

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
СЫКТЫВКАРСКИЙ ЛЕСНОЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ С. М. КИРОВА»

КАФЕДРА ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

И. В. Боровушкин

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Методическое руководство к лабораторным и практическим занятиям по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» для студентов специальностей 150400, 150405, 190601, 190603, 110301, 110302, 240406, 250401, 250403 всех форм обучения

Самостоятельное учебное электронное издание

СЫКТЫВКАР 2009

УДК 621.7
ББК 34.327
Б83

Рассмотрено и рекомендовано к изданию в электронном виде кафедрой общетехнических дисциплин Сыктывкарского лесного института 31 января 2009 г. (протокол № 5).

Утверждено к опубликованию в электронном виде методической комиссией лесотранспортного факультета Сыктывкарского лесного института 28 января 2009 г. (протокол № 5).

Рецензенты:

С. И. Морозов, доцент, кандидат технических наук;
Л. В. Шильников, начальник технологического отдела
(ООО «Ремонтно-механический завод»)

Б83 **Боровушкин И. В.**
ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ [Электронный ресурс] : метод. руководство к лабораторным и практическим занятиям по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» для студентов спец. 150400, 150405, 190601, 190603, 110301, 110302, 240406, 250401, 250403 всех форм обучения / И. В. Боровушкин ; Сыкт. лесн. ин-т. – Электрон. дан. (1 файл в формате pdf : 1,2 Мб). – Сыктывкар : СЛИ, 2009. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. Доступен также на дискетах. – Систем. требования для дискет: Acrobat Reader (любая версия). – Загл. с экрана.

УДК 621.7
ББК 34.327

Издание предназначено для студентов всех форм обучения специальностей 150400, 150405, 190601, 190603, 110301, 110302, 240406, 250401, 250403, изучающих дисциплину «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». Приведена теоретическая часть по теме, определен порядок работы. Для самоподготовки даны контрольные вопросы и рекомендована литература.

Темплан 2008/09 учеб. г. Изд. № 223.

© И. В. Боровушкин, 2009
© СЛИ, 2009

Самостоятельное учебное электронное издание

Боровушкин Игорь Владимирович, профессор, кандидат технических наук, доцент

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Методическое руководство к лабораторным и практическим занятиям по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» для студентов специальностей 150400, 150405, 190601, 190603, 110301, 110302, 240406, 250401, 250403 всех форм обучения

Электронный формат – pdf
Разрешено к публикации 19.06.09. Объем 1,2 уч.-изд. л., 1,2 Мб

Сыктывкарский лесной институт – филиал
государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия имени С. М. Кирова» (СЛИ)
167982, г. Сыктывкар, ул. Ленина, 39
institut@sfi.komi.com, www.sli.komi.com

Редакционно-издательский отдел СЛИ. Заказ № 27.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ	4
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	4
2.1. Отжиг	4
2.2. Закалка	8
2.3. Отпуск	12
3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	14
3.1. Задание по практической и лабораторной работе	14
3.2. Обеспечивающие средства	14
3.3. Методика выполнения работы	14
3.4. Требования к отчету	16
3.5. Контрольные вопросы	16
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	18

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью работы является изучение термической обработки сталей как средства изменения структуры и свойств заготовки или детали.

Задачи работы:

1. Изучить виды термической обработки сталей, их назначение и технологию выполнения.
2. Выбрать оптимальную температуру закалки углеродистой конструкционной стали 45, применяя метод пробных закалок.
3. Выбрать необходимую для закалки стали 45 охлаждающую среду.
4. Исследовать влияние температуры отпуска на твердость закаленной стали 45.
5. Дать рекомендации по применению той или иной термообработки для режущего инструмента, для пружин, для ответственных деталей машин и конструкций, работающих в районах Крайнего Севера.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Термическая обработка является одним из наиболее эффективных и экономичных методов изменения механических и физических свойств сталей в желаемом направлении. Широкое использование термической обработки обусловлено ее неоспоримыми преимуществами перед другими методами подобного назначения.

