

11. Практика термической обработки стали

11.1 Выбор температуры закалки

Температура закалки для сталей большинства марок определяется положением критических точек A_1 и A_3 .

Для углеродистых сталей температуру закалки можно определить по диаграмме состояния (**слайд**). Обычно для доэвтектоидной стали она должна быть на 30-50 °С выше A_3 , а для заэвтектоидной стали – на 30-50 °С выше A_1 .

При нагреве доэвтектоидной стали в интервал температур между A_1 и A_3 наряду с мартенситом остается феррит, который снижает твердость в закаленном состоянии и ухудшает механические свойства после отпуска. Такая закалка называется неполной, и как правило, ее не применяют.

Для заэвтектоидных сталей оптимальная температура закалки, наоборот, в интервале между A_1 и A_3 , которая по сути является неполной. Наличие в структуре закаленной стали избыточного цементита полезно во многих отношениях, так например, включения цементита повышают износостойкость.

Повышение температуры закалки выше этих температур вызывает рост зерна аустенита и получение более грубой и крупноигольчатой структуры мартенсита. Следствием такого строения является низкая вязкость.

11.2 Время нагрева

Общее время нагрева складывается из времени нагрева до заданной температуры и времени выдержки при этой температуре (**слайд**).

Величина τ_H зависит от нагревающей способности среды, от размеров и формы деталей, от их укладки в печи; τ_B зависит от скорости фазовых превращений, которая определяется степенью перенагрева выше критической точки и дисперсностью исходной структуры.

Практически величина τ_B может быть принята 1 мин для углеродистых и 2 мин для легированных сталей. При нагреве крупных деталей величиной τ_B можно пренебречь; в случае мелких деталей (диаметром или толщиной менее 1 мм) пренебрегают составляющей τ_H .

Время нагрева может очень отличаться в зависимости от обрабатываемой детали, и точно его установить можно опытным путем, а приближенно подсчитать по формуле (**слайд**).

При необходимости проводить нагрев в печи до более высокой температуры время нагрева сокращается, т.к. возрастает интенсивность нагрева за счет лучеиспускания. Наоборот, нагрев в печи до температур ниже 800-900 °С (например, при нагреве под отпуск) протекает значительно медленнее, так как при данных температурах нагрев осуществляется главным образом конвекцией.

11.3 Химическое действие нагревающей среды

При высокой температуре происходит химическое взаимодействие поверхности металла с окружающей средой, причем особое значение имеют два следующих процесса:

- *обезуглероживание* стали, связанное с выгоранием углерода в поверхностных слоях;

- *окисление* стали, ведущее к образованию на поверхности окалины, окислов железа.

Интенсивность этих процессов зависит от температуры, состава стали и состава окружающей газовой среды.

Рассматриваемые процессы – диффузионные, и с повышением температуры они ускоряются.

В последнее время получает распространение нагрев в так называемом кипящем слое.

Если продувать горячий воздух сквозь слой, состоящий из мелких частиц (обычно корундовые диаметром 200-500 мкм), то такой слой «кипит», превращаясь как бы в жидкость. В него можно погружать изделия, и он будет средой нагрева, если имеет высокую температуру. Последнее достигается продуванием сквозь него горячего воздуха. Вместо воздуха можно использовать и другие среды, в том числе нейтральные. Кипящий слой – универсальная среда, которая может служить, например, закалочной средой (заменяя горячий воздух, холодным). Интенсивность охлаждения кипящего слоя занимает промежуточное положение между водой и маслом.

