, который диссоциирует в присутствии железа с выделением активного атомарного углерода: $2CO \rightarrow CO_2 + C$. **Атомарный углерод диффундирует в сталь.** Находящиеся в карбюризаторе углекислые соли взаимодействуют с углеродом карбюризатора и обогащают среду оксидом углерода ($BaCO_3 + C \rightarrow BaO + 2CO$), ускоряя цементацию.

Газовая цементация обычно применяется в серийном производстве. Для ее осуществления используют разбавленный **природный газ**, среды контролируемого состава, получаемые в специальных генераторах, а также пары жидких углеводородов. Основной реакцией, обеспечивающей выделение свободного углерода, является диссоциация **метана** и **оксида углерода**: $CH_4 \rightarrow 2H_2 + C$ или $2CO \rightarrow CO_2 + C$. Газовая смесь, находящаяся в печи, в зависимости от состава может иметь разную науглероживающую способность, которую оценивают по содержанию углерода в поверхностном слое изделия. **Достоинством газовой цементации** является возможность широкого регулирования этого параметра.

Скорость газовой цементации стальных изделий при температуре **930...950°C** составляет 0,12...0,15 мм/ч (при толщине цементированного слоя до 1,7 мм).



А з о т и р о в а н и е – диффузионное насыщение азотом поверхностных слоев металлических изделий в целях повышения их **износостойкости, предела выносливости и коррозионной стойкости**. Преимуществом азотирования перед цементацией является более высокая твёрдость обработанного поверхностного слоя, которая сохраняется до более высоких температур (600°C), чем в случае цементации (230°C).

Азотированию подвергают детали из среднеуглеродистых легированных сталей. Перед этим для них назначают улучшение и чистовую обработку, а после азотирования изделия шлифуют или полируют. Можно азотировать только часть изделия, изолировав остальную его поверхность защитным покрытием (**обычно из олова**).

Средой, из которой диффундирует азот в сталь, является, как правило, **аммиак**, который диссоциирует по схеме: $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$. Азотирование осуществляют при температуре **$500\text{...}600^{\circ}\text{C}$** в зависимости от вида изделий и необходимой толщины азотированного слоя. Формирование структуры азотированного слоя протекает вследствие диффузии атомарного азота в сталь и образования фаз системы Fe – N.

Существует ряд методов одновременного насыщения поверхностных слоев стальных изделий азотом и углеродом из сред, в которых происходит аморфное образование этих элементов. К таким методам относят **нитроцементацию, карбонитрацию и цианирование**.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Н и т р о ц е м е н т а ц и я — процесс диффузионного насыщения стали углеродом и азотом из газовой фазы (обычно газовой среды, применяемой при цементации, с незначительным добавлением аммиака).

Температура нитроцементации примерно на 100°C ниже, чем температура обычной цементации ($840\text{...}860^{\circ}\text{C}$), продолжительность процесса значительно меньше (4..10 ч), так как диффузия углерода существенно ускоряется в присутствии азота. Толщина нитроцементированного слоя составляет, как правило, 0,2...0,8 мм. После нитроцементации осуществляют закалку изделий (после подстуживания до $800\text{...}825^{\circ}\text{C}$) и низкий отпуск ($160\text{...}180^{\circ}\text{C}$). Конечная структура нитроцементированного слоя состоит из мелкокристаллического мартенсита, остаточного аустенита и небольшого количества дисперсных включений карбонитридов. Твердость слоя достигает 58...64 HRC ($570\text{...}690\text{HV}$) при содержании азота до 0,4% и углерода до 1,65%.

Ц и а н и р о в а н и е заключается в диффузионном насыщении стали азотом и углеродом из расплавов солей, содержащих цианаты. После такого модифицирования диффузионный слой характеризуется износостойкостью, высокими пределом выносливости и коррозионной стойкостью. Производительность технологии цианирования и качество обрабатываемых поверхностей выше, чем при цементации.

Низкотемпературное цианирование, проводимое при 570°C , часто выделяют в особый вид химико – термической обработки, называемый **карбонитрацией**. При карбонитрации (тенифер – процесс) происходит диффузионное насыщение стали азотом и углеродом из расплавов карбонатов и цианатов (например, смеси KCNO , NaCN и Na_2CO_3 или NH_2CO и Na_2CO_3). При продувке расплавов этих солей потоком воздуха над поверхностью изделия образуется среда, содержащая свободные азот и углерод, которые диффундируют в сталь, формируя износостойкий карбонитридный слой $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{N})$ толщиной 7...15 мкм. Твердость углеродистых сталей, подвергнутых карбонитрации, достигает 400 HV, легированных – 1100 HV.

Длительность процесса составляет, как правило, 0.5...3 ч. Карбонитрацию используют для обработки изделий из конструкционных (коленчатые валы, шестерни и др.) и 25 инструментальных сталей (режущий инструмент, штампы, пресс-формы).



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Среднетемпературное цианирование проводят при температуре **820...860°C**, приводя изделия в контакт с расплавом, содержащим соли NaCN , NaCl и Na_2CO_3 , в течение 0,5...1,5 ч. Толщина диффузионного слоя достигает **0,15...0,35 мм**, содержание в нем азота и углерода составляет соответственно до **1,2% и 0,8%**. Реакции, которые протекают при среднетемпературном цианировании в расплаве с участием кислорода воздуха, сопровождаются выделением свободных углерода и азота.