1. Термическая обработка отличается простотой технологии и оборудования. Для ее осуществления требуется лишь нагрев детали до температуры, обеспечивающей протекание структурно-фазовых превращений в заранее заданном направлении, выдержка при регламентированной температуре до окончания запланированных превращений и охлаждение с определенной скоростью, гарантирующей получение структуры с требуемыми конечными свойствами.

2. Термическая обработка стали обеспечивает возможность получения самого разнообразного сочетания физико-механических свойств без изменения химического состава стали. Например, предел прочности стали 40 может измениться в два раза (от 600 до 1350 МПа), твердость – в пять раз (от 130 до 630 НВ), относительное удлинение – в 10 раз (от 30 до 3 %). Для столь существенного изменения свойств необходимо разнообразить лишь режим термической обработки по максимальной температуре нагрева и скорости охлаждения.

В зависимости от конкретных технологических задач и требуемого направления изменения свойств обычно используют простую (отжиг) или сложную (закалка + отпуск) термическую обработку.

2.1. Отжиг

Отжиг обеспечивает значительное повышение пластичности и снижение твердости и прочности. Поэтому он широко используется в качестве предвари-

тельной операции, производимой после отливки,ковки,штамповки и т. п., с целью подготовки структуры к механической обработке или закалке.

Отжиг стали включает в себя три последовательных этапа.

1) Нагрев до температуры аустенизации (на 20–30 °С выше критической точки A_{c3} для доэвтектоидной стали и выше A_{c1} для заэвтектоидной стали (см. заштрихованную область на рис. 1)).

2) Выдержка при температуре аустенизации.

3) Медленное охлаждение, как правило, вместе с печью.

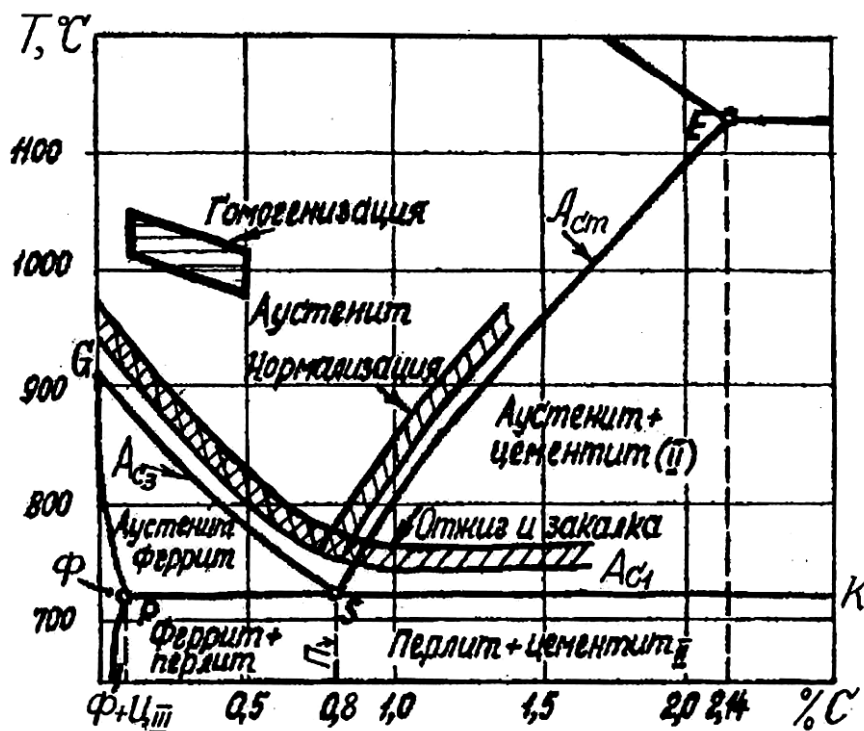


Рис. 1. Области температур аустенизации при закалке, отжиге и нормализации сталей

При нагреве и выдержке сталей выше 727 °С (A_{c3}) происходит процесс аустенизации. В доэвтектоидной стали процесс аустенизации идет в два этапа:

- 1) превращение перлита (П) в аустенит (А) ($\text{П} \rightarrow \text{А}$);
- 2) растворение феррита в аустените.

