

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Иркутский государственный аграрный университет
имени А.А. Ежевского**

Кафедра «Технический сервис и общеинженерные дисциплины»

С. В. Агафонов, М. В. Охотин

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Учебно–методическое пособие

Иркутск 2015



УДК 620.22+621.7./9+621.914

А 235

Агафонов С. В., Охотин М. В.

А 235 Материаловедение и технология конструкционных материалов. Термическая обработка углеродистой стали : учеб. – метод. пособие. – Иркутск : Изд-во ИрГАУ, 2015. – 26 с.

Рекомендовано к печати научно-методической комиссией инженерного факультета Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского (протокол № 10 июня 2015 г.).

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент **П.И. Ильин**, кафедра «Эксплуатации МТП, БЖД и ПО» Инженерного факультета ФГБОУ ВО Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского;

кандидат технических наук, доцент **Н.Г. Филиппенко**, кафедра «Технологии ремонта транспортных средств и материаловедения» факультета транспортные системы ФГБОУ ВО Иркутского государственного университета путей сообщения.

Даны общие сведения о термической обработке углеродистых сталей: закалке, отпуске (низком, среднем, высоком), отжиге.

Основной текст напечатан корпусом, он и составляет обязательный учебный материал, петитом набран дополнительный материал, развивающий некоторые положения основного текста, а так же материал справочного характера.

Учебно-методическое пособие подготовлено на основе требований Федерального государственного образовательного стандарта и программы дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов», предназначено для бакалавров обучающихся по направлениям подготовки 35.03.06 (110800) – «Агроинженерия», 23.03.03 (190600) – «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» очной и заочной формы обучения, 44.03.04 (051000) – «Профессиональное обучение» в качестве пособия к лабораторно-практическим занятиям и для самостоятельной работы.

© Агафонов С.В., Охотин М.В., 2015

© Издательство ИрГАУ, 2015

1 ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы

Ознакомиться с технологическим процессом термической обработки и получить практические навыки проведения закалки, отпуска и нормализации углеродистой стали.

Оборудование и материалы

Муфельная печь, закалочный бак с водой, твердомеры типа Бринелля и Роквелла, образцы из конструкционной углеродистой стали, клещи, шлифовальная бумага.

Задание

Провести закалку, отпуск и нормализацию стали 45 (рисунок 1).

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Закалка

1 Определить твёрдость отожжённых образцов на приборе Бринелля (НВ).

2 Используя диаграмму Fe-Fe₃C (рисунок 2), выбрать температуру нагрева для закалки стали 45.

3 Определить общее время ($\tau_{общ}$) нагрева образцов

$$\tau_{общ} = \tau_n + \tau_v, \quad (1)$$

где τ_n – время нагрева (примерно 1,5 мин на 1 мм диаметра или толщины образца);

τ_v – время выдержки ($1/5 \cdot \tau_n$).

4 Образцы загрузить в печь, нагретую до температуры закалки, выдержать их в течение требуемого времени.

5 Выгрузить образцы из печи и охладить их в воде.

6 Торцы образцов зачистить на шлифовальной бумаге.

7 На приборе Роквелла (HRC) определить твёрдость закалённых образцов. Перевести данные значения твёрдости по Роквеллу в значения твёрдости по Бринеллю (HB).

Отпуск закалённой стали 45

1 Закалённые образцы поместить в печь, нагретую до назначенной температуры отпуска.

2 Выдержать их в печи, согласно расчётному времени, и охладить на воздухе.

3 Торцы образцов зачистить на шлифовальной бумаге, определить твёрдость по Роквеллу, перевести значения твёрдости HRC в HB.

Нормализация стали 45

1 Определить температуру нормализации стали 45 (рисунок 2).

2 Образцы поместить в печь, нагретую до температуры нормализации стали 45. Длительность выдержки та же, что и при закалке.

3 Охладить образцы на воздухе.

4 Торцы образцов зачистить и определить их твёрдость на приборе Бринелля (HB). Полученные данные занести в протокол (таблица 1).

5 Сделать выводы.

Отчётность

1 Дать краткую характеристику основным видам термической обработки углеродистой стали.

2 Заполнить протокол результатов испытаний (таблица 1). Привести графики: термической обработки, нижнюю левую часть (стальную) диаграммы Fe-Fe₃C.

2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Термической обработкой (ТО) называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения металлических сплавов, находящихся в твёрдом состоянии.

Целью ТО является изменение структуры и получение необходимых физико-механических свойств металлических сплавов. При этом структура и свойства металла должны быть остаточными, т. е. сохраняться после окончания ТО.

Основными факторами при термической обработке являются *температура* и *время*. Режим любой ТО может быть задан графически в координатах температура – время (рисунок 1).

Фазовые превращения в затвердевшей стали вызываются тем, что вследствие изменившихся условий, например температуры, одно состояние оказывается менее устойчивым, чем другое.

Известны три основных структуры стали, переход которых одной, в другую и характеризует основные превращения.

1 **Аустенит** (А) – твёрдый раствор углерода в γ - железе Fe _{γ} (С), имеет решётку ГЦК.

2 **Мартенсит** (М) – пересыщенный твёрдый раствор углерода в α - железе Fe _{α} (С), имеет тетрагональную кристаллическую решётку ($a \neq c$).

3 **Перлит (П)** – эвтектоидная смесь, состоящая из одновременно образовавшихся феррита (Ф) и цементита (Ц).