Высокотемпературное цианирование выполняют для получения диффузионных слоев толщиной до 2 мм. Повышенная температура процесса (**930...950°C**), способствует ускорению диффузии азота и углерода в сталь. Изделия погружают в расплав на основе смеси солей NaCN , BaCl_2 и NaCl , а продолжительность выдержки в нем составляет **1,5...6 ч**. Поверхностный слой изделий после высокотемпературного цианирования (в отличие от низкотемпературного) насыщается углеродом в большей мере (до 1,2 %), чем азотом (до 0,3 %), а его структура близка к структуре цементированного слоя.

Методом комплексного модифицирования является **сульфоцианирование** – одновременное насыщение поверхностного слоя стальных деталей серой, углеродом и азотом. Этот процесс применяют главным образом для упрочнения деталей трения. Последние часто изготавливают из закаленной стали и чугуна. Срок службы таких деталей невелик из-за схватывания и задиров поверхностей трения. Для борьбы с этими явлениями применяют сульфоцианирование – нагрев деталей при **580...590°C** в течение 3 ч в жидких ваннах, содержащих расплавленные карбиды, поташ, желтую кровяную соль и гипосульфит натрия. Структура обеспечивает стабильный и высокий коэффициент трения и износостойкость обработанных деталей.



Лекция 12 Технологии термической и химико-термической обработки сталей

Комплекс ценных эксплуатационных свойств изделий можно обеспечить при диффузионном насыщении их поверхностных слоев такими элементами, как бор, кремний и некоторые металлы (Al, Ti, Cr, Zr и др.)

Б о р и р о в а н и е применяют для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, теплостойкости и окалиностойкости стальных изделий. Обработке борированием подвергают детали из углеродистых и легированных сталей (штампы, пресс-формы, детали высоконагруженных узлов трения), работающие в условиях абразивного изнашивания и высоких температур. Насыщающей средой, из которой бор диффундирует в сталь, служат расплавы буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) и хлористых солей (NaCl , BaCl_2), газы (B_2H_6 , BCl_3), а также специальные порошки и обмазочные пасты из борсодержащих соединений. Борированный слой достигает толщины 0,4 мм и состоит из боридов FeB и Fe_2B . **Его твердость – 2000 HV.**

С и л и ц и р о в а н и е (диффузионное насыщение поверхностного слоя стальных изделий кремнием) обеспечивает наряду с повышенной износостойкостью высокую коррозионную стойкость изделий в кислотах и морской воде.

Модифицирующие металлы и неметаллы вводят в поверхностный слой стальных изделий комплексно. К таким методам их диффузионного насыщения относят *хромотитанирование* (применяется для упрочнения твердосплавного инструмента), *хромосилицирование* (для деталей подвижных сопряжений машин), *хромоалитирование* (для пресс-форм), *борохромирование* и *боросульфидирование* (для штампов), *карбованадийтитанирование* (для упрочнения инструмента на глубину до 3 мм), *цирконотитанирование* и *цирконосилицирование* (для инструмента и деталей химического оборудования). Указанные методы обработки позволяют достигать более эффективного повышения свойств поверхностного слоя деталей в сравнении с насыщением только одним элементом. Однако комплексное диффузионное насыщение применяется в машиностроении ограниченно вследствие сложности технологического процесса.



Лекция 12 Технологии термической и химико- термической обработки сталей

Алитирование (диффузионное насыщение алюминием) применяют для повышения жаростойкости и коррозионной стойкости деталей топливно-энергетического оборудования из углеродистых сталей. Процесс осуществляют в основном в порошковых смесях (порошки металлического алюминия, его оксида и хлористого аммония), в расплаве алюминия или при отжиге стального изделия, снабженного алюминиевым покрытием. Температура процесса – **от 720 °С (в расплаве) до 1050°С (в порошковой смеси)**, длительность – **от 15 мин до 12 ч** в зависимости от требуемой толщины алитированного слоя. Структура слоя – твердый раствор алюминия в α -железе.



1. Лейкин А.Е., Родин Б.И. Материаловедение. Учебник для машиностроительных специальностей ВУЗов. М.: “Высшая школа”, 1971. – 416 с.
2. Конструкционные материалы. Справочник /Под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение. – 6-е изд. – М: Metallurgy, 1986. –544 с.
4. Композиционные материалы. Справочник /Под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Навукова думка, 1985. – 592 с.
5. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. - 6-е изд. – М.: Metallurgy, 1993. – 447 с .
6. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. – М.: Metallurgy, 1975. – 448 с.
7. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С. Машиностроительная керамика. – Спб: Изд СПб ГТУ, 1997. – 726 с.
8. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
9. Основы материаловедения /Под ред. И.И. Сидорина. – М.: Машиностроение, 1976. – 436с.
10. Пинчук Л.С., Струк В.А., Мышкин Н.К., Свириденко А.И. Материаловедение и конструкционные материалы /Под ред. В.А.Белого. – Мн: Вышэйшая школа, 1989. – 461 с.
11. Травин О.В., Травина Н.Т. Материаловедение. – М.: Metallurgy, 1989. – 384с.
12. Материаловедение и конструкционные материалы: курс лекций: в 3 ч./ С.В. Авдейчик [и др.]; под общ.ред. проф. В.А. Струка.- Гродно: ГрГУ, 2007.

