

8 ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В зависимости от структурного состояния термическая обработка подразделяется на: отжиг, нормализацию, закалку и отпуск.

8.1 Отжиг и нормализация

После отливки, прокатки иковки стальные заготовки охлаждаются неравномерно, результатом чего является неоднородность структуры и свойств в различных местах заготовок, а также появление внутренних напряжений. Кроме того, при затвердевании отливки получаются неоднородными по составу вследствие ликвации.

Отжигом называют нагревание и медленное охлаждение стали. Различают отжиг первого и второго рода.

8.1.1 Отжиг первого рода

Отжиг первого рода проводится с целью получения структуры из неравновесного состояния в более равновесное. К этому виду отжига относятся:

- возврат, или отдых,
- рекристаллизационный отжиг,
- отжиг для снятия внутренних напряжений,
- диффузионный отжиг, или гомогенизация;

Рассмотрены перечисленные виды отжига применительно к стали.

Возврат (отдых) стали – нагрев до 200 – 400°, для уменьшения или снятия наклепа. При возврате наблюдается уменьшение искажений в кристаллических решетках у кристаллитов и частичное восстановление физико-химических свойств.

Рекристаллизационный отжиг (рекристаллизация) стали происходит при температурах 500 – 550°; отжиг для снятия внутренних напряжений – при температурах 600 – 700°. Эти виды отжига снимают внутренние напряжения в отливках от неравномерного охлаждения их частей, а также в заготовках, обработанных давлением (прокаткой, волочением, штамповкой) при температурах ниже критических. При рекристаллизационном отжиге из деформированных зерен вырастают новые кристаллы, ближе к равновесным, в результате твердость стали снижается, а пластичность и ударная вязкость увеличиваются.

Для полного *снятия внутренних напряжений* в стали нужна температура не менее 600°. Охлаждение после выдержки при заданной температуре должно быть достаточно медленным: при ускоренном охлаждении вновь возникают внутренние напряжения.

Диффузионный отжиг применяется в тех случаях, когда в стали наблюдается внутрикристаллическая ликвация. Выравнивание состава в

зерна аустенита достигается диффузией углерода и других примесей в твердом состоянии, наряду с самодиффузией железа. В результате сталь становится однородной по составу (гомогенной), поэтому диффузионный отжиг называют также *гомогенизацией*.

Температура гомогенизации должна быть достаточно высокой (1100 - 1200⁰С), однако нельзя допускать пережога и оплавления зерен. При пережоге кислород воздуха окисляет железо, проникая в толщу его, образуются кристаллиты, разобщенные окисными оболочками. Пережог в металле устранить нельзя, поэтому пережженные заготовки являются окончательным браком.

При диффузионном отжиге обычно зерна слишком укрупняются, что следует исправлять последующим полным отжигом (на мелкое зерно).

8.1.2 Отжиг второго рода

Отжиг второго рода проводится с целью изменения структуры сплава посредством перекристаллизации около критических точек с целью получения равновесных структур; к отжигу второго рода относятся:

- полный,
- неполный и
- изотермический отжиг.

Полный отжиг связан с фазовой перекристаллизацией и измельчением зерна при температурах точек A_{C1} и A_{C2} . Назначение его – улучшение структуры стали для облегчения последующей обработки резанием, штамповкой или закалкой, а также получение мелкозернистой равновесной перлитной структуры в готовой детали. Для полного отжига сталь нагревают на 30-50° выше температуры линии GSK ($GSK+(30...50)^0C$) и медленно охлаждают.

После отжига избыточный цементит (в заэвтектоидных сталях) и эвтектоидный цементит имеют форму пластинок, поэтому и перлит называют *пластинчатым*.

Отжигом также достигается измельчение зерна. Размельчение зерна связано с перекристаллизацией α -железа в γ -железо; при охлаждении и обратном переходе γ -железа в α -железо мелкозернистая структура сохраняется.

Таким образом, при отжиге на пластинчатый перлит одновременно обеспечивается мелкозернистая структура.

Неполный отжиг связан с фазовой перекристаллизацией лишь при температуре точки A_{C1} ; он применяется после горячей обработки давлением, когда у заготовки мелкозернистая структура.