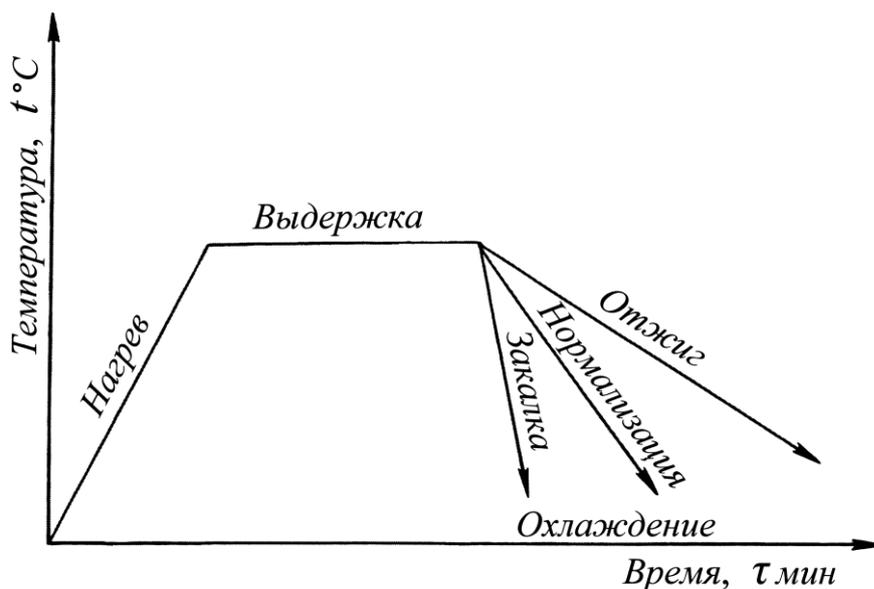


Рисунок 1 – График (режим) термической обработки

Термическая обработка железоуглеродистых сплавов основана на том, что неустойчивая структура аустенита в зависимости от скорости охлаждения (вида охлаждающей среды) превращается в иные структуры, обладающие отличными от аустенита свойствами. При этом образуются два вида структур его разложения:

- диффузионный (перлит, сорбит, троостит);
- бездиффузионный (мартенсит).

Особо следует запомнить, что **структуры перлита, сорбита и троостита по своей природе идентичны и представляют собой механическую смесь феррита и цементита.**

Отличаются они лишь степенью дисперсности смеси, зависящей, в свою очередь, от скорости охлаждения аустенита. Чем выше скорость охлаждения, тем более мелкодисперсная смесь и тем выше прочностные характеристики стали, но ниже её пластичность.

Характер любого вида ТО определяется, прежде всего, температурой нагрева и скоростью охлаждения обрабатываемого изделия. Известны три вида ТО: *отжиг*, *закалка* и *отпуск*.

При закалке фиксируются метастабильное (неравновесное) состояние сплава и соответствующие ему свойства (высокая твёрдость, наличие высоких внутренних напряжений, хрупкость и др.).

В противоположность закалке отжиг и отпуск позволяют достигнуть стабилизации структуры, её равновесного состояния.

3 ОТЖИГ

Отжиг – это процесс термической обработки, который заключается в нагреве стали до определённой температуры, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении (обычно вместе с печью).

Пологая кривая охлаждения (рисунок 1) при полном отжиге свидетельствует о том, что детали охлаждаются вместе с печью.

В результате перекристаллизации стали при дальнейшем очень медленном охлаждении образуется равновесная структура с минимальными внутренними напряжениями и низкой твёрдостью.

Скорость и длительность нагрева изделия зависят от многих факторов: нагревающей способности среды; размеров и формы деталей; характера их расположения в печи; от химического состава стали и т. п. Цель отжига зависит от вида отжига.

Различают отжиг *первого* и *второго* рода.

Отжиг *первого рода* в зависимости от исходного состояния стали и температуры нагрева включает в себя процессы:

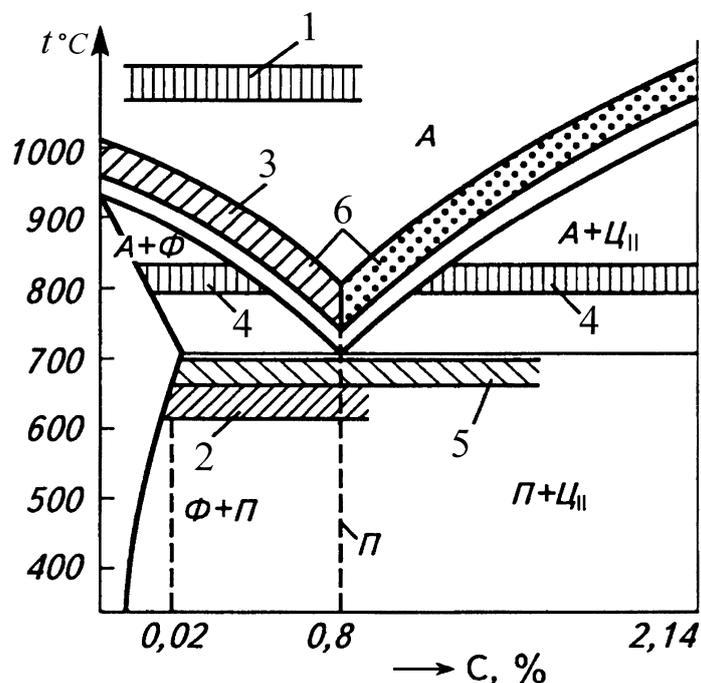
- диффузионный отжиг (гомогенизация);
- рекристаллизационный отжиг;
- отжиг для снятия остаточных внутренних напряжений.

Особенность отжига первого рода в том, что указанные процессы происходят независимо от того, протекают ли при этом отжиге в стали фазовые (полиморфные) превращения или нет.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) характеризуется нагревом до температуры значительно выше температур интервала превращений (выше A_{c3} на 150–300 °С, 1100–1150 °С), длительной выдержке при данной температуре (12–15 ч.) и последующим медленным охлаждением (рисунок 2).

Такой отжиг применяют для выравнивания химической неоднородности путём диффузии в крупных стальных отливках и слитках, в основном легированной стали.

Рекристаллизационному отжигу (рисунок 2) подвергают сталь после холодной пластической деформации, в результате которой происходит дробление зёрен, образование волокнистого строения (текстуры), увеличение количества дефектов кристаллического строения (точечных и линейных). Такое изменение в структуре стали приводит к значительному повышению твёрдости и снижению пластичности.



1 – диффузионный отжиг (гомогенизация); 2 – рекристаллизационный отжиг; 3 – полный отжиг; 4 – неполный отжиг; 5 – изотермический отжиг; 6 – нормализация

Рисунок 2 – Области температур нагрева основных видов ТО углеродистых сталей

Структура такой стали становится неравновесной и при нагреве происходят обратные явления: вытянутые зёрна становятся равноосными, мелкие зёрна поглощаются более крупными, резко снижается прочность и твёрдость стали, а её пластичность повышается.

Процесс устранения наклёпа при нагреве стали называют **рекристаллизацией**. Установлена зависимость между температурой рекристаллизации и температурой плавления металлов: $t_{\text{рекр}} = 0,4 t_{\text{пл}}$.