11.4 Закалочные среды

При закалке для переохлаждения аустенита до температуры мартенситного превращения требуется быстрое охлаждение, но не во всем интервале температур, а только в пределах 650-400 °С, т.е. в том интервале температур, в котором аустенит менее всего устойчив, быстрее всего превращается в феррито-цементитную смесь (*слайд*). Выше 650 °С скорость превращения аустенита мала, и поэтому сталь при закалке можно охлаждать в этом интервале температур медленно, но, конечно, не настолько, чтобы началось выпадение феррита или превращение аустенита в перлит. Интервал 650-400 °С должен быть пройден быстро. В углеродистой стали ниже 400 °С вновь начинается зона относительной устойчивости аустенита, охлаждение снова может быть медленным. Наконец в мартенситном интервале, начиная с 200-300 °С, особенно желательно замедленное охлаждение, чтобы к значительным структурным напряжениям не прибавились термические напряжения, возникающие в результате быстрого охлаждения.

Механизм действия закалочных сред (вода, масло) следующий. В момент погружения изделия в закалочную среду вокруг него образуется пленка перегретого пара, охлаждение происходит через слой этой паровой рубашки, т.е. относительно медленно. Когда температура поверхности достигает некоторого значения, при котором паровая рубашка разрывается, то жидкость начинает кипеть на поверхности детали, и охлаждение происходит быстро.

Первый этап относительно медленного охлаждения называется стадией *пленочного кипения*, второй этап быстрого охлаждения – стадией *пузырчатого кипения*. Когда температура поверхности металла ниже температуры кипения жидкости (ниже 100 °С), жидкость кипеть уже не будет,

и охлаждение замедлиться. Этот третий этап охлаждения носит название стадии *конвективного теплообмена*.

Закалочная жидкость охлаждает тем интенсивнее, чем шире интервал второго этапа стадии пузырьчатого кипения.

В таблице (слайд) приведены температуры, разграничивающие различные стадии охлаждения и сравнительная интенсивность действия различных закалочных сред. Кроме того, интенсивность охлаждения зависит от температуры жидкости, от ее физических свойств, вязкости, скрытой теплоты парообразования.

Вода при температуре 20 °С обладает стадией быстрого охлаждения при 400-100 °С. Однако быстрое охлаждение поверхности в данном интервале температур, хотя и способствует получению глубокой закалки, но одновременно создает опасность возникновения трещин в поверхностных слоях.

Повышение температуры вода сужает интервал пузырьчатого кипения и одновременно уменьшает скорость охлаждения в нем.

Масло, благодаря высокой температуре кипения (500-250 °С), имеет и более высокую температуру перехода от пузырьчатого кипения к конвективному теплообмену, поэтому при охлаждении в масло опасность образования трещин резко уменьшается. Однако масло, будучи вязким и имея более низкое значение скрытой теплоты парообразования, охлаждает медленнее, чем вода. Кроме того, масло – огнеопасно, а также после определенного срока службы его необходимо менять (в процессе эксплуатации оно густеет и теряет закаливающую способность), масло пригорает к поверхности детали и образует налет (пригар).

Добавки к воде сильно изменяют ее закаливающую способность. Так, дистиллированная вода охлаждает в два раза медленнее, чем водопроводная.

11.5 Прокаливаемость

Под прокаливаемостью подразумевают... (слайд).

Несквозная прокаливаемость объясняется тем, что при закалке деталь охлаждается быстрее с поверхности и медленнее – в сердцевине. При закалке скорость охлаждения распределяется по сечению так, как это показано на слайде пунктирной линией. Если критическая скорость закалки равна величине, показанной на этой схеме горизонтальной пунктирной линией, то деталь не прокаливается не прокаливается насквозь, и глубина закалки будет равна заштрихованному слою.

Очевидно, с уменьшением критической скорости закалки увеличивается и глубина закаленного слоя, и если критическая скорость будет меньше скорости охлаждения в центре, то это сечение закалится насквозь. Если же сечение велико и скорость охлаждения на поверхности меньше, то при данном способе закалки сталь не закалится даже на поверхности.