Отжиг на зернистый перлит применяют обычно для эвтектоидных и заэвтектоидных сталей, с целью повышения пластичности и вязкости стали и уменьшения ее твердости. Для получения зернистого перлита сталь нагревают выше точки A_{C1} и выдерживают недолго, чтобы цементит растворился в аустените не полностью. Затем сталь охлаждают до температуры несколько ниже A_{r1} и выдерживают при такой температуре

несколько часов. При этом частицы оставшегося цементита служат зародышами кристаллизации для всего выделяющегося цементита, который нарастает округлыми (глобулярными) кристаллитами, рассеянными в феррите.

Свойство зернистого перлита существенно отличаются от свойства пластинчатого в сторону меньшей твердости, но большей пластичности и вязкости. Особенно это относится к эвтектоидной стали. В которой весь цементит (как эвтектоидный, так и избыточный) получается в виде глобулей.

При *изотермическом отжиге* после нагрева и выдержки сталь быстро охлаждают до температуры несколько ниже точки A_1 и выдерживают при этой температуре до полного распада аустенита на перлит, после чего охлаждают на воздухе. Применение изотермического отжига значительно сокращает время и повышает производительность. Например, обыкновенный отжиг легированной стали длится 13-15 ч, а изотермический – всего 4-7 ч.

8.1.3 Нормализация

При нормализации сталь охлаждается не в печи, как при отжиге, а на воздухе в цехе. Нагревание ведется до полной перекристаллизации (на $30-50^\circ$ выше точек A_{c3} и A_{cm}), в результате сталь приобретает мелкозернистую и однородную структуру. Твердость и прочность стали после нормализации выше, чем после отжига.

Структура низкоуглеродистой стали после нормализации феррито-перлитная, такая же, как и после отжига, а у средне- и высокоуглеродистой стали – сорбитная; нормализация может заменить для первой – отжиг, а для второй – закалку с высоким отпуском. Часто нормализацией подготавливают сталь для закалки. Термическую обработку некоторых марок углеродистой и легированных сталей заканчивают нормализацией.

8.2 Закалка и отпуск

Цель закалки и отпуска стали – улучшение ее свойств. Закалка с отпуском нужна для очень многих деталей и изделий. Она основана на перекристаллизации стали при нагреве до температуры выше критической; после достаточной выдержки при этой температуре для завершения закалки следует быстрое охлаждение. Таким путем предотвращают превращение аустенита в перлит.

Закаленная сталь имеет неравновесную структуру мартенсита, троостита или сорбита.

Чаще всего при закалке сталь резко охлаждают на мартенсит. Для смягчения действия закалки сталь отпускают, нагревая до температуры ниже точки A_1 . При отпуске структура стали из мартенсита закалки переходит в мартенсит отпуска, троостит отпуска или сорбит отпуска.

Температурные условия закалки. Температура нагрева стали при закалке та же, что и при полном отжиге: для доэвтектоидной стали на $30-50^\circ$

выше точки A_{c3} ($GS + (30...50)^{\circ}C$) для заэвтектоидной – на $30-50^{\circ}$ выше точки A_{c1} ($SK + (30...50)^{\circ}C$)

При нагреве доэвтектоидной стали до температуры между точками A_{c1} и A_{c3} (неполная закалка) в структуре быстро охлажденной стали, наряду с закаленными участками, будет присутствовать нерастворенный феррит, резко снижающий твердость и прочность. Поэтому для доэвтектоидной стали обязательна полная закалка (нагрев выше точки A_{c3}).

В заэвтектоидной стали избыточной фазой является цементит, который по твердости не уступает мертенситу и даже превосходит его; поэтому сталь достаточно нагреть на $30-50^{\circ}$ выше точки A_{c1} .

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. Продолжительность выдержки обычно равна четверти общей продолжительности нагревания. Практически время нагрева принято 1,5-2 минуты на 1мм сечения.

Охлаждение деталей при закалке. Скорость охлаждения деталей при закалке должна быть такой, чтобы деталь получилась заданной структуры. Скорост), обеспечивающая мартенситную структуру (с остаточным аустенитом, не без троостита), называется *критической скоростью закалки*.