Явление повышения твёрдости и снижения пластичности металлов и сплавов вследствие холодной пластической деформации называется **наклёпом**, или **нагартовкой**.

Деформация может быть холодной и горячей. Холодная деформация производится ниже температуры рекристаллизации и сопровождается наклёпом металла. Горячая деформация осуществляется при температурах выше температуры рекристаллизации.

Есть металлы, которые при комнатной температуре не подвергаются наклёпу и испытывают горячую деформацию. Примером является свинец, имеющий температуру рекристаллизации ниже комнатной температуры. Для молибдена, имеющего температуру рекристаллизации около 900 °С, деформация при нагреве до 800 °С ещё является холодной деформацией.

Отжигу для снятия остаточных внутренних напряжений подвергают отливки, сварные изделия, детали после обработки резанием, правки и т. д., в которых возникают внутренние (остаточные) напряжения.

Для полного или частичного снятия остаточных напряжений чаще применяют отжиг при 550–650 °С. Время выдержки составляет несколько часов и устанавливается опытным путём.

Отжиг **второго рода** заключается в нагреве стали выше критической точки A_{c1} или A_{c3} , выдержке при этих температурах и последующем медленном охлаждении.

В процессе нагрева и охлаждения, в этом случае, протекают фазовые превращения ($\alpha \leftrightarrow \gamma$ – превращение), определяющие структуру и свойства стали.

При таком отжиге в результате фазовых превращений образуются следующие равновесные структуры: феррит + перлит, у *доэвтектоидных* сталей; перлит, у *эвтектоидной*; перлит + цементит, у *заэвтектоидных*.

- Различают: – полный;
– неполный;
– изотермический отжиг.

Наибольшее распространение получил *полный отжиг* (рисунок 2), осуществляемый при нагреве доэвтектоидной стали на 30–50 °С выше критической точки A_{c3} или в нагреве эвтектоидной стали на 30–50 °С выше критической точки A_{c1} , выдержке при этих температурах и медленном охлаждении.

При таком отжиге происходит полная фазовая перекристаллизация стали.

Полному отжигу подвергают стальные фасонные отливки с содержанием углерода 0,1–0,5%. Они имеют крупнозернистую структуру и низкие механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность. Такой отжиг значительно повышает прочность, вязкость и пластичность литой стали. Полный отжиг применяется так же для исправления структуры стали после её перегрева.

Неполный отжиг (рисунок 2) характеризуется нагревом до одной из температур в интервале фазовых превращений, т. е. для доэвтектоидной стали – между критическими точками A_{c1} и A_{c3} , а для заэвтектоидной стали – между критическими точками A_{c1} и A_{cm} .

Неполный отжиг применяют в основном для заэвтектоидных сталей, нагрев которых выше точки A_{c1} на 30–50 °С вызывает полную перекристаллизацию металлической основы, а охлаждение – *структуру зернистого перлита*, в котором эвтектоидный цементит (входящий в состав перлита) и вторичный цементит находятся в виде зёрен.

В результате неполного отжига получается зернистая (сферическая, глобулярная) форма цементита, поэтому такой отжиг называют отжиг сфероидизирующий (отжиг на зернистый перлит).

Изотермический отжиг (рисунок 2) заключается в нагреве доэвтектоидной стали выше критической точки A_{c3} или эвтектоидной стали выше критической точки A_{c1} на 30–50 °С, выдержке при этих температурах, охлаждении её до температуры несколько ниже критической точки A_{r1} , изотермической выдержке для полного завершения распада аустенита с образованием перлита в эвтектоидной стали или феррита и перлита в доэвтектоидной стали с последующим охлаждением на воздухе.

Изотермический отжиг применяют в основном для легированных сталей. Преимущество изотермического отжига заключается в сокращении длительности технологического цикла.

Нормализация – разновидность отжига, заключается в нагреве доэвтектоидной стали на 50–60 °С выше A_{c3} , а заэвтектоидной – на 50–60 °С выше A_{cm} (линия ES), выдержке и последующем охлаждении на воздухе. Нормализация широко применяется для улучшения свойств стальных отливок.

Структура стали после нормализации так же, как и при отжиге, находится в равновесном состоянии:

у доэвтектоидной – феррит + перлит;

эвтектоидной – перлит;

заэвтектоидной – перлит + цементит.

В сравнении с отжигом структура стали более мелкодисперсна, а механические свойства более высокие (повышенная прочность и твёрдость).

По сравнению с отжигом нормализация более экономичный процесс (нет операции охлаждения металла вместе с печью), который широко применяют в практике и часто используют как окончательный вид термической обработки.

Назначение нормализации различно и зависит от состава стали. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. При повышении твердости нормализация обеспечивает большую производительность при обработке резанием и получение более чистой поверхности.

Для отливок из среднеуглеродистой стали нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска. В этом случае механические свойства несколько ниже, но детали будут подвергнуты меньшей деформации, чем при закалке, и вероятность появления трещин практически исключается.

Нормализацию с высоким отпуском (600–650 °С) часто используют для исправления структуры легированных сталей вместо полного отжига, так как производительность и трудоёмкость этих двух операций выше, чем одного отжига.

4 ЗАКАЛКА

Закалка – это процесс термической обработки, заключающийся в нагреве стали до температуры выше критической, выдержке при этой температуре и охлаждении со скоростью, обеспечивающей получение неравновесной структуры. В большинстве случаев охлаждение при закалке проводят со скоростью больше критической для получения неравновесной структуры мартенсита.

Цель закалки – повышение твёрдости, прочности и износостойкости деталей и инструмента.

Структура стали после закалки зависит от скорости охлаждения аустенита. При интенсивном охлаждении образуется структура мартенсита. При более низких скоростях охлаждения – троостит и сорбит, представляющие собой механическую смесь феррита и цементита. От степени дисперсности смеси зависят механические свойства стали.

