

Лабораторная работа

ЗАКАЛКА И ОТПУСК СТАЛЕЙ

Цель работы:

- 1) изучить теоретические основы закалки и отпуска стали;
- 2) практически освоить технологии закалки и отпуска закаленной стали;
- 3) установить изменения структуры и свойств углеродистой стали в результате закалки;
- 4) изучить изменение структуры и свойств закаленной стали при отпуске.

Студент должен знать основные методы закалки и отпуск сталей, взаимосвязи структуры и свойств сталей при закалке и отпуске.

Студент должен уметь назначить режимы термической обработки углеродистых сталей.

Общие сведения

В сельскохозяйственном машиностроении для изготовления деталей, инструментов, приспособлений широко используются углеродистые стали. Для получения необходимых механических свойств, предъявляемых к изделиям, стали подвергают термической обработке.

Термическая обработка – это совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения стальных изделий. Цель термической обработки стали – изменение ее структуры, приводящее к изменению свойств (твердости, прочности, пластичности, износостойкости, обрабатываемости резанием и т.д.).

Основными видами термической обработки стали являются отжиг, закалка и отпуск.

Отжиг стали – термическая обработка, при которой сталь нагревают выше критических температур, выдерживают при этих температурах и медленно охлаждают (рисунок 7.1).

Основная цель отжига – приблизить металл к равновесному состоянию, снять напряжения, вызванные предыдущей обработкой, снизить твердость, повысить пластичность, улучшить обрабатываемость резанием.

Отжики бывают: I рода – без фазовой перекристаллизации; II

рода – с фазовой перекристаллизацией.

К отжигу I рода относятся: диффузионный отжиг; рекристаллизационный отжиг; низкий отжиг.

К отжигу II рода относятся: полный отжиг; неполный отжиг; циклический отжиг; изотермический отжиг.

Нормализация стали – термическая обработка, при которой доэвтектоидные стали нагревают выше критической точки A_{c3} , эвтектоидные и заэвтектоидные стали – выше критической точки A_{cm} на 30...50 °С, с непродолжительной выдержкой и последующим охлаждением на воздухе. Цель нормализации – перекристаллизация зерна стали, снятие внутренних напряжений, подготовка стали к дальнейшей пластической деформации, механической или термической обработкам.

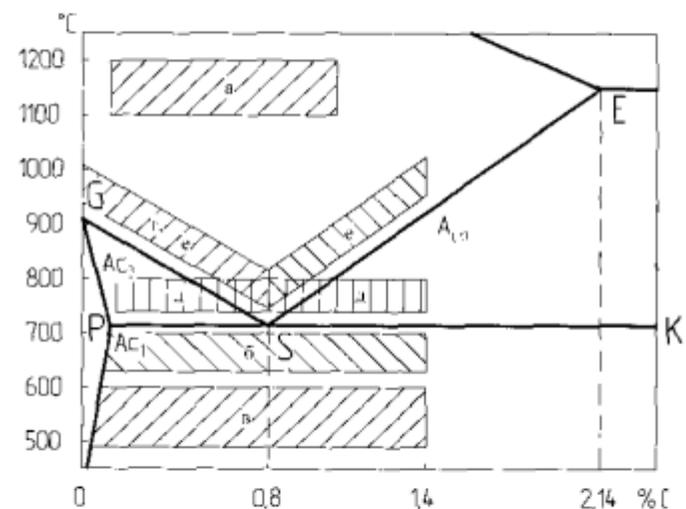


Рисунок 7.1. Температурные зоны нагрева для различных видов отжига:

- | | |
|---------------------------------|------------------|
| a – диффузионный отжиг; | } отжики I рода |
| b – рекристаллизационный отжиг; | |
| в – низкий отжиг; | |
| г – полный отжиг; | } отжики II рода |
| д – неполный отжиг; | |
| е – нормализация | |

Закалка стали – термическая обработка, которая заключается в нагреве доэвтектоидных сталей выше критической точки A_{c3} , эвтектоидных и заэвтектоидных сталей выше A_{c1} на 30...50 °С, выдержке при данной температуре и последующим охлаждении (со скоростью выше критической).

Цель закалки – повысить твердость стали за счет получения неравновесной структуры – мартенсита.

