

ЛЕКЦИЯ 4: Термическая обработка стали. Виды термической обработки. Химико-термическая обработка стали. Поверхностная пластическая деформация.

Термическая и химико-термическая обработка стали

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры. Различают следующие виды термической обработки: отжиг, закалка и отпуск.

Отжигом стали называется вид термической обработки, заключающийся в ее нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении.

Цели отжига — снижение твердости и улучшение обрабатываемости стали, изменение формы и величины зерна, выравнивание химического состава, снятие внутренних напряжений. Существуют различные виды отжига: полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный, низкий, отжиг на зернистый перлит, нормализация. Температуры нагрева стали для ряда видов отжига связаны с положением линий диаграммы Fe-Fe₃C. Низкая скорость охлаждения обычно достигается при остывании стали вместе с печью.

Полный отжиг применяется для доэвтектоидных сталей. Нагрев стали для полного отжига осуществляется на 30-50° выше линии GS диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 1). При этом происходит полная перекристаллизация стали и уменьшение величины зерна. Исходная структура из крупных зерен феррита и перлита при нагреве превращается в аустенитную, а затем при медленном охлаждении в структуру из мелких зерен феррита и перлита. Повышение температуры нагрева привело бы к росту зерна. При полном отжиге снижается твердость и прочность стали, а пластичность повышается.

При **неполном отжиге** нагрев производится на 30-50°С выше линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 1). Он производится, если исходная структура

не очень крупнозерниста или не надо изменить расположение ферритной (в доэвтектоидных сталях) или цементитной (в заэвтектоидных сталях) составляющей. При этом происходит лишь частичная перекристаллизация — только перлитной составляющей стали.