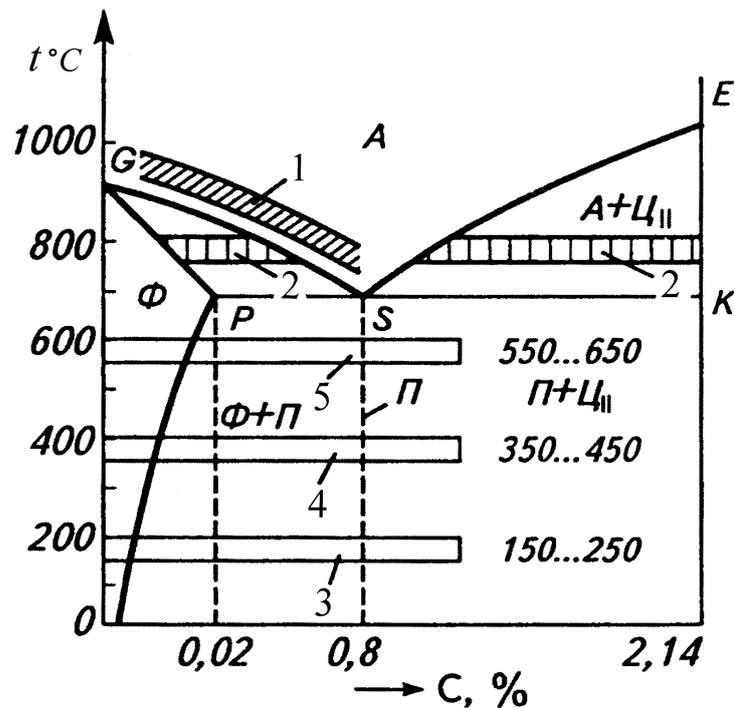
Структура троостита более мелкодисперсна. Твёрдость и прочность стали, закалённой на троостит, выше, чем у стали с сорбитной структурой, а пластичность выше у стали, закалённой на сорбит.

По температуре нагрева закалку подразделяют на *полную* и *неполную*.

При полной закалке исходная структура полностью превращается в аустенит, при неполной – частично.

Температуру нагрева для закалки углеродистых сталей выбирают по диаграмме состояния железо—цементит (рисунок 3).

Для доэвтектоидных и эвтектоидных сталей применяют полную закалку (рисунок 3, позиция 1), при которой стали нагревают до температуры на 30–50 °С выше линии GS (A_{c3}).



1 – полная закалка; 2 – неполная закалка; 3 – низкий отпуск;
4 – средний отпуск; 5 – высокий отпуск

Рисунок 3 – Интервалы температур нагрева для закалки и отпуска стали

При неполной закалке доэвтектоидной стали (рисунок 3, позиция 2) нагрев производят до температур в интервале между линиями PSK и GS (A_{c1} и A_{c3}). При этом исходная структура стали переходит в структуру аустенита и феррита. При последующей закалке структура стали будет состоять из мартенсита и феррита. Наличие феррита значительно снижает твердость, износостойкость и ударную вязкость закаленной стали, поэтому такой вид закалки для данных сталей применять нежелательно.

Для заэвтектоидных сталей применяют неполную закалку (рисунок 4, позиция 2) нагревая их до температуры на $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$ выше линии PSK (A_{c1}).

При таком нагреве исходная структура превращается в аустенит и вторичный цементит. После охлаждения аустенит превращается в мартенсит.

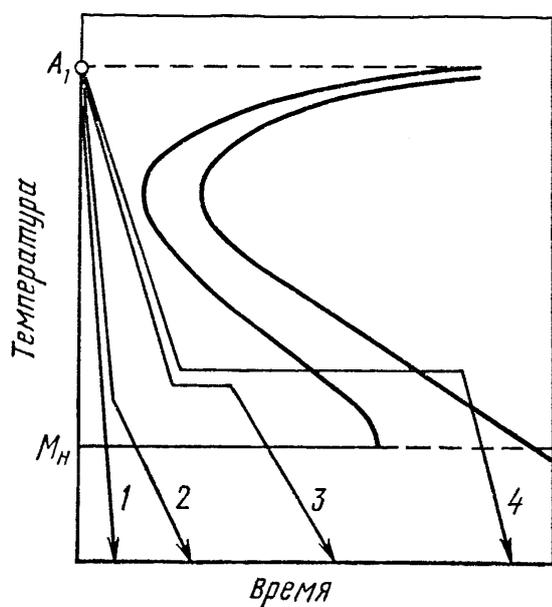
Структура заэвтектоидной стали после закалки состоит из мартенсита и вторичного цементита. Сохранение в структуре закаленной стали вторичного цементита значительно повышает ее твёрдость и износостойкость.

Фасонный инструмент и детали машин сложных форм при нагреве под закалку для уменьшения деформации рекомендуется предварительно подогреть в печи при 400–600 °С.

После закалки обязательно проводят низкий, средний и высокий отпуск, температурные интервалы которых показаны на рисунке 3, позиции 3,4,5.

ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ЗАКАЛКИ

Закалку в одном охладителе (рисунок 4, кривая 1) наиболее широко применяют на практике и главным образом для деталей простых форм. Деталь нагревают до температуры закалки и охлаждают в одном охладителе. При местной закалке в охлаждающую среду погружают только ту часть детали, которую нужно закалить.



- 1 – закалка в одном охладителе;
- 2 – закалка в двух средах;
- 3 – ступенчатая закалка;
- 4 – изотермическая закалка

Рисунок 4 – Кривые охлаждения при различных способах закалки, нанесённые на диаграмму изотермического распада аустенита

Недостаток закалки в одном охладителе (особенно в воде) – возникновение значительных внутренних напряжений, которые могут вызвать появление трещин.

При **закалке в двух средах (прерывистая закалка)** (рисунок 5, кривая 2) детали нагревают обычным способом и охлаждают с необходимой скоростью до температуры, лежащей несколько выше начала мартенситного превращения (M_n). Затем их быстро переносят в менее интенсивный охладитель, где и выдерживают до полного охлаждения. Таким образом, превращение аустенита в мартенсит протекает сравнительно медленно, что способствует уменьшению внутренних напряжений и деформаций. Такой способ закалки часто применяют для инструмента из углеродистой стали.

Ступенчатую закалку (рисунок 4, кривая 3) производят также в две стадии. Нагретое изделие быстро переносят в ванну с температурой не ниже M_n , где и выдерживают некоторое время. После этого изделие охлаждают в масле или на воздухе. Время выдержки в ванне должно обеспечивать выравнивание температуры по всему сечению изделия, но не должно вызывать распада аустенита. Этот способ применяют для закалки деталей из легированных сталей, а также деталей небольших сечений (до 10 мм) из углеродистых сталей. Недостаток этого метода в том, что горячие, медленно охлаждающиеся среды не позволяют получить необходимые скорости охлаждения для крупных деталей.