Следовательно, чем меньше критическая скорость, тем глубже прокаливаемость. Кроме того, прокаливаемость тесно связана со скоростью превращения аустенита в перлит и, следовательно, с расположением кривой начала превращения на С-диаграмме (слайд). *Про цилиндрическую деталь*

Следовательно, чем медленнее происходит превращение аустенита в перлит, тем правее расположены линии на диаграмме изотермического распада аустенита, тем глубже прокаливаемость.

Для практической оценки прокаливаемости пользуются величиной, которая называется *критическим диаметром*.

Критическим диаметром называется... (слайд)

Следовательно, для данной стали каждой закалочной среде соответствует свой критический диаметр. Очевидно, чем интенсивнее охлаждает закалочная среда, тем больше величина критического диаметра.

На **слайде** показана глубина закалки (незаштрихованная часть сечения) закаленных в воде и в масле образцов различного диаметра одно и той же стали. Распределение закаленной и незакаленной зон показывает, что для каждого охладителя есть максимальное сечение, прокаливающееся насквозь, причем критический диаметр масла меньше критического диаметра воды.

Чтобы не ставить прокаливаемость в зависимость от способа охлаждения, вводят понятие *идеальный критический диаметр*...

Если нужно, чтобы изделие при термической обработке прокаливалось насквозь, следует выбирать такую сталь, чтобы критический диаметр был больше, чем диаметр изделия.

Прокаливаемость сильно влияет на механические свойства сталей. При сквозной закалке свойства по сечению закаленной стали однородны. При несквозной закалке свойства закаленной стали изменяются от поверхности к центру так же, как изменялись бы свойства у серии тонких образцов, которые получили бы при закалке разную скорость охлаждения.

Распределение механических свойств по сечению сталей с различной прокаливаемостью схематически показано на **слайде**.

У образца с несквозной прокаливаемостью (слайд, а и б) в середине наблюдается снижение прочностных свойств и ударной вязкости; при сквозной прокаливаемости свойства будут одинаковыми по всему сечению.

Таким образом, для получения оптимальных механических свойств в закаленном и отпущенном состояниях необходимо иметь зернистые продукты отпуска по всему сечению, т.е. сквозную прокаливаемость.

11.6 Внутренние напряжения

Различают напряжения трех родов.

1. Внутренние напряжения первого рода – это зональные внутренние напряжения, возникающие между отдельными зонами сечения и между различными частями детали.

2. Внутренние напряжения второго рода – возникают внутри зерна или между соседними зернами, возникают между различными фазами вследствие того, что у них разные коэффициенты линейного расширения.

Поскольку внутренние напряжения второго рода возникают между отдельными элементами структур, их иногда называют *структурными напряжениями*, а внутренние напряжения первого рода – *термическими напряжениями*.

3. Когда инородный атом в твердом растворе создает вокруг себя упругие искажения кристаллической решетки, представляет собой пример возникновения напряжений *третьего рода*.

Какого бы рода ни были напряжения, в конечном итоге они вызывают одинаковый эффект – упругие деформации и искажения кристаллической решетки.

Основным методом изучения и измерения внутренних напряжений является рентгенографический анализ.

Внутренние напряжения первого рода, влияние которых особенно существенно, т.к. только они вызывают коробление детали и трещины, зависят не только от внешних факторов (скорости охлаждения, размера и формы детали и т.д.), но и от свойств металла. Если металл обладает малой пластичностью, то возникающие внутренние напряжения не разряжаются пластической деформацией, и если напряжения по величине превзойдут значение предела прочности, то возникнут трещины.

В процессе нагрева и охлаждения внутренние напряжения изменяются, например при нагреве поверхностные слои металла испытывают напряжения сжатия, т.к. они стремятся расшириться, а этому препятствуют более холодные слои металла сердцевина. Наоборот, при охлаждении поверхностные слои, имеющие более низкую температуру, чем сердцевина, испытывают напряжения растяжения, а сердцевина – напряжения сжатия.