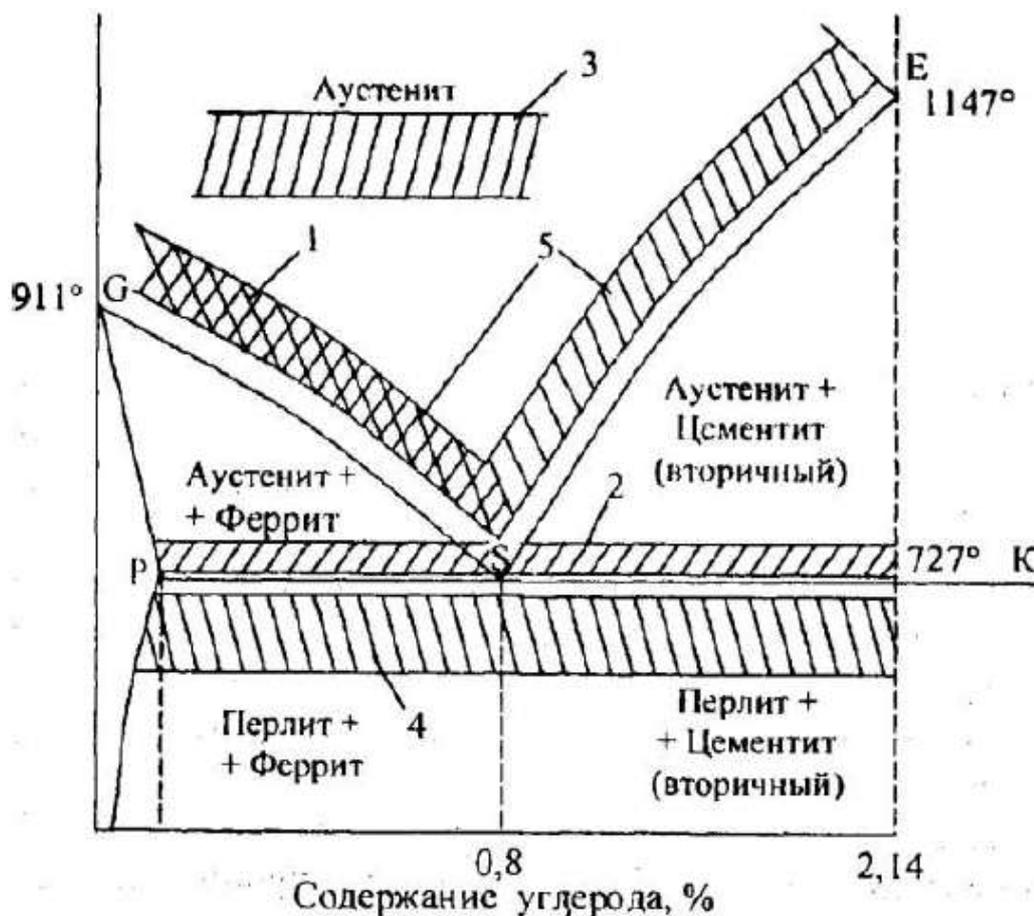


Рисунок 1. Области температур нагрева для различных видов отжига: 1 - полный отжиг; 2 - неполный отжиг; 3 - диффузионный отжиг; 4 - рекристаллизационный отжиг; 5 - нормализация

Диффузионный отжиг (гомогенизация) заключается в нагреве стали до 1000-1100°C, длительной выдержке (10-15 часов) при этой температуре и последующем медленном охлаждении. В результате диффузионного отжига происходит выравнивание неоднородности стали по химическому составу. Благодаря высокой температуре нагрева и продолжительной выдержке получается крупнозернистая структура, которая может быть устранена последующим полным отжигом.

Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклепа и внутренних напряжений после холодной деформации и подготовки структуры к дальнейшему деформированию. Нагрев необходимо осуществлять выше температуры рекристаллизации, которая для железа составляет 450°C . Обычно для повышения скорости рекристаллизационных процессов применяют значительно более высокие температуры, которые, однако, должны быть ниже линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C. Поэтому температура нагрева для рекристаллизационного отжига составляет $650-700^{\circ}\text{C}$.

В результате рекристаллизационного отжига образуется однородная мелкозернистая структура с небольшой твердостью и значительной вязкостью.

Низкий отжиг применяется в тех случаях, когда структура стали удовлетворительна и необходимо только снять внутренние напряжения, возникающие при кристаллизации или после механической обработки. В этом случае сталь нагревают значительно ниже линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C ($200-600^{\circ}\text{C}$).

Отжиг на зернистый перлит (сфероидизацию) применяют для сталей близких к эвтектоидному составу или для заэвтектоидных. Такой отжиг осуществляют маятниковым способом (температуру несколько раз изменяют вблизи линии PSK, то перегревая выше нее на $30-50^{\circ}\text{C}$, то охлаждая ниже на $30-50^{\circ}\text{C}$) или путем длительной выдержки (5-6 часов) при температуре несколько выше линии PSK и последующего медленного охлаждения. После такого отжига цементит, обычно присутствующий в структуре в виде пластин, приобретает зернистую форму. Сталь со структурой зернистого перлита обладает большей пластичностью, меньшей твердостью и прочностью по сравнению с пластинчатым перлитом. Отжиг на зернистый перлит применяется для подготовки сталей к закалке или для улучшения их обрабатываемости резанием.

Нормализация состоит из нагрева стали на 30-50°C выше линии GSE диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 1), выдержки при этой температуре и последующего охлаждения на воздухе. Более быстрое охлаждение по сравнению с обычным отжигом приводит к более мелкозернистой структуре. Нормализация — более дешевая термическая операция, чем отжиг, так как печи используют только для нагрева и выдержки. Для низкоуглеродистых сталей (до 0,3% C) разница в свойствах между нормализованным и отожженным состоянием практически отсутствует и эти стали лучше подвергать нормализации. При большем содержании углерода нормализованная сталь обладает большей твердостью и меньшей вязкостью, чем отожженная. Иногда нормализацию считают самостоятельной разновидностью термической обработки, а не видом отжига.

Закалка и отпуск стали

При медленном охлаждении стали образуются структуры, соответствующие диаграмме Fe-Fe₃C. Вначале происходит выделение феррита (в доэвтектоидных сталях) или вторичного цементита (в заэвтектоидных сталях), а затем происходит превращение аустенита в перлит. Это превращение заключается в распаде аустенита на феррит, почти не содержащий углерода и цементит, содержащий 6,67% C. Поэтому превращение сопровождается диффузией, перераспределением углерода. Диффузионные процессы происходят в течение некоторого времени, причем скорость диффузии резко падает с понижением температуры.