Изотермическую закалку (рисунок 4, кривая 4), предложенную Д. К. Черновым, довольно широко применяют на практике. Так же как и при ступенчатой закалке, распад аустенита происходит при постоянной температуре не ниже M_n при выдержке в изотермической ванне (обычно соляной). После выдержки детали охлаждают на воздухе. В результате распада аустенита образуется игольчатый троостит, имеющий твердость HRC 45–55 и достаточную пластичность. Изотермическую закалку целесообразно применять для деталей, склонных к короблению и образованию трещин.

При **закалке с самоотпуском** охлаждение изделия, нагретого под закалку, ведут не до конца. За счёт тепла внутренних слоёв детали верхний, охлаждённый слой разогревается до 200–260 °С, в результате чего происходит самоотпуск. Закалку с самоотпуском применяют для зубил, кувалд, слесарных молотков и другого ударного инструмента, который должен иметь достаточно высокую твердость на поверхности и сравнительно вязкую сердцевину.

Поверхностную закалку применяют, когда деталь должна работать при переменных нагрузках, при значительном трении, когда надо получить твердую поверхность детали при мягкой сердцевине. Для этого закаливают только поверхностный слой на глубину 0,1–2 мм.

Существует несколько способов нагрева изделий под закалку: кислородно-ацетиленовым пламенем, в электролитах, током промышленной и высокой частоты.

НАГРЕВАЮЩИЕ И ОХЛАЖДАЮЩИЕ СРЕДЫ

Выбор среды для нагрева при термической обработке. При нагреве в пламенных или электрических печах взаимодействие печной атмосферы с поверхностью нагреваемого изделия приводит к окислению и обезуглероживанию стали.

Для предохранения изделий от окисления и обезуглероживания в рабочее пространство печи вводят защитную газовую среду (контролируемые атмосферы). Чаще применяют эндотермическую атмосферу – условное обозначение КГ-80 (21 % CO; 40 % H₂; 2 % CH₄, 37 % N₂) с частичным сжиганием метана (природного газа) при $\alpha = 0,25$ в присутствии катализатора. Рекомендуется при нагреве под закалку конструкционных и инструментальных легированных сталей.

В последние годы все шире применяют нагрев в вакууме (обычно 10–10⁻¹ Па, но иногда до 10⁻²–10⁻⁴ Па), особенно для коррозионностойких, жаропрочных, электротехнических и специальных сталей и сплавов.

Режущие инструменты, а также детали машин небольших размеров чаще нагревают в расплавленных солях. При правильном выборе состава и тщательном раскислении ванн в них обеспечивается хорошая защита от окисления и обезуглероживания. Для таких ванн обычно используют хлористые соли, чаще 70 % BaCl₂ и 30 % NaCl и др.

Охлаждающие среды для закалки. Охлаждение при закалке должно обеспечивать получение структуры мартенсита в пределах заданного сечения изделия (определенную прокаливаемость) и не должно вызывать закалочных дефектов: трещин, деформаций, коробления и высоких растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях.

Скорость охлаждения выше критической скорости закалки должна быть в интервале температур $A_{r1} - M_n$ для подавления распада переохлажденного аустенита в области перлитного и промежуточного превращений и замедленного охлаждения в интервале температур мартенситного превращения $M_n - M_k$. Высокая скорость охлаждения в мартенситном интервале температур нежелательна, так как ведёт к резкому увеличению уровня остаточных напряжений и даже к образованию трещин.

Чаще для закалки используют кипящие жидкости – воду, водные растворы солей и щелочей, масла. При закалке в этих средах различают три периода:

1 Плёночное кипение, когда на поверхности стали образуется «паровая рубашка». В этот период (до 500–400 °С) скорость охлаждения сравнительно невелика;

2 Пузырьковое кипение (400–100 °С), наступающее при полном разрушении паровой пленки. В этот период происходит быстрый отвод тепла;

3 Конвективный теплообмен, который отвечает температурам ниже температуры кипения охлаждающей жидкости. Теплоотвод в этот период происходит с наименьшей скоростью.

При закалке углеродистой и некоторых низколегированных сталей, имеющих малую устойчивость переохлажденного аустенита, в качестве охлаждающей среды применяют воду и водные растворы NaCl или NaOH.

Вода как охлаждающая среда имеет существенные недостатки: высокая скорость охлаждения в области температур мартенситного превращения нередко приводит к образованию закалочных дефектов; с повышением температуры резко ухудшается закалочная способность.

Наиболее высокой и равномерной охлаждающей способностью отличаются холодные 8–12 %-ные водные растворы NaCl и NaOH, которые хорошо зарекомендовали себя на практике.

Легированные стали, обладающие высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, закалывают в масле; применяют минеральное масло (чаще нефтяное).

Преимуществом масла как закалочной среды является небольшая скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения, что снижает возможность возникновения закалочных дефектов. К недостаткам масла как охлаждающей среды следует отнести повышенную воспламеняемость (температура вспышки 165–300 °С), недостаточную стабильность и низкую охлаждающую способность в области температур перлитного превращения, а также повышенную стоимость его.

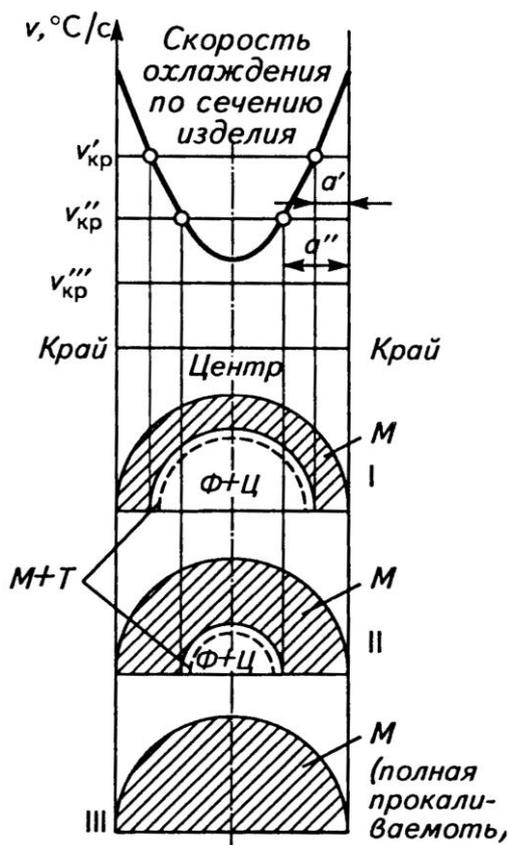
Температуру масла следует поддерживать в пределах 60–90 °С (при этом вязкость масла оказывается минимальной).