Так как С-образные кривые доэвтектоидной и заэвтектоидной сталей смещены влево по сравнению с кривыми эвтектоидной стали, критическая скорость закалки их выше, и получение структуры мартенсита достигается труднее, а для некоторых марок она даже недостижима.

Легирующие компоненты в стали облегчают закалку, так как при этом С-образные кривые смещаются вправо, и критическая скорость понижается.

При скорости охлаждения меньше критической в структуре закаленной стали, наряду с мартенситом, будет троостит, а при дальнейшем уменьшении скорости получают структуры троостита или сорбита без мартенсита.

Резкость закалки (получение мартенсита без троостита) зависит от природы температуры охлаждающей среды. Охлаждение струей воздуха или холодными металлическими плитами дает следующую закалку на сорбит. Наиболее распространено охлаждение деталей погружением их в воду, щелочные или кислые растворы, масло, расплавленный свинец и др. При этом получается резкая или умеренная закалка (на мартенсит или троостит).

К наиболее резким охладителям относится 10%-ный раствор NaOH в воде, при 18° его коэффициент $-2,0$; к умеренным – минеральные масла с коэффициентом $0,2-0,25$.

При закалке применяют различные приемы охлаждения в зависимости от марки стали, формы и размеров детали и технических требований к ним.

8.2.1 Закаливаемость и прокаливаемость стали

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. При сквозной прокаливаемости все сечение закаливаемой детали приобретает мартенситную структуру. В зависимости от сечения деталей и критической скорости охлаждения закалки от края к сердцевине получается структура мартенсит → троостит → сорбит → перлит. Глубина прокаливаемости – расстояние от поверхности до слоя полумартенситной структуры (50%мартенсит + 50%троостит).

Простая закалка в одном охладителе (чаще всего в воде или в водных растворах) выполняется путем погружения в него детали до полного охлаждения. При охлаждении необходимо освободить деталь от слоя пара хороший теплоизолятор. Такой способ закалки самый распространенный.

Существуют другие виды закалки: прерывистая, ступенчатая, изотермическая, поверхностная, токами высокой частоты.

8.2.2 Дефекты закалки

К этим дефектам относятся: трещины, поводки, или коробление и обезуглероживание. Главная причина трещин и поводки – неравномерное изменение объема детали при нагреве и, особенно, при резком охлаждении. Другая причина – увеличение объема при закалке на мартенсит.

Лучшим способом уменьшения напряжений является медленное охлаждение около температуры мартенситного превращения (точка M_H). Трещины и коробление могут быть предотвращены предварительным отжигом деталей, равномерным и постепенным нагревом их, а также применением ступенчатой и изотермической закалки.

Обезуглероживание стали с поверхности – результат выгорания углерода при высоком и продолжительном нагреве детали в окислительной среде. Для предотвращения обезуглероживания детали нагревают в восстановительной или нейтральной среде (восстановительное пламя, муфельные печи, нагрев в жидких средах).

8.3 Обработка холодом

Обработка холодом новый вид термической обработки. для повышения твердости стали путем перевода остаточного аустенита закаленной стали в мартенсит. Это выполняется при охлаждении стали до температуры нижней мартенситной точки M_K .

Холодом обрабатывают углеродистую сталь, содержащую более 0,5% С, у которой температура мартенситового превращения (точка M_K) находится ниже 0°, а также легированную сталь, например, быстрорежущую.

8.4 Отпуск стали

Отпуск стали смягчает действие закалки, уменьшает или снимает остаточные напряжения, повышает вязкость, уменьшает твердость и хрупкость стали. Отпуск производится путем нагрева деталей, закаленных на мартенсит до температуры ниже критической. При этом в зависимости от температуры нагрева могут быть получены состояния мартенсита, троостита или сорбита отпуска. Эти состояния несколько отличаются от соответственных состояний закалки по структуре и свойствам: при закалке цементит (в троостите и сорбите) получается в форме удлиненных пластинок, как в пластинчатом перлите. А при отпуске он получается зернистым, или точечным, как в зернистом перлите.