Обычно изучают изотермическое превращение аустенита (происходящее при выдержке при постоянной температуре) для эвтектоидной стали. Влияние температуры на скорость и характер превращения представляют в виде диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 2).



Рисунок 2. Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектной стали

Диаграмма строится в координатах температура — логарифм времени. Выше температуры 727°C на диаграмме находится область устойчивого аустенита. Ниже этой температуры аустенит является неустойчивым и превращается в другие структуры. Первая С-образная кривая на диаграмме соответствует началу превращения аустенита, а вторая — её завершению. При небольшом переохлаждении — приблизительно до 550°C происходит упомянутое выше диффузионное перлитное превращение. В зависимости от степени переохлаждения образуются структуры, называемые перлит, сорбит и тростит. Это структуры одного типа — механические смеси феррита и цементита, имеющие пластинчатое строение. Отличаются они лишь степенью дисперсности, т.е. толщиной пластинок феррита и цементита. Наиболее крупнодисперсная структура — перлит, наиболее мелкодисперсная — тростит. При переохлаждении аустенита приблизительно ниже 240°C скорость диффузии падает почти до нуля и происходит бездиффузионное мартенситное превращение. Образуется **мартенсит** — пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. Мартенсит имеет ту же концентрацию углерода, что и исходный аустенит. Из-за высокой пересыщенности

углеродом решетка мартенсита сильно искажается, благодаря чему мартенсит имеет высокую твердость (до HRC 65). Горизонтальная линия M_k диаграммы соответствует началу превращения аустенита в мартенсит, а линия M_k — завершению этого процесса.

В диапазоне температур от мартенситного до перлитного превращения происходит промежуточное превращение и образуется структура, называемая **бейнит**.

Закалка — это вид термической обработки, состоящий в нагреве стали до определенной температуры, выдержке и последующем быстром охлаждении. В результате закалки повышается твердость и прочность, но снижается вязкость и пластичность. Нагрев стали производится на 30-50°C выше линии GSK диаграммы Fe-Fe₃C. В доэвтектоидных сталях нагрев выше линии GS необходим для того, чтобы после закалки в структуре не было мягких ферритных включений. Для заэвтектоидных сталей применяется нагрев выше линии SK , так как присутствие цементита не снижает твердость стали.

Обычно в результате закалки образуется мартенситная структура. Поэтому охлаждать сталь следует с такой скоростью, чтобы кривая охлаждения не пересекала С-образные кривые диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 2). Для достижения высокой скорости охлаждения закаливаемые детали погружают в воду (для углеродистых сталей) или минеральные масла (для легированных сталей).

Способность стали закаливаться на мартенсит называется **закаливаемостью**. Она характеризуется значением твердости, приобретаемой сталью после закалки и зависит от содержания углерода. Стали с низким содержанием углерода (до 0,3%) практически не закаливаются и закалка для них не применяется.

Прокаливаемостью называется глубина проникновения закаленной зоны. Отсутствие сквозной прокаливаемости объясняется тем, что при охлаждении сердцевина остывает медленнее, чем поверхность.

Прокаливаемость характеризует критический диаметр D , т. е. максимальный диаметр детали цилиндрического сечения, которая прокаливается насквозь в данном охладителе.

Отпуск стали — это вид термической обработки, следующий за закалкой и заключающийся в нагреве стали до определенной температуры (ниже линии PSK), выдержке и охлаждении. **Цель отпуска** — получение более равновесной по сравнению с мартенситом структуры, снятие внутренних напряжений, повышение вязкости и пластичности. Различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск проводится при температуре 150-200°C. В результате снимаются внутренние напряжения, происходит некоторое увеличение пластичности и вязкости без заметного снижения твердости. Образуется структура **мартенсит отпуска**. Низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент, а также детали, которые должны обладать высокой твердостью и износостойкостью.



Рисунок 3. Мартенсит

При **среднем отпуске** производится нагрев до 350-450°C. При этом происходит некоторое снижение твердости при значительном увеличении предела упругости и улучшении сопротивляемости действию ударных нагрузок. Структура стали представляет собой **троостит отпуска**, который имеет зернистое, а не пластинчатое строение. Применяется для пружин, рессор, ударного инструмента.