Для снижения коробления деталей сложной формы при закалке в масле применяют охлаждение в штампах или в специальных приспособлениях.

ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ И ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛИ

Основными технологическими свойствами, характеризующими процесс закалки стали, являются *закаливаемость* – способность стали повышать твердость в результате закалки и *прокаливаемость* – способность стали получать закаленный слой с мартенситной или трооститно-мартенситной (50 % М + 50 % Т) структурой и высокой твердостью на ту или иную глубину.

Прокаливаемость определяется *критическим диаметром* – максимальным диаметром прутка, закаливающегося насквозь в данном охладителе, т. е. получающего высокую твердость, а после отпуска и высокие механические свойства по всему сечению. Таким образом, для каждой охлаждающей среды данная сталь имеет свой критический диаметр. На рисунке 5 показано, что скорость охлаждения по сечению закаливаемой детали распределяется неравномерно.



a' и a'' – глубина закалённого слоя при разных скоростях закалки;
 $V'_{\text{кр}}$, $V''_{\text{кр}}$, $V'''_{\text{кр}}$ – критическая скорость закалки соответственно углеродистой, низко- и высоколегированной сталей;
 $\Phi + \text{Ц}$ – ферритно-цементитная структура (троостит, сорбит или перлит);
 I, II, III – поперечные сечения образцов соответственно углеродистой, низко- и высоколегированной сталей

Рисунок 5 – Зависимость прокаливаемости стали от критической скорости закалки

Сталь с критической скоростью закалки $V_{\text{кр}}$ будет прокаливаться на глубину a' . Структура прутка от поверхности к центру изменяется так: М, М + Т, Т, исходная.

Аналогично изменяется твёрдость. Для сталей с более низкой критической скоростью закалки ($V''_{\text{кр}}$) прокаливаемость будет выше, а при $V_{\text{кр}} \geq V'''_{\text{кр}}$ – сквозной.

Легирование, особенно хромом, молибденом и марганцем, увеличивает прокаливаемость стали, что имеет большое значение для получения однородных свойств по всему сечению детали. Это обусловлено стабилизацией аустенита, снижением критической скорости закалки.

У стали с глубокой прокаливаемостью твёрдость по сечению снижается медленно, с малой – резко.

Диаграммы изотермического распада аустенита позволяют судить о прокаливаемости стали: чем меньше критическая скорость закалки, т. е. чем выше устойчивость переохлажденного аустенита, тем выше прокаливаемость стали. Так, критический диаметр углеродистой, хромистой и хромоникелевой стали после закалки в одних и тех же условиях соответственно равен 25, 50, 125 мм. Некоторые высоколегированные стали имеют очень низкую критическую скорость закалки, и в них может образоваться мартенсит даже при охлаждении на воздухе.

5 ОТПУСК

Операция термической обработки, при которой путём нагрева *предварительно закалённой* стали *ниже* критической точки A_{C1} , выдержке и последующего охлаждения на воздухе называется ***отпуском*** стали. При этом неустойчивые структуры мартенсита и аустенита, полученные при закалке, превращаются в более устойчивые и происходит снижение внутренних (остаточных) напряжений и изменение механических свойств.

В зависимости от температуры нагрева различают три вида отпуска (рисунок 3).

1 ***Низкий*** отпуск проводят при нагреве до 150–250 °С. Структура – отпущенный мартенсит.

Предназначен для частичного снятия внутренних напряжений при сохранении высокой твёрдости и износоустойчивости. Применяется, главным образом, для обработки режущего инструмента.

2 ***Средний*** или умеренный отпуск, осуществляется в интервале температур 350–450 °С. Структура – троостит отпуска.

Способствует некоторому снижению твёрдости и повышению вязкости стали. Применяется при ТО пружин, штампов, ударного инструмента и т. п.

3 ***Высокий*** отпуск проводят при 550–650 °С. Структура – сорбит отпуска.

Высокий отпуск почти полностью снимает внутренние напряжения и значительно повышает ударную вязкость. Создаёт наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.

Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется ***улучшением***.

Улучшению подвергают конструкционные стали, содержащие 0,3–0,5 % углерода.

Некоторые сорта сталей, особенно специальные, при медленном охлаждении после отпуска с температуры выше 450 °С приоб-

ретают так называемую *отпускную хрупкость*, которая заключается в понижении ударной вязкости. Для предупреждения отпускной хрупкости после высокого отпуска изделия необходимо быстро охладить в воде или масле.

ОБРАБОТКА ХОЛОДОМ

В закалённой стали, особенно содержащей более 0,4–0,5 % углерода, всегда присутствует остаточный аустенит, так как конец мартенситного превращения находится в области отрицательных температур.

Аустенит снижает твёрдость, износостойкость и нередко приводит к изменению магнитных свойств и размеров деталей, работающих при низких температурах, в результате самопроизвольного превращения в мартенсит.

Для уменьшения количества остаточного аустенита применяют обработку холодом, заключающуюся в охлаждении закалённой стали до отрицательных температур. Понижение температуры до минус 30–70 °С вызывает превращение остаточного аустенита в мартенсит, что повышает твёрдость сталей. Однако одновременно возрастают напряжения, поэтому охлаждение производят медленно и сразу после обработки холодом выполняют отпуск.

Обработку холодом производят сразу же после закалки, так как выдержка закалённой стали более 3–6 ч при нормальной температуре стабилизирует аустенит и он затем не полностью превращается в мартенсит, а следовательно, снижается эффект обработки холодом.

Обработку холодом производят в специальных установках, создающих отрицательную температуру, чаще всего в пределах от -75 до -195 °С.