В заэвтектоидной стали аустенизация включает лишь первый этап.

Превращение $\text{П} \rightarrow \text{А}$ совершается по диффузионному механизму и включает две стадии: 1) возникновение зародышей аустенита на межфазной границе феррит – цементит и 2) их рост. Размер зерен аустенита в момент окончания превращения зависит от температуры и времени выдержки. В ходе превращения в пределах исходного зерна перлита возникает несколько зерен аустенита, т. е. происходит измельчение исходного зерна. С повышением скорости нагрева критические точки A_{c1} и A_{c3} смещаются в область более высоких температур. Соответственно, за счет температурного гистерезиса увеличиваются скорость возникновения зародышей и их количество, уменьшается размер первичного зерна аустенита.

Длительная выдержка при температурах аустенизации может привести к объединению первичных зерен в более крупные вторичные зерна аустенита –

коалесценции. Укрупнение зерен аустенита сверх определенного, заранее заданного размера называется *перегревом*.

Таким образом, превращение $\Pi \rightarrow A$ определяет размер реального зерна в стали. Поэтому во избежание перегрева температура аустенизации не должна превышать температуру критической точки A_{c1} или A_{c3} (в зависимости от содержания углерода в стали) более чем на 20–30 °С.

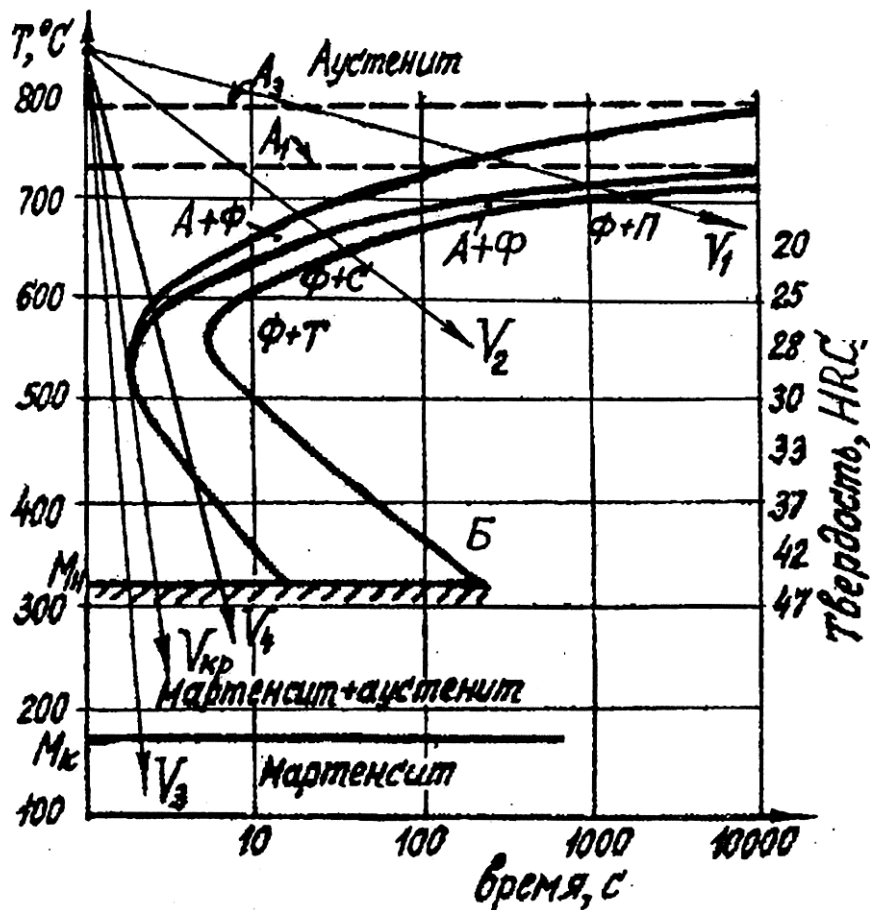
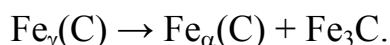