Окончание охлаждения соответствует выравниванию температуры во всем сечении. Значит ли это, что установление одинаковой температуры по всему объему приводит к устранению напряжений? Нет. После завершения охлаждения, и следовательно сокращения объема поверхности, некоторые центральные части еще охлаждаются и объем сердцевинных слоев уменьшается, возникают внутренние напряжения, которые к моменту окончания охлаждения во всем сечении принимают определенное значение.

Напряжения, которые сохранились в детали в результате охлаждения, называются *остаточными напряжениями*.

Закаленная сталь всегда находится в напряженном состоянии. Отпуск – необходимое и радикальное средство уменьшения остаточных напряжений.

Чем выше температура отпуска и чем больше его продолжительность, тем в большей степени снимаются напряжения (*слайд*).

11.7 Способы закалки

В зависимости от состава стали, формы и размеров детали и требуемых свойств следует выбирать оптимальный способ закалки, наиболее просто осуществимый и одновременно обеспечивающий нужные свойства.

Чем сложнее форма термически обрабатываемой детали, тем тщательнее следует выбирать условия охлаждения, потому что чем сложнее деталь, тем большее различие в сечениях, тем большие внутренние напряжения возникают в ней при охлаждении.

Чем больше в стали углерода, тем больше объемные изменения при превращении, тем при более низкой температуре происходит превращение аустенита в мартенсит, тем больше опасность возникновения деформаций,

трещин, напряжений и других закалочных пороков, тем тщательнее необходимо выбирать условия охлаждения после закали.

1. *Закалка в одном охладителе (слайд, кривая 1)* – наиболее простой способ. Нагретую деталь погружают в закалочную жидкость, где она находится до полного охлаждения. Этот способ применяют при закалке несложных деталей из углеродистых и легированных сталей. Для углеродистых сталей диаметром более 2-5 мм закалочной средой служит вода, а для меньших размеров и для многих легированных сталей закалочной средой является масло. Для уменьшения внутренних напряжений деталь иногда не сразу погружают в закалочную жидкость, а некоторое время охлаждают на воздухе, «подстуживают». Такой способ закали называется закалкой с подстуживанием.

2. *Прерывистая закалка в двух средах (слайд, кривая 2)*. Деталь охлаждают сначала в быстро охлаждающей среде (вода), а затем в медленно охлаждающей (масло или воздух). В мартенситном интервале сталь охлаждается медленно, что способствует уменьшению внутренних напряжений. Этот способ применяют для закали инструмента из высокоуглеродистых сталей.

3. *Струйчатая закалка* заключается в обрызгивании детали интенсивной струей воды, и обычно ее применяют тогда, когда требуется закалить только часть детали. При этом способе не образуется паровая рубашка, что обеспечивает более глубокую прокаливаемость.

4. *Закалка с самоотпуском*. При обычном отпуске вследствие того, что вся деталь испытывает одинаковое воздействие по температуре, она обладает и одинаковыми свойствами по всему сечению. Для ударного инструмента (зубила, кузнечный инструмент и др.) такое распределение не целесообразно. Инструмент обладает высокой стойкостью, когда твердость постепенно и равномерно понижается от рабочей (режущей) части к центру и к хвостовой (крепежной) части инструмента. Закалку с самоотпуском проводят, ориентируясь по цветам побежалости. Появление цветов побежалости при отпуске объясняется тем, что при определенных температурах на чистой (полированной, шлифованной) поверхности возникают тонкие слои окислов. Данные об изменении цвета поверхности в зависимости от толщины слоя и температуры следующие:

Цвет побежалости	Температура, °C	Толщина слоя, мкм
Соломенно-желтый	220...240	0,045
Оранжевый	240...260	0,050
Красно-фиолетовый	260...280	0,065
Синий	280...300	0,070

Отпуск по цветам побежалости проводят двумя способами. Можно охладить в воде при закалке только рабочую часть инструмента и, вынув ее из воды, дождаться определенного ее нагрева (определяемого по цвету побежалости) теплом той части инструмента, которая не погружалась в воду. Это и будет закалка с самоотпуском. Второй способ: закалить всю деталь, затем отпустить в соляной или свинцовой ванне при высокой температуре

только нерабочую часть и, пользуясь теплопроводностью, разогреть и рабочую часть инструмента, ориентируясь по цветам побежалости. Нагрев прерывают немедленным охлаждением всей детали в воде.