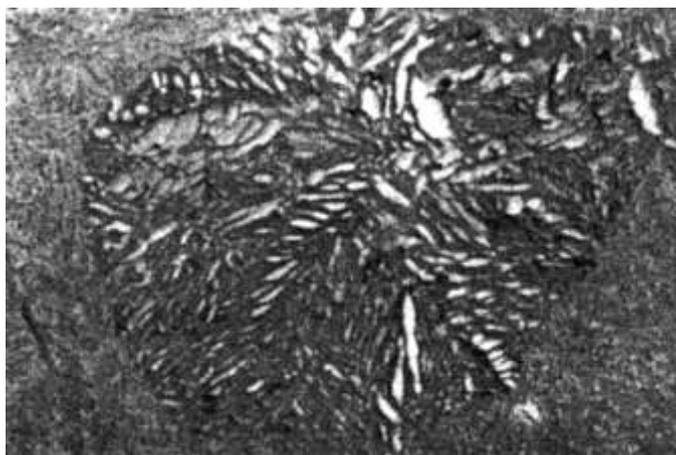


Рисунок 4. Троостит

Высокий отпуск проводится при 550-650°C. В результате твердость и прочность снижаются значительно, но сильно возрастают вязкость и пластичность и получается оптимальное для конструкционных сталей сочетание механических свойств. Структура стали — **сорбит отпуска** с зернистым строением цементита. Применяется для деталей, подвергающихся действию высоких нагрузок. Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется улучшением. Она является основным видом обработки конструкционных сталей

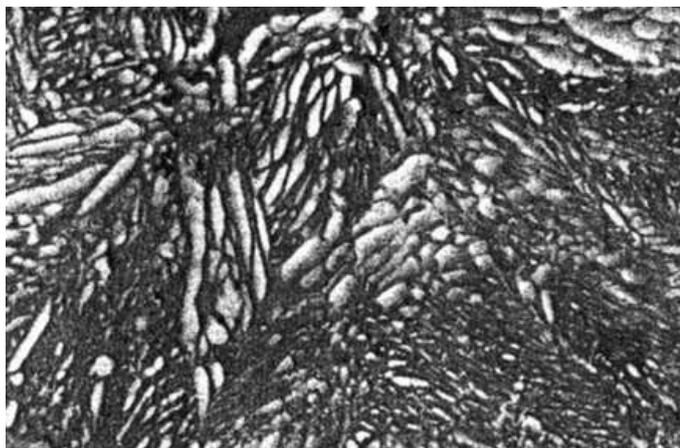


Рисунок 5. Сорбит

Поверхностная закалка состоит в нагреве поверхностного слоя стальных деталей до аустенитного состояния и быстрого охлаждения с целью получения высокой твердости и прочности в поверхностном слое в сочетании с вязкой сердцевиной. Существуют различные способы нагрева

поверхности под закалку — в расплавленных металлах или солях, пламенем газовой горелки, лазерным излучением, током высокой частоты. Последний способ получил наибольшее распространение в промышленности.

При нагреве **токами высокой частоты** закаливаемую деталь помещают внутри индуктора, представляющего собой медные трубки с циркулирующей внутри для охлаждения водой. Форма индуктора соответствует внешней форме детали. Через индуктор пропускают электрический ток (частотой 500 Гц – 10 МГц). При этом возникает электромагнитное поле, которое индуцирует вихревые токи, нагревающие поверхность детали. Глубина нагретого слоя уменьшается с увеличением частоты тока и увеличивается с возрастанием продолжительности нагрева. Регулируя частоту и продолжительность, можно получить необходимую глубину закаленного слоя, находящуюся в пределах 1 -10 мм.

Преимуществами закалки токами высокой частоты являются регулируемая глубина закаленного слоя, высокая производительность (нагрев одной детали длится 10 с), возможность автоматизации, отсутствие окалинообразования.

Недостаток — высокая стоимость индуктора, который является индивидуальным для каждой детали. Поэтому этот вид закалки применим, в основном, к крупносерийному и массовому производству.