Рис. 2. Диаграмма изотермического превращения аустенита (сталь 45) и кривые охлаждения при отжиге – V_1 , нормализации – V_2 и закалке – V_3

При медленном охлаждении начинается превращение аустенита (см. рис. 2). В процессе охлаждения доэвтектоидной стали сначала из аустенита выделяется феррит, а затем при температуре A_{c1} оставшийся аустенит превращается в перлит по реакции



В заэвтектоидной стали при охлаждении происходит лишь распад аустенита с образованием перлита (вторичный цементит выделяется в малых количествах). Превращение $A \rightarrow \Pi$ также совершается по диффузионному механизму и включает стадии образования и роста ферритных и цементитных зародышей. Ферритные зерна возникают в объемах аустенита, где (вследствие флуктуации по составу) содержание углерода понизилось до 0,04 %. В этих объемах границентрированная решетка аустенита перестраивается в объемно-

центрированную (феррит). При образовании и росте ферритных зерен прилегающие к ним зоны аустенита обогащаются углеродом вплоть до 6,7 %. Объемы с таким составом становятся зародышами цементита. В результате аустенит превращается в смесь чередующихся объемов феррита (Ф) и цементита (Ц) пластинчатой формы. С увеличением скорости охлаждения стали (например, с V_1 до V_2 на рис. 2) понижается температура превращения $A \rightarrow (Ф + Ц)$, снижается скорость диффузии и, соответственно, уменьшается толщина ферритных и цементитных прослоек, т. е. повышается степень дисперсности структуры.

В соответствии с дисперсностью различают три типа феррито-цементитной смеси: перлит, сорбит и троостит. В перлите толщина ферритных и цементитных прослоек составляет около 0,4–0,75 мкм. Перлит характеризуется минимальной твердостью (для стали У8 – 15–20 HRC). Троостит имеет наибольшую степень дисперсности Ф + Ц смеси (межпластиночное расстояние около 0,1 мкм) и наибольшую твердость (40 HRC). Сорбит занимает промежуточное положение между перлитом и трооститом как по дисперсности Ф + Ц (0,2–0,25 мкм), так и твердости (25–30 HRC).

В зависимости от температуры аустенизации и режима охлаждения различают следующие разновидности отжига: гомогенизирующий, полный, неполный, сфероидизирующий и нормализацию.

Гомогенизирующий отжиг проводят с целью устранения или уменьшения дендритной ликвации, возникшей за счет избирательной кристаллизации отливок. Выравнивание химического состава происходит за счет протекания диффузионных процессов. Поэтому гомогенизирующий отжиг (см. рис. 1) проводят при максимально возможной температуре (1100–1150 °С) и длительной выдержке (до 200 часов). Указанные температурно-временные условия приводят, как правило, к «перегреву». В результате медленного охлаждения возникают крупные (1–4 балла) зерна феррита и перлита (в доэвтектоидной стали) или перлита и вторичного цементита (в заэвтектоидной стали). Для измельчения зерна (и устранения перегрева), возникшего при гомогенизирующем отжиге (аналогично при литье, ковке или штамповке), обычно используются *полный отжиг* или *нормализация*.

Отжиг при температурах выше критической точки Ac_3 называется *полным*. Полному отжигу подвергают лишь доэвтектоидные и эвтектоидные стали. При полном отжиге $T_{отж} = Ac_3 + (20–30) °C$ в превращениях участвуют все структурные составляющие, т. е. феррит и перлит (см. заштрихованную область на рис. 1). В результате двукратной перекристаллизации $Ф + П \rightarrow A \rightarrow Ф + П$ полностью снимаются внутренние напряжения и получается равновесная структура Ф + П с максимальной пластичностью и минимальной прочностью.