5. *Ступенчатая закалка (слайд, кривая 3)*. Деталь охлаждается в закалочной среде, имеющей температуру выше мартенситной точки для данной стали. При охлаждении и выдержке в этой среде деталь должна приобрести во всех точках сечения температуру закалочной ванны. Затем происходит окончательное, обычно медленное охлаждение, во время которого и происходит закалка. Разбивка охлаждения на две ступени уменьшает внутренние напряжения первого рода. Применение ступенчатой закалки ограничено предельным размером сечения детали. Она применима для деталей из углеродистой стали диаметром не более 10...12 мм, а для легированных сталей до 20...30 мм.

6. *Изотермическая закалка (слайд, кривая 4)*. В отличие от ступенчатой при изотермической закалке необходимо выдерживать сталь в закалочной среде столько времени, чтобы успело закончиться изотермическое превращение аустенита. Обычно температура изотермического распада аустенита лежит в интервале 250...350 °С. Продолжительность выдержки в закалочной среде определяется временем превращения аустенита при данной температуре (ее находят по диаграмме изотермического распада аустенита для данной стали).

7. *Обработка холодом*. Известно, при простой закалке в структуре наравне с мартенситом наблюдается остаточный аустенит, и его тем больше, чем выше содержание углерода в стали. Для снижения объемной доли остаточного аустенита был разработан метод обработки холодом, который заключается в охлаждении деталей до температур ниже 0 °С. Сущность этого метода заключается в следующем. Температурный режим обработки холодом определяется положением нижней мартенситной точки (M_K). Положение M_K зависит от состава стали. Для большинства сталей температура M_K лежит не ниже -80 °С. Обработку холодом рекомендуют проводить немедленно после закалки, для того, чтобы остаточный аустенит не успел стабилизироваться. При обработке холодом объем увеличивается, поэтому этот метод применяют для восстановления размеров некоторых очень точных изделий (например, калибров).

7.1.7. Дефекты, возникающие при закалке

Неправильно проведенная закалка может вызвать различные дефекты. Наиболее распространенные из них: недостаточная твердость, мягкие пятна, повышенная хрупкость, обезуглероживание и окисление поверхности и, наконец, коробление, деформации и трещины.

Причины возникновения коробления, деформаций и трещин мы уже рассмотрели.

Недостаточная твердость закаленной детали объясняется недогревом или недостаточно интенсивным охлаждением. В первом случае мартенсит не обладает достаточной твердостью (не содержит достаточно углерода); во втором – не переохлаждается до мартенситного превращения и структура

полностью или частично состоит из продуктов перлитного распада аустенита (тросит, сорбит).

Образование мягких пятен также является следствием недостаточного прогрева или недостаточно интенсивного охлаждения. Иногда мягкие пятна появляются из-за неоднородности исходной структуры. Предварительная ТО (нормализация), создающая более однородную структуру, устраняет этот дефект.

Повышенная хрупкость – дефект, появляющийся в результате закалки от слишком высоких температур, при которых произошел рост зерна аустенита. Устраняют дефект повторной закалкой от нормальных температур для данной стали.

Окисление и обезуглероживание поверхности часто происходит при нагреве в пламенных или электрических печах без контролируемой атмосферы. Поэтому на изделие дают припуск на шлифование, который в последствие удаляется механическим способом вместе с обезуглероженным или окисленным слоем.

Контролируемая искусственная атмосфера в термических печах является радикальным способом устранения или уменьшения этого дефекта. Нагрев в солях также способствует уменьшению окисления и обезуглероживания.