В зависимости от температуры нагрева при закалке различают **полную и неполную закалку** стали. Если температура нагрева выше A_{c3} , закалка считается полной, если температура нагрева выше A_{c1} , закалка считается неполной (рисунок 7.2).

Для доэвтектоидных сталей применяют полную закалку, в результате которой образуется структура мартенсита и небольшое количество аустенита остаточного.

Для заэвтектоидных сталей применяют неполную закалку. Структура после такой закалки представляет собой мартенсит плюс цементит и небольшое количество аустенита остаточного. Наличие цементита в закаленной стали повышает ее твердость и износостойкость.

Критическая скорость закалки – минимальная скорость охлаждения, при которой происходит превращение аустенита в мартенсит (касательная к началу распада аустенита на диаграмме изотермического превращения) (рисунок 7.3).

Неполная закалка не применяется для доэвтектоидных сталей, так как при этом образуется структура, состоящая из мартенсита и феррита и имеющая невысокую прочность и твердость. Для заэвтектоидных сталей не применяется полная закалка, поскольку в результате сохраняется большое количество аустенита остаточного, возможен перегрев стали, уменьшается твердость, а цементит отсутствует.

После закалки детали получают большие остаточные напряжения, которые могут привести к короблению или образованию трещин. Для предотвращения этих явлений сразу же после закалки детали необходимо подвергать отпуску.

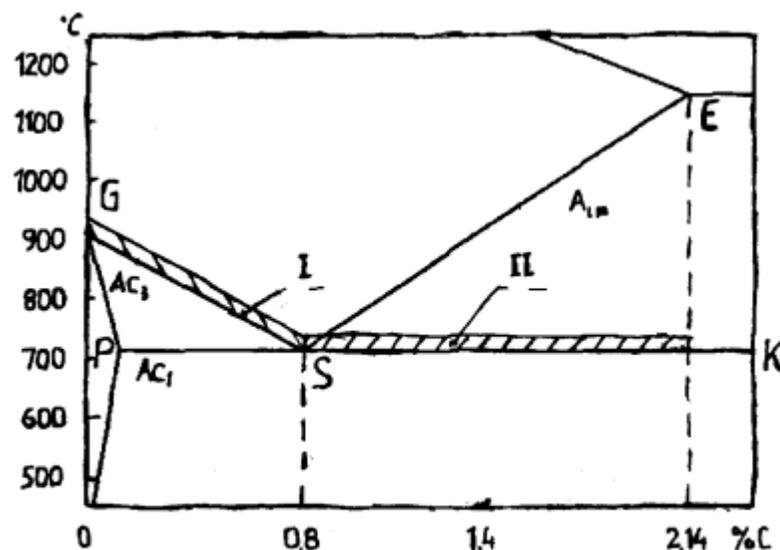


Рисунок 7.2. Температурные зоны нагрева стали под закалку:
I – полная закалка; II – неполная закалка

Отпуск стали – термическая обработка, которая заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже A_{c1} , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью. Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате которой сталь получает требуемые механические свойства. Отпуск полностью или частично устраняет **внутренние** напряжения, возникающие при закалке.

Структура стали после закалки представляет собой **мартенсит** и **остаточный аустенит** (неравновесные структуры). При отпуске происходит переход стали в более устойчивое состояние, что сопровождается тремя превращениями.

Основные способы закалки

На способ закалки основное влияние оказывает метод охлаждения. Охлаждающая среда должна обеспечивать скорость охлаждения выше критической в интервале температур $A_1 - M_n$ и более плавное охлаждение в интервале температур мартенситного превращения $M_n - M_k$ (рисунок 7.3).

1. Непрерывная закалка (в одном охладителе) (рисунок 7.3, кривая 1). Деталь нагревают до температуры закалки, затем быстро

погружают в закалочную жидкость со скоростью охлаждения выше критической и выдерживают до полного охлаждения. Этот метод применяют для закалки деталей несложного профиля и крупного сечения. Недосток этого метода состоит в том, что в результате неравномерного охлаждения детали по сечению, возникают большие термические напряжения, которые могут привести к короблению детали или возникновению трещин.