Перспективный метод поверхностной закалки стальных деталей сложной формы — **лазерная обработка**. Благодаря высокой плотности энергии в луче лазера возможен быстрый нагрев очень тонкого слоя металла. Последующий быстрый отвод тепла в объем металла приводит к закалке поверхностного слоя с приданием ему высокой твердости и износостойкости.

Химико-термическая обработка — это процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхности стальных деталей за счет насыщения ее различными химическими элементами. При этом достигается значительное повышение твердости и износостойкости поверхности деталей при сохранении вязкой сердцевины. К видам химико-

термической обработки относятся цементация, азотирование, цианирование и др.

Цементация — это процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом. Цементация производится путем нагрева стальных деталей при 880-950°C в углеродосодержащей среде, называемой карбюризатором. Различают два **основных вида цементации** — газовую и твердую. **Газовая цементация** проводится в газе, содержащем метан CH_4 и оксид углерода CO . **Твердая цементация** проводится в стальных ящиках, куда укладываются детали попеременно с карбюризатором. Карбюризатором служит порошок древесного угля с добавкой солей Na_2CO_3 или BaCO_3 .

Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (0,1 - 0,3%). В результате на поверхности концентрация углерода возрастает до 1,0-1,2%. Толщина цементованного слоя составляет 1 - 2,5 мм.

Цементацией достигается только выгодное распределение углерода по сечению детали. Высокая твердость и износостойкость поверхности получается после закалки, которая обязательно проводится после цементации. Затем следует низкий отпуск. После этого твердость поверхности составляет HRC 60.

Азотированием называется процесс насыщения поверхности стали азотом. При этом повышаются не только твердость и износостойкость, но и коррозионная стойкость. Проводится азотирование при температуре 500-600°C в среде аммиака NH_3 , в течение длительного времени (до 60 ч.) Аммиак при высокой температуре разлагается с образованием активного атомарного азота, который и взаимодействует с металлом. Твердость стали повышается за счет образования нитридов легирующих элементов. Поэтому азотированию подвергают только легированные стали. Наиболее сильно повышают твердость такие легирующие элементы, как хром, молибден, алюминий, ванадий. Глубина азотированного слоя составляет 0,3 — 0,6 мм, твердость поверхностного слоя по Виккерсу доходит до HV 1200 (при цементации HV 900).

К **преимуществам** азотирования перед цементацией следует отнести отсутствие необходимости в дополнительной термообработке, более высокую твердость и износостойкость, высокую коррозионную стойкость поверхности.

Недостатками являются низкая скорость процесса и необходимость применения дорогих легированных сталей.

Цианирование (нитроцементация) — это процесс одновременного насыщения поверхности стали углеродом и азотом. Проводится цианирование в расплавах цианистых солей NaCN или KCN или в газовой среде, содержащей смесь метана CH₄ и аммиака NH₃. Различают низкотемпературное и высокотемпературное цианирование.

Низкотемпературное цианирование проводится при температуре 500-600°C. При этом преобладает насыщение азотом. Глубина цианированного слоя составляет 0,2-0,5 мм, твердость поверхности — HV 1000.

При высокотемпературном цианировании температура составляет 800-950°C. Преобладает насыщение углеродом. Глубина поверхностного слоя составляет 0,6 — 2,0 мм. После высокотемпературного цианирования следует закалка с низким отпуском. Твердость после термообработки составляет HRC 60.

Поверхностное упрочнение **пластическим деформированием** основано на способности стали к наклепу при пластической деформации. Наиболее распространенными способами такого упрочнения поверхности является дробеструйная обработка и обработка поверхности роликами или шариками.

При **дробеструйной обработке** на поверхность детали из специальных дробеметов направляется поток стальной или чугунной дроби малого диаметра (0,5-1,5 мм). Удары концентрируются на весьма малых поверхностях, поэтому возникают очень большие местные давления. В результате повышается твердость и износостойкость обработанной поверхности. Кроме того, сглаживаются мелкие поверхностные дефекты.

Глубина упрочненного слоя при дробеструйной обработке составляет около 0,7 мм.

Обкатка роликами производится с помощью специальных приспособлений на токарных станках. Помимо упрочнения, обкатка снижает шероховатость обрабатываемой поверхности. Глубина упрочненного слоя доходит до 15 мм.