Холодом обрабатывают измерительный инструмент, некоторые пружины, детали из цементуемых легированных сталей, сохраняющих много аустенита после закалки.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Термомеханической обработкой называют процесс, состоящий из нагрева стали до температуры выше A_{c3} , пластической деформации аустенита и последующего его превращения с целью получения (чаще всего) мартенситной структуры.

Наиболее распространено подразделение термомеханической обработки по температурному интервалу деформации аустенита. При температуре выше порога рекристаллизации проводят высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО), а при температуре ниже порога рекристаллизации – низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО).

Деформация стали при ВТМО осуществляется при температуре, соответствующей области устойчивого аустенита (выше критической точки A_{c3}), а деформация при НТМО – в температурной области метастабильного аустенита (ниже критической точки A_{c1} , но выше точки мартенситного превращения M_n) (рисунок 6).

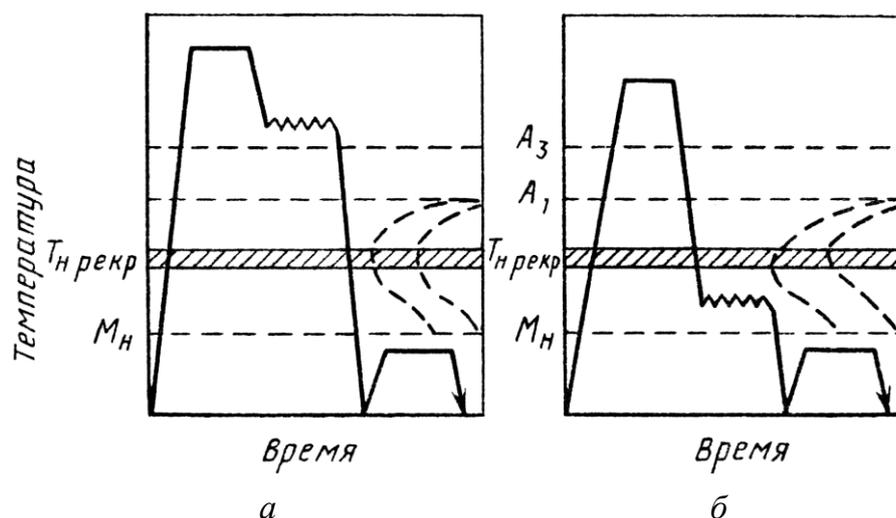


Рисунок 6 – Принципиальная схема упрочнения сталей методами термомеханической обработки:
a – ВТМО; *б* – НТМО

ВТМО можно подвергать любые стали, а НТМО только стали с повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита. По сравнению с обычной закалкой после термомеханической обработки прочность повышается на 10–20 %, а ударная вязкость – в 1,5–2 раза. Эффект термомеханической обработки зависит от состава стали, температуры и степени деформации и режима термической обработки (закалка и отпуск).

Повышение механических свойств стали в результате термомеханической обработки объясняют тем, что при пластическом деформировании (наклёп) аустенита создаётся мелкоблочное строение. При последующем быстром охлаждении измельчённый при наклёпе аустенит превращается в мартенсит тонкого строения.

ДЕФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Недогрев возникает, если сталь была нагрета ниже критической температуры. Например, если доэвтектоидную сталь нагреть до температуры немного ниже A_{c3} , то часть феррита останется не превращённой в аустенит. После быстрого охлаждения аустенит превратится в мартенсит, а феррит сохранится в закалённой стали. В результате структура будет состоять из мартенсита и феррита. Феррит, имеющий низкую твёрдость, будет снижать общую твёрдость закаленной стали. Этот дефект можно исправить повышением температуры печи.

Перегрев возникает, если сталь была нагрета намного выше критической температуры или при оптимальной температуре нагрева была дана очень большая выдержка.

Перегрев при отжиге приводит к росту зёрен, а при сильном перегреве образуется так называемая видманштеттова структура с характерной пластинчатой формой ферритных участков, расположенных под углом друг к другу.

В результате перегрева при закалке образуется крупноигльчатый мартенсит. Механические свойства перегретой стали низкие. Исправить перегрев, возникший при отжиге, можно нормализацией. Сталь, перегретую при закалке, отжигают и вновь закалывают.

Пережог возникает, если сталь была нагрета близко к температуре начала плавления. Пережог характеризуется оплавлением и в связи с этим окислением металла по границам зёрен. Сталь становится очень хрупкой. Пережог исправить нельзя.

Окисление и обезуглероживание стали при нагреве – результат взаимодействия её с газами, содержащимися в печах (кислород, водород, углекислый газ). Окисление характеризуется образованием на поверхности детали окалина, а обезуглероживание — выгоранием углерода в поверхностных слоях детали с образованием структур феррита. Окалина, кроме невозвратной потери металла, приводит к неравномерной твёрдости деталей и вызывает необходимость дополнительной обработки. В результате обезуглероживания резко снижаются твёрдость на поверхности деталей и выносливость.

Лучшее средство, предохраняющее от окисления и обезуглероживания, – нагрев в специальных печах с нейтральным по отношению к стали газовым составом.

Закалочные трещины чаще всего возникают при слишком резком охлаждении и нагревании стали.

Для борьбы с закалочными трещинами используют равномерный нагрев и равномерное охлаждение детали; применяют закалки, которые обеспечивают мед-

ленное охлаждение в интервале мартенситного превращения (ступенчатая, изотермическая, закалка в двух средах).

Коробление возникает из-за неравномерного охлаждения отдельных частей детали. На коробление значительно влияют форма детали и способ погружения детали в охлаждающую среду.

Для борьбы с короблением необходимо правильно выбирать режим закалки (температура нагрева, скорость и способ охлаждения), применять закалку в закалочных штампах.

Мягкие пятна образуются из-за недогрева или недостаточно интенсивного охлаждения. Иногда мягкие пятна появляются из-за неоднородности исходной структуры (скопления феррита). В этих местах при нагреве может получиться аустенит с малой концентрацией углерода. Здесь даже при правильно проведенной закалке твердость будет пониженной. Этот дефект можно устранить проведением нормализации перед закалкой. Нормализация создает более однородную структуру.

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Особенности термической обработки этих сталей определяются, главным образом, влиянием легирующих элементов на положение критических точек диаграммы состояния железо–цементит и на характер изотермического превращения аустенита.