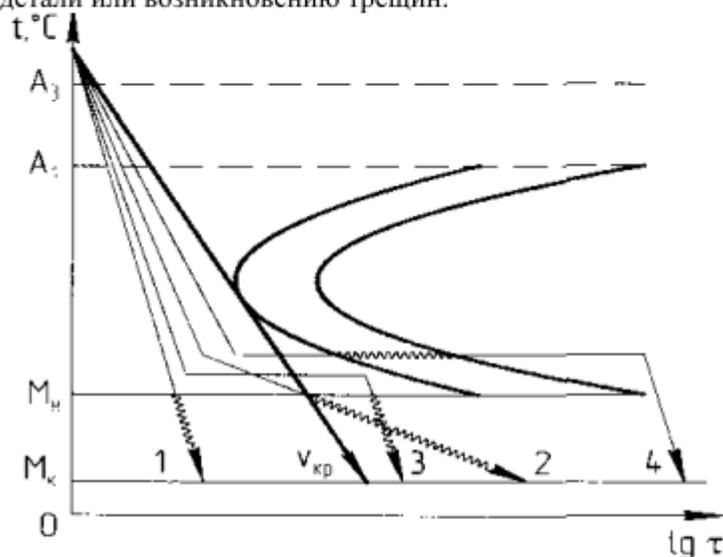


Рисунок 7.3. Основные способы закалки стали: 1 – непрерывная (в одном охладителе); 2 – прерывистая (в двух охладителях); 3 – ступенчатая; 4 – изотермическая

2. Прерывистая закалка (в двух средах) (рисунок 7.3, кривая 2). Деталь нагревают до температуры закалки, после чего охлаждают со скоростью выше критической до температуры, немного выше точки M_n , а затем быстро переносят в менее интенсивный охладитель, например, из воды в масло. В результате переноса во вторую закалочную среду, мартенситное превращение протекает более медленно, вследствие чего уменьшаются внутренние напряжения. Данная закалка применяется для закалки инструмента несложного профиля, изготовленного из заэвтектоидных углеродистых сталей.

3. Ступенчатая закалка (рисунок 7.3, кривая 3). Деталь, нагретую до температуры закалки, охлаждают со скоростью выше критической в среде, имеющей температуру на $30...50\text{ }^\circ\text{C}$ выше мартенситной точки M_n (расплавленные соли, щелочи), выдерживают изотермически для выравнивания температуры по всему сечению изделия, чтобы не произошел распад аустенита на феррито-цементитную смесь, а затем охлаждают в масле или на воздухе. Данный метод обеспечивает закалку с минимальными внутренними напряжениями и применяется для деталей сложной конфигурации (сверла, метчики, зенкеры, фрезы, развертки и т.д.). Недосток этого метода состоит в том, что его невозможно использовать для закалки деталей крупного сечения.

4. Изотермическая закалка (рисунок 7.3, кривая 4) проводится так же, как и ступенчатая, но изотермическую выдержку выше точки M_n дают такую, чтобы произошел распад аустенита с образованием бейнита или другой структуры, соответствующей температуре выдержки. Внутренние напряжения и деформация при такой закалке минимальные. Изделие после закалки имеет меньшую твердость, но повышенные прочность, пластичность, ударную вязкость.

5. Закалка с самоотпуском. Деталь нагревают до температуры закалки, затем охлаждают в одном охладителе со скоростью больше критической непродолжительное время и прерывают охлаждение на 3–5 с. Затем деталь охлаждают полностью. При этом наружные слои детали претерпевают мартенситное превращение, а сердцевина – троостосорбитное. Вследствие теплообмена наружные слои за счет тепла внутренних слоев нагреваются до температур отпуска и таким образом происходит *самоотпуск*. В результате деталь приобретает высокую твердость поверхности и вязкую и прочную сердцевину (зубила, керны, лемеха, кузнечный инструмент и т.д.).

Из приведенного выше видно, что необходимые структуры при закалке можно получить в зависимости от различной скорости охлаждения (таблица 1).

Для определения общей продолжительности нагрева при закалке $\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{сквозного нагрева}} + \tau_{\text{изотермической выдержки}}$ пользуются опытными данными (таблица 2).