Неполный отжиг сталей проводится в температурном интервале на 20–50 °С выше критической точки Ac_1 . Неполный отжиг используется только для заэвтектоидных сталей, т. к. при полном отжиге эти стали охрупчиваются вследствие образования сплошной сетки вторичного цементита и укрупнения зерна аустенита. При неполном отжиге $T_{отж} = Ac_1 + (20–50) °C$ в аустенит превращается лишь перлит и незначительная часть вторичного цементита. Большая часть цементита сохраняется и препятствует росту аустенитного зерна. При последующем охлаждении вместе с печью аустенит превращается в перлит. Та-

ким образом, заэвтектоидная сталь после неполного отжига имеет структуру перлита и вторичного цементита, которая характеризуется достаточно высокой пластичностью, низкой твердостью и удовлетворительной обрабатываемостью на станках.

Для доэвтектоидных сталей неполный отжиг применяется крайне редко и только с целью улучшения обрабатываемости сталей на металлорежущих станках. В этом случае неполный отжиг приводит к получению мелкозернистой структуры $\Phi + \Pi$ с более низкой ударной вязкостью, чем при полном отжиге (связано это с тем, что большая часть феррита в превращении не участвует и сохраняет исходные свойства и повышенный уровень внутренних напряжений).

Сфероидизирующим отжигом называется процесс термической обработки стали на структуру зернистого перлита (второе название – зернистый цементит). Он включает нагрев стали до температуры на 10–20 °С выше критической точки A_{c1} , охлаждение до 700–650 °С, длительную выдержку при этой температуре (2–4 часа) и последующее охлаждение на воздухе. Низкая температура аустенизации обеспечивает сохранение достаточно большого количества нерастворенного цементита, который при последующей изотермической выдержке (ниже A_{c1}) способствует возникновению зернистого перлита (цементит имеет глобулярную форму).

Сталь со структурой зернистого перлита характеризуется минимальной твердостью, максимальной пластичностью и хорошей обрабатываемостью на металлорежущих станках. Поэтому сфероидизирующий отжиг используется для инструментальных эвтектоидных и заэвтектоидных сталей перед обработкой резанием. Сфероидизирующий отжиг также необходим для обеспечения качественной закалки инструмента.

Нормализация заключается в нагреве стали выше критической температуры A_{c3} на 30–60 °С (см. рис. 1) с последующим охлаждением на воздухе. Нормализация является разновидностью полного отжига и отличается от него, главным образом, скоростью охлаждения. При отжиге охлаждение производится вместе с печью со скоростью 50–150 град/ч (V_1 на рис. 2), при нормализации – на спокойном воздухе со скоростью 2–4 град/с (V_2). Вследствие ускоренного охлаждения при нормализации аустенит переохлаждается до более низких температур и распадается на сорбит с пластинчатой формой цементита (сорбит закалки). Поэтому нормализованная сталь имеет более высокую прочность и твердость, чем отожженная. Ударная вязкость сталей после нормализации примерно в 1,5 раза выше, чем в исходном состоянии (после прокатки). Это позволяет использовать нормализацию в качестве операции окончательной обработки мало- и среднеуглеродистых сталей. Для заэвтектоидных сталей нормализация применяется с целью устранения цементитной стали.

2.2. Закалка

Закалкой называется процесс формирования неравновесных структур (в этом ее принципиальное отличие от различных разновидностей отжига, при которых возникают более или менее равновесные структуры). Закалка является

основной упрочняющей операцией термической обработки стали, т. к. только в процессе закалки удается получить максимальную твердость и прочность.

Закалка включает две стадии:

- 1) нагрев и выдержку до завершения аустенизации;
- 2) охлаждение со скоростью, исключающей возможность распада аустенита по диффузионному механизму.