Преимуществом точечной структуры является более благоприятное сочетание прочности и пластичности. При одинаковом химическом составе и одинаковой твердости сталь с точечной структурой имеет значительно более высокое относительное сужение ψ и ударную вязкость $KС$, повышенное удлинение δ и предел текучести σ_T по сравнению со сталью с пластинчатой структурой.

Мартенсит закалки имеет неустойчивую тетрагональную решетку, а мартенсит отпуска – устойчивую центрированную кубическую решетку α -железа.

Отпуск в зависимости от температуры нагрева разделяют на низкий, средний, высокий.

При *низком отпуске* (нагрев до температуры 200-300°) в структуре стали в основном, остается мартенсит, который, однако, изменяет решетку. Кроме того, начинается выделение карбидов железа из твердого раствора углерода в α -железе и начальное скопление их небольшими группами. Это влечет за собой некоторое уменьшение твердости и увеличение пластических и вязких свойства стали, а также уменьшение внутренних напряжений в деталях. Для низкого отпуска детали выдерживают в течение определенного времени обычно в масляных или соляных ваннах. Низкий отпуск применяется для режущего, измерительного инструмента и зубчатых колес.

При *среднем* (нагрев в пределах 300-500°) отпуске сталь из состояния мартенсита переходит в состояние троостита. Чем выше отпуск, тем меньше твердость отпущенной стали и тем больше ее пластичность и вязкость. Средний отпуск применяется для кузнечных штампов, пружин, рессор.

При *высоком* (нагрев до температуры 500-700°) отпуске сталь из состояния мартенсита переходит в состояние сорбита. Сталь получает наилучшее сочетание механических свойств, повышение прочности, пластичности и вязкости, поэтому высокий отпуск стали после закалки ее на мартенсит называют улучшением. Высокий отпуск применяется для многих деталей, подверженных действию высоких напряжений (например, осей автомобилей, шатунов двигателей).

Для некоторых марок сталей отпуск производят после нормализации. Это относится к мелкозернистой легированной доэвтектоидной стали, имеющий высокую вязкость и поэтому плохую обрабатываемость режущим инструментом. Для улучшения обрабатываемости производят нормализацию стали при повышенной температуре (до 950-970°), в результате чего она приобретает крупную структуру и одновременно повышенную твердость (ввиду малой критической скорости закалки никелевой стали). С целью уменьшения твердости производят высокий отпуск этой стали.

8.5 Термомеханическая обработка (ТМО) стали

Этот метод обработки позволяет повысить механические свойства стали по сравнению с полученными при обычной закалке и отпуске. ТМО заключается в сочетании пластической деформации стали в аустенитном состоянии с ее закалкой. Формирование структуры закаленной стали при ТМО происходит при повышенной плотности дислокаций, обусловленных наклепом. Различают два основных вида ТМО: высокотемпературная (ВТМО), низкотемпературная (НТМО).

Термо-механическая обработка проводится выше критических точек (ВТМО), либо при температуре переохлажденного (500 ... 700°С) аустенита (НТМО). Термо-механическая обработка позволяет получить сталь высокой прочности (до 270МПа). Окончательными операциями ТМО являются немедленная закалка во избежание развития рекристаллизации и низкотемпературный (Т=100...300°С) отпуск. В практических целях большее распространение получила ВТМО, обеспечивающая наряду с высокой прочностью хорошее сопротивление усталости, высокую работу распространения трещин, а также сниженные критическую температуру хрупкости, чувствительность к концентраторам напряжений и необратимую отпускную хрупкость.

При ВТМО сталь деформируют при температуре выше A_{c3} , при которой она имеет аустенитную структуру. Степень деформации составляет 20 - 30%, после деформации следует немедленная закалка.

НТМО можно рассматривать как холодную обработку давлением, так как она проводится ниже температуры рекристаллизации, т.е. в температурной зоне существования переохлажденного аустенита в области его относительной устойчивости (500 ... 700°С), температура деформации должна быть выше точки M_n , но ниже температуры рекристаллизации. Степень деформации составляет 75 - 95%. Закалку осуществляют сразу после деформации.

После закалки в обоих случаях следует низкотемпературный отпуск (100-300°С). Такая комбинированная ТМО позволяет получить очень высокую прочность.