Таблица 1 – Скорость охлаждения стали в различных средах

| Закалочная среда | Скорость охлаждения, °С/мин, при различных температурах, °С | |
|--------------------------------------|---|-----------|
| | 650...550 | 300...200 |
| Вода при температуре, °С | | |
| 18 | 600 | 270 |
| 28 | 500 | 270 |
| 50 | 100 | 270 |
| 10 %-й раствор NaOH в воде при 18 °С | 1200 | 300 |
| 10 %-й раствор NaCl в воде при 18 °С | 1100 | 300 |
| Минеральное масло | 100...150 | 20...50 |
| Спокойный воздух | 30 | 1 |

Таблица 2 – Ориентировочная продолжительность нагрева изделий в различных печах для закалки от 800...850 °С

| | Продолжительность нагрева, секунды, на 1 мм сечения или толщины изделия | | |
|-------------------|---|------------|---------------|
| | Круглое | Квадратное | Прямоугольное |
| В электропечи | 40...50 | 50...60 | 60...75 |
| В пламенной печи | 35...40 | 45...50 | 55...60 |
| В соляной ванне | 12...15 | 15...18 | 18...22 |
| В свинцовой ванне | 6...8 | 8...10 | 10...12 |

Дефекты, возникающие при термической обработке стали.

1. Низкая твердость в результате недогрева (доэвтектоидные стали были нагреты до температуры ниже A_{c3} , а эвтектоидные и заэвтектоидные – ниже A_{c1}), или если охлаждение при закалке проводилось со скоростью ниже критической. Этот дефект может быть устранен повторной закалкой с правильным режимом.

2. Перегрев (повышенная хрупкость). Этот дефект возникает, если превысили температуру закалки на 100...200 °С. В результате закалки образуется крупноиглочатый мартенсит. Этот дефект устраняется полным отжигом и последующей закалкой с правильным режимом.

3. Мягкие пятна на поверхности детали (участки с пониженной твердостью). Образуются при возникновении паровой рубашки, уменьшающей скорость охлаждения. Для устранения этого дефекта деталь необходимо перемещать в охлаждающей среде.

4. Окисление и обезуглероживание поверхности детали. Этот дефект возникает, если нагрев под закалку ведется в печи с окисли-

тельной атмосферой и устраняется при нагреве деталей в нейтральных атмосферах (азоте, аргоне и т.д.).

5. Внутренние и наружные трещины, деформации и коробление.

Склонность к образованию трещин возрастает с увеличением в стали содержания углерода, с повышением температуры закалки и увеличением скорости охлаждения в температурном интервале мартенситного превращения. Трещины образуются в изделии в местах концентраторов напряжений (резкое изменение сечения изделия или местные вырезы, углубления, выступы и т.д.). Трещины – неисправимый дефект. Они могут быть устранены при медленном охлаждении деталей в области температур мартенситного превращения, изменением метода закалки и конструкции детали.

Превращения при отпуске

Первое превращение при отпуске происходит при температуре 80–200 °С. При этом происходит перераспределение углерода, который выделяется из мартенсита и образует зародыши низкотемпературного гексагонального ϵ -карбида $Fe_{2,4}C$. Тетрагональность мартенсита при этом уменьшается, соответственно, уменьшается его объем.

При низкотемпературном отпуске легированных сталей не происходит диффузионного перераспределения легирующих элементов. Выделяющиеся частицы карбидов имеют такое же содержание легирующих элементов, как и в мартенсите. Образуется механическая смесь малоуглеродистого мартенсита и карбидов, которая называется *отпущенный мартенсит* или *мартенсит отпуска*. Твердость стали сохраняется максимальной, такой, которая получилась при закалке.

Второе превращение при отпуске происходит при температуре 200...300 °С. Протекает одновременно несколько процессов:

- 1) продолжается распад мартенсита;
- 2) начинается распад остаточного аустенита.

Твердость закаленной стали заметно не изменяется, но повышается хрупкость. Поэтому отпуск в зоне температур 200–300 °С не производится.

Третье превращение при отпуске происходит при температуре 350...450 °С. Завершается процесс выделения углерода из α -раствора (мартенсита), осуществляется обособление решеток феррита и карбида, связанное с одновременным протеканием карбидного превращения, в результате которого образуется цементит

($Fe_{2,4}C \rightarrow Fe_3C$). Изменяются размеры и форма карбидных частиц. Она приближается к сфероидальной. Образуется ферритоцементитная очень мелкая смесь, которая называется *троостит отпуска*. Твердость стали снижается ~ на 1/3 от максимума.