Если скорость охлаждения V_3 превышает критическую скорость закалки $V_{кр}$ (рис. 2), то при переохлаждении ниже критической точки M_n аустенит превращается в мартенсит. Мартенситное превращение происходит за счет мгновенной перестройки гранцентрированной решетки аустенита в объемно-центрированную путем сдвига атомов железа и углерода на расстояния, не превышающие межатомные. В процессе мартенситного превращения полностью исключается диффузия железа и углерода, и, соответственно, формируется пересыщенный твердый раствор углерода в железе – мартенсит закалки. Мартенсит закалки имеет тетрагональную (удлиненную в направлении ребра c) объемно-центрированную решетку. Степень тетрагональности (c/a) увеличивается с повышением содержания углерода в мартенсите. Следовательно, с увеличением содержания углерода повышается твердость мартенсита (рис. 3), достигая 60–65 HRC при 0,6 % углерода.

Стали с содержанием углерода менее 0,2 % не принимают закалки (в указанных сталях мартенситное превращение протекает при сравнительно высоких температурах, при которых за счет диффузии углерода и железа происходит его быстрый распад).

Превращение аустенита в мартенсит (М) (см. рис. 2) начинается при переохлаждении стали до мартенситной точки M_n и заканчивается при температуре M_k .



Рис. 3. Влияние содержания углерода и температуры аустенизации на твердость закаленной стали

Обычно превращение $A \rightarrow M$ остается незавершенным: даже при температурах ниже M_k в закаленной стали, кроме мартенсита, сохраняется часть аустенита, так называемый «остаточный аустенит» ($A_{ост}$). Количество $A_{ост}$ растет с

увеличением содержания углерода и понижением температуры критических точек M_k . Остаточный аустенит снижает твердость закаленной стали, поэтому высокоуглеродистые, особенно легированные стали с целью повышения твердости, а также стабилизации размеров и структуры за счет более полного превращения аустенита в мартенсит часто подвергают обработке холодом ($-70 \dots -100$ °С).

Практические результаты проведения операции закалки зависят от двух условий: температуры аустенизации и скорости охлаждения. *Доэвтектоидные и эвтектоидные стали подвергаются* так называемой *полной закалке*, *заэвтектоидные – неполной*. Соответственно, аустенизация доэвтектоидных и эвтектоидных сталей осуществляется при температуре на $20-30$ °С выше точки A_{c3} , заэвтектоидных – на $20-30$ °С выше точек A_{c1} (см. заштрихованную область на рис. 1). Нагрев до более высоких температур вызывает рост зерна – перегрев.

Аустенизация доэвтектоидной стали в интервале $A_{c1}-A_{c3}$ (неполная закалка) приводит к понижению твердости (см. кривую *б* на рис. 3) и росту хрупкости стали после закалки вследствие получения двухфазной структуры: мартенсит и феррит. Наоборот, для заэвтектоидной стали неполная закалка является основным режимом ее обработки. В этом случае, с одной стороны, исключается возможность формирования крупнозернистой структуры, с другой – в структуре сохраняются частицы цементита, повышающие твердость и износостойкость сталей. Применение полной закалки для заэвтектоидных сталей нежелательно, т. к. аустенизация при температуре выше $A_{c1} + (20-30$ °С) приводит к растворению цементита и росту величины зерен, что в конечном итоге увеличивает количество остаточного аустенита, коробление при закалке и сопровождается падением твердости (рис. 3, кривая *а*).