Легирующие элементы влияют на эвтектоидную температуру (точка A_1), содержание углерода в перлите (точка S) и максимальное содержание углерода в аустените (точка E).

Элементы (Cr, W, Mo, V и др.), сужающие γ -область, повышают критическую точку A_1 , а элементы (Ni, Mn и др.), расширяющие γ -область, понижают критическую точку A_1 .

Все легирующие элементы сдвигают точку S влево, что приводит к снижению содержания углерода в легированном перлите. Легирующие элементы, особенно Ni и Mn, сдвигают влево точку E на диаграмме состояния железо–цементит.

Легирующие элементы значительно влияют на изотермическое превращение аустенита. Все легирующие элементы, за исключением кобальта, сдвигают C-образные кривые диаграммы изотермического превращения аустенита вправо, значительно увеличивают устойчивость и замедляют процесс распада аустенита. При этом одни элементы (Ni, Si, Mn и др.), сдвигая C-образные кривые вправо и увеличивая устойчивость аустенита, не влияют на характер изотермических кривых, которые имеют C-образную форму, как и для углеродистой стали (рисунок 7, а).

Карбидообразующие элементы (Cr, W, Mo, V, Ti и др.) сдвигают кривые начала и конца изотермического распада аустенита вправо, замедляют его распад и одновременно изменяют вид этих кривых (рисунок 7 б).

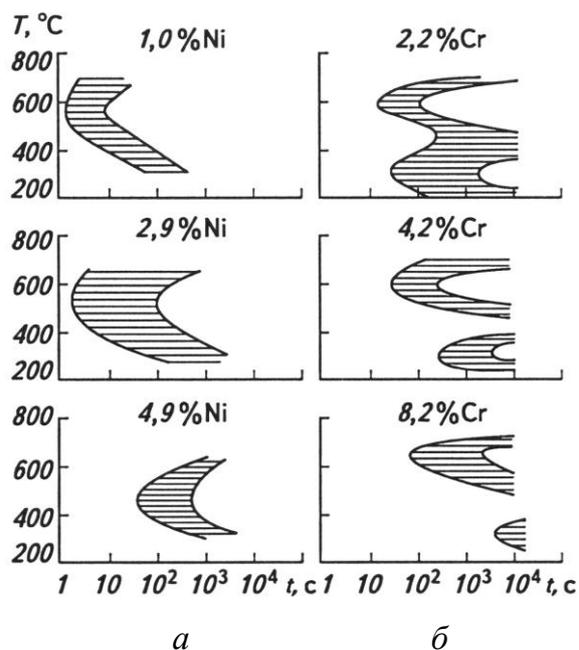


Рисунок 7 – Диаграммы изотермического превращения аустенита для стали с содержанием 0,5 % С

Все легирующие элементы (за исключением кобальта), увеличивая устойчивость аустенита, значительно повышают критическую скорость закалки, и тем в большей степени, чем дальше сдвинуты вправо кривые изотермического превращения аустенита.

Легированные стали обычно закаливают в масле.

С увеличением устойчивости аустенита и уменьшением критической скорости закалки увеличивается глубина прокаливаемости.

Большинство легирующих элементов (Mn, Ni, Cr и др.) понижают температуру начала мартенситного превращения (рисунок 8, а) и увеличивают количество остаточного аустенита (рисунок 8, б). Кобальт и алюминий повышают температуру начала мартенситного превращения.

Если температура начала мартенситного превращения снижается до нуля, то такая сталь при комнатной температуре имеет аустенитную структуру.

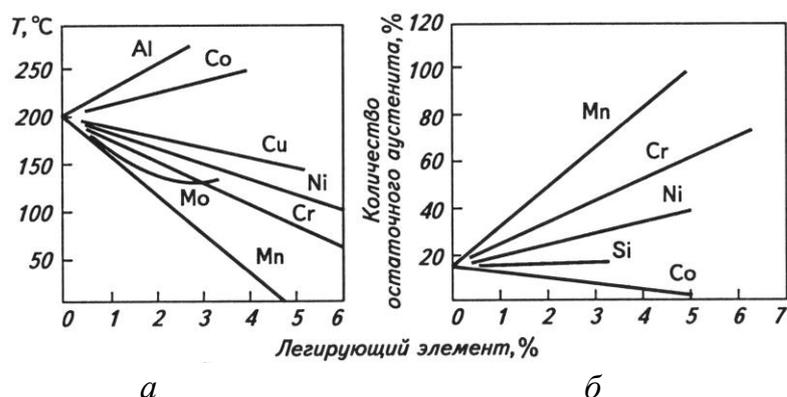


Рисунок 8 – Влияние легирующих элементов на температуру начала мартенситного превращения (а) и количество остаточного аустенита (б) в стали с содержанием 1 % С

Таблица 1 – Протокол результатов термической обработки углеродистой стали

| Марка стали | Диаметр отпечатка, мм | Исходное состояние | | | Закалка | | | | | Отпуск | | | Нормализация | | | | |
|-------------|-----------------------|--------------------|-----|-----------|---------|------------|-----------|-----|-----------|--------|-----------|-----|--------------|------|-----------|-----|-----------|
| | | Твёрдость | | Структура | t °C | Время, мин | Твёрдость | | Структура | t °C | Твёрдость | | Структура | t °C | Твёрдость | | Структура |
| | | НВ | НRC | | | | НВ | НRC | | | НВ | НRC | | | НВ | НRC | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Оськин В. А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. для вузов. /В. А. Оськин, В. В. Евсиков. – М. : КолосС, 2007. – Кн.1. – 447 с.
- 2 Материаловедение / Б. Н. Арзамасов [и др.]; под ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 646 с.
- 3 Практикум по материаловедению и технологии конструкционных материалов / В. А. Оськин [и др.]; под ред. В. А. Оськина, В. Н. Байкаловой. – М. : КолосС, 2007. – 318 с.

Учебное издание

**Агафонов Сергей Викторович
Охотин Михаил Васильевич**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

Учебно-методическое пособие

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР №070444 от 11.03.98 г.
Подписано в печать XX.XX.XX. Формат 60x84/16
Усл. печ. л. 1,6 Тираж 50

Издательство Иркутского государственного аграрного университета
имени А.А. Ежевского
664038, Иркутская обл., Иркутский р-н, пос. Молодежный