Четвертое превращение при отпуске происходит при повышении температуры до 500...650 °С, которое приводит к изменениям микроструктуры; протекает процесс коагуляции и сфероидизации карбидов. Коагуляция карбидов происходит вследствие переноса атомов углерода через α -твердый раствор, растворения более мелких и рост более крупных частиц карбидов при обеднении углеродом α -твердого раствора. Образуется более крупная ферритоцементитная смесь, которая называется *сорбитом отпуска*. Твердость стали снижается ~ на 2/3 от максимума.

Все превращения и образование структур при отпуске происходят при определенной температуре нагрева в процессе выдержки и не зависят от скорости охлаждения. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали 45 представлены на рисунке 7.4.

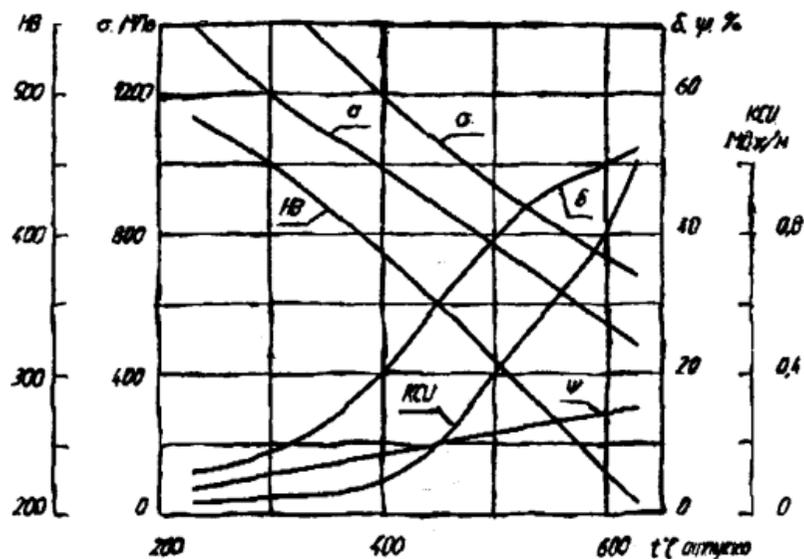


Рисунок 7.4. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали с содержанием 0,45 % углерода

В легированных сталях второе и третье превращения при отпуске происходят при более высоких температурах в результате того,

что почти все легирующие элементы увеличивают силы связи в твердых растворах и затрудняют диффузионное перераспределение элементов. Карбидообразующие элементы, имеющие большое химическое сродство к углероду (Ti, Nb, V, W, Mo, Cr и др.) уменьшают скорость диффузии углерода и замедляют образование карбидов.

Виды отпуска и их применение

Низкий отпуск. Температура 150...200 °С. Структура стали – *мартенсит отпуска*. Твердость остается высокой – 55...62 HRC, но уменьшаются остаточные напряжения. Данный отпуск применяют для измерительного и режущего инструмента, после цементации, цианирования, поверхностной закалки, для деталей, требующих максимальной твердости.

Средний отпуск. Температура 350...500 °С. Структура стали после среднего отпуска – *троостит отпуска*. Твердость 40...50 HRC. Охлаждение после этого вида отпуска рекомендуется проводить в воде, что приводит к образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, которые увеличивают предел выносливости деталей. Применяют для пружин, рессор и т.п.

Высокий отпуск. Температура 550...600 °С. Структура *сорбит отпуска*. Твердость 25...30 HRC. Данная структура имеет высокую ударную вязкость. Этот вид отпуска применяют для деталей, работающих при знакопеременных и ударных нагрузках и не требующих высокой твердости: оси и полуоси тракторов, автомобилей, валы, пальцы, болты, шатуны двигателей и др. Сочетание закали и высокого отпуска в практике называется улучшением стали.

Структуры троостита и сорбита, получаемые отпуском, являются зернистыми в отличие от тех же структур, получаемых закалкой, которые являются пластинчатыми. В практике стремятся получать троостит и сорбит отпуска для обеспечения более высоких механических свойств сталей.