Таким образом, *для выбора температур закалки* (как и температур отжига) *необходимо знать положение критических точек* стали. Для доэвтектоидных сталей критические точки наиболее просто определяются *методом пробных закалок*. Сущность метода: несколько образцов стали охлаждаются в одной и той же среде (воде) с различных температур. Температура пробных закалок выбирается для ряда характерных значений: ниже предполагаемого значения критической точки A_{c1} , между A_{c1} и A_{c3} и выше предполагаемого значения A_{c3} (см. рис. 4а). При нагреве образца ниже A_{c1} (температуры существования аустенита) закалка не происходит: после охлаждения сохраняется исходная феррито-перлитная структура с низкой твердостью. При охлаждении образцов с температуры $A_{c1} \div A_{c3}$ происходит частичная закалка: в структуре стали наряду с мягким ферритом образуется и весьма твердый мартенсит. Количество мартенсита, а следовательно, твердость стали возрастают по мере повышения температуры от A_{c1} до A_{c3} . При закалке с температуры выше A_{c3} сталь приобретает структуру мартенсита и максимальную твердость, практически не зависящую от фактического значения температур. Таким образом, если после пробных закалок измерить твердость и построить кривую $HRC = f(T_{\text{зак}})$, то по перегибам на этой кривой можно примерно определить положение критических точек A_{c1} и A_{c3} (рис. 4б).

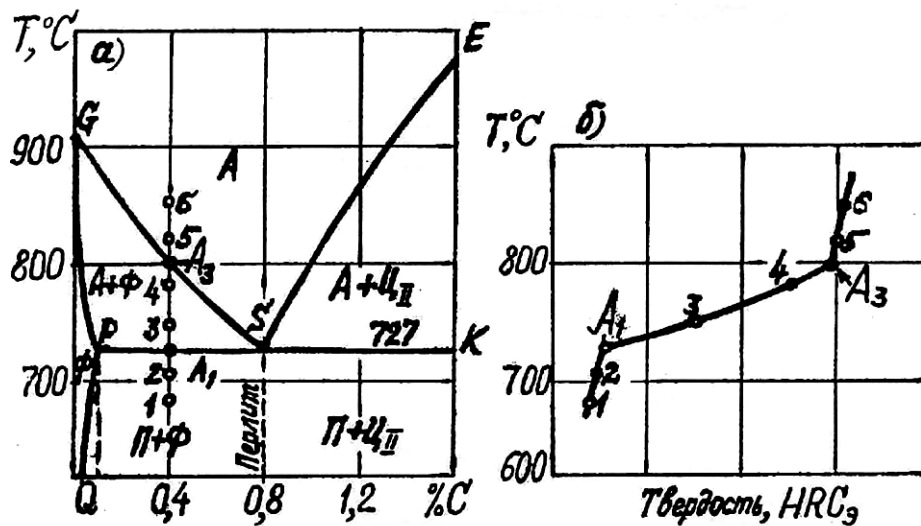


Рис. 4. Влияние температуры нагрева на фазовый состав и твердость доэвтектоидной стали после охлаждения в воде

Необходимая *скорость охлаждения при закалке* обеспечивается подбором охлаждающих сред, в качестве которых обычно используют воду, растворы солей, щелочей, масло и т. п. Идеальная охлаждающая среда должна обеспечивать максимальную скорость охлаждения в интервале минимальной устойчивости аустенита ($\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$) и замедленное охлаждение при температурах мартенситного превращения. Если скорость охлаждения в интервале $500\text{--}650\text{ }^\circ\text{C}$ меньше критической скорости закалки (например, V_4 на рис. 2), то часть аустенита может превратиться в троостит, и, следовательно, твердость после закалки будет значительно меньше, чем при закалке на мартенсит. Медленное охлаждение в нижнем интервале температур необходимо для превращения аустенита в мартенсит одновременно по всему объему детали. В противном случае из-за градиента температур и значительной разницы удельных объемов аустенита и мартенсита возникают внутренние напряжения, которые могут привести к короблению или разрушению детали.

Практически в качестве закалочной среды для углеродистых сталей используют воду или водные растворы солей, щелочей и т. п. Необходимость применения водных сред обусловлена тем, что только вода может обеспечить в районе наименьшей устойчивости аустенита ($\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$) скорость охлаждения большую, чем критическая скорость закалки, для углеродистых сталей соответственно $V_{\text{охл}} = 600\text{ град/с}$, $V_{\text{кр}} = 400\text{ град/с}$. Отмеченное справедливо для сталей с содержанием углерода больше $0,3\%$. Малоуглеродистые стали имеют столь высокую критическую скорость закалки, что ее достижение возможно лишь при применении растворов солей, щелочей и кислот.

Закалка в воде вызывает значительные внутренние напряжения и, соответственно, большое коробление. Более мягкой закалочной средой является минеральное масло. Закалка в масле обеспечивает снижение скорости охлаждения в интервалах мартенситного и перлитного превращения примерно в $10\text{--}15$ раз. Это гарантирует более низкий уровень внутренних напряжений. Однако закалка углеродистых сталей в масле не обеспечивает получения максимальной

твердости, т. к. охлаждение происходит со скоростью меньше критической и аустенит распадается на смесь троостита и мартенсита. Масло успешно используется в качестве закалочной среды при закалке легированных сталей, которые характеризуются повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита и, следовательно, значительно меньшей критической скоростью закалки, чем углеродистые стали. Для дополнительного снижения внутренних напряжений часто применяют прерывистую или ступенчатую закалку, а также изотермическую закалку.

2.3. Отпуск

Мартенсит закалки, являясь пересыщенным раствором углерода в α -железе, не обладает стабильностью и достаточной ударной вязкостью. Кроме того, остаточные внутренние напряжения могут вызвать с течением времени деформацию, коробление или разрушение закаленных деталей. Для стабилизации структуры и размеров изделий, повышения пластичности и уменьшения внутренних напряжений необходимо проведение отпуска. *Отпуском* называют нагрев закаленной стали до температуры ниже критической точки A_{c1} , в результате которого неустойчивые структуры (мартенсит и аустенит остаточный) переходят в более стабильные мартенсито-карбидные или феррито-цементитные смеси.

Отпуск является заключительной операцией термической обработки. Он обеспечивает получение желаемого сочетания механических свойств за счет регулируемого снижения прочности и повышения пластичности. Конечная структура и свойства определяются максимальной температурой отпуска, в зависимости от которой различают *четыре превращения при отпуске* (рис. 5).

1) Превращение мартенсита закалки в мартенсит отпуска происходит в температурном интервале 60–180 °С. Сущность первого превращения заключается в распаде исходного пересыщенного твердого раствора углерода в α -железе на когерентную смесь нестабильного пластинчатого ϵ -карбида и малоуглеродистого мартенсита. Эта двухфазная смесь называется *мартенситом отпуска*. Поскольку содержание углерода в матричной фазе мартенсита отпуска меньше, чем в мартенсите закалки, то в ходе первого превращения снижается степень тетрагональности, уменьшаются удельный объем и, как следствие, длина Δl образца, фиксируемая на дилатометрической кривой. Резко улучшаются характеристики пластичности и вязкости, несмотря на некоторый рост твердости и прочности.

2) Распад остаточного аустенита на мартенсит отпуска в закаленной углеродистой стали имеет место при температуре 180–250 °С. Поскольку аустенит имеет меньшую твердость и удельный объем по сравнению с мартенситом, то процесс сопровождается некоторым увеличением твердости и длины образца и уменьшением ударной вязкости.

3) Превращение мартенсита отпуска в феррито-цементитную смесь происходит при температурах 300–400 °С. При этом α -твердый раствор приобретает

почти равновесную концентрацию углерода (0,1 %), а избыток углерода выделяется в виде глобулярных карбидов Fe_3C . Размер цементитных включений α_k (рис. 5) увеличивается с повышением температуры отпуска, и, соответственно, по мере понижения температуры монотонно уменьшаются твердость и прочность стали и увеличивается ее пластичность. Длина образца уменьшается, т. к. феррито-цементитные смеси имеют меньший удельный объем, чем мартенсит. Структуру стали, отпущенной при 350–450 °С, называют *трооститом отпуска*.