Порядок проведения работы

1. Изучить исходную структуру образца марки стали 45 и зарисовать схему ее структуры.
2. Измерить твердость стали в исходном состоянии.
3. Назначить режимы закалки:
 - а) температуру нагрева под закалку;
 - б) время нагрева и выдержки;

в) скорость охлаждения (охлаждающую среду) по диаграмме изотермического превращения аустенита (рисунок 7.3) для данной марки стали.

4. Нагреть образцы до температуры закалки и дать время на прогрев.

5. Охладить образцы в воде, масле, на воздухе.

6. Замерить твердость образцов после закалки в различных средах.

7. Изучить и зарисовать схемы микроструктур стали после закалки с различной скоростью охлаждения.

8. Построить график зависимости твердости стали от скорости охлаждения.

9. Изучить превращения в стали при отпуске.

10. Для образцов из стали 45, закаленных на мартенсит с охлаждением в воде, выполнить три вида отпуска:

а) низкий, температура 200 °С;

б) средний, температура 400 °С;

в) высокий, температура 600 °С.

11. Дать время выдержки при отпуске ~ 30 мин.

12. Замерить твердость образцов после отпуска на приборе ТК-2.

13. Построить график зависимости твердости закаленной стали HRC от температуры отпуска.

14. Изучить под микроскопом и зарисовать схемы структур отпущенной стали 45.

15. Сделать выводы по работе.

Приборы и оборудование

1. Образцы из стали 45 для закалки и отпуска диаметром 10–12 мм, длиной 30–40 мм.

2. Электроды камерные лабораторные СНОЛ.

3. Закалочные клещи.

4. Закалочные ванны.

5. Твердомеры ТК-2.

6. Микроскопы МИМ-7.

7. Набор шлифов закаленных сталей.

8. Микрошлифы стали 45 после низкого, среднего и высокого отпусков.

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Определение основных видов термической обработки (отжиг, нормализация, закалка полная и неполная, отпуск).

3. Участок диаграммы Fe – Fe₃C с нанесенными на ней температурными зонами нагрева под закалку.

4. Диаграмму изотермического превращения аустенита (для стали У8А) со схематичным изображением способов закалки и их определение.

5. Краткие сведения о превращениях при отпуске, виды отпуска.

6. Назначенные режимы термической обработки.

7. Схемы микроструктуры образцов стали 45: а) исходной; б) после закалки, полученной с различной скоростью охлаждения; в) после различных видов отпуска.

8. График зависимости твердости стали от скорости охлаждения.

9. График зависимости твердости закаленной стали от температуры отпуска.

10. Выводы по работе.

11. Список использованной литературы.

Контрольные вопросы

1. Что такое отжиг?

2. Что такое закалка?

3. Что такое нормализация?

4. Что такое критическая скорость закалки?

5. Что такое полная закалка?

6. Что такое неполная закалка?

7. Что такое непрерывная закалка?

8. Что такое прерывистая закалка?

9. Что такое ступенчатая закалка?

10. Что такое изотермическая закалка?

11. Что такое закалка с самоотпуском?

12. Какие могут быть дефекты при закалке?

13. Как выбрать температуру под закалку для доэвтектоидных сталей?

14. Как выбрать температуру под закалку для заэвтектоидных сталей?

15. Как определить продолжительность нагрева при закалке?

16. Что такое мартенсит, в каком случае образуется эта структура?

17. Как влияет скорость охлаждения на твердость закаленной стали?

18. Что такое критическая точка A_{c3} ?

19. Что такое критическая точка A_{c1} ?
20. Что такое отпуск?
21. Какие существуют превращения при отпуске?
22. Какие виды отпуска вы знаете?
23. Какая структура образуется при низком отпуске?
24. В каком случае применяется низкий отпуск?
25. Какая структура образуется при среднем отпуске?
26. В каком случае применяется средний отпуск?
27. Какая структура образуется при высоком отпуске?
28. В каком случае применяется высокий отпуск?
29. В чем отличие троостита и сорбита закалки и троостита и сорбита отпуска?
30. Как влияет температура отпуска на механические свойства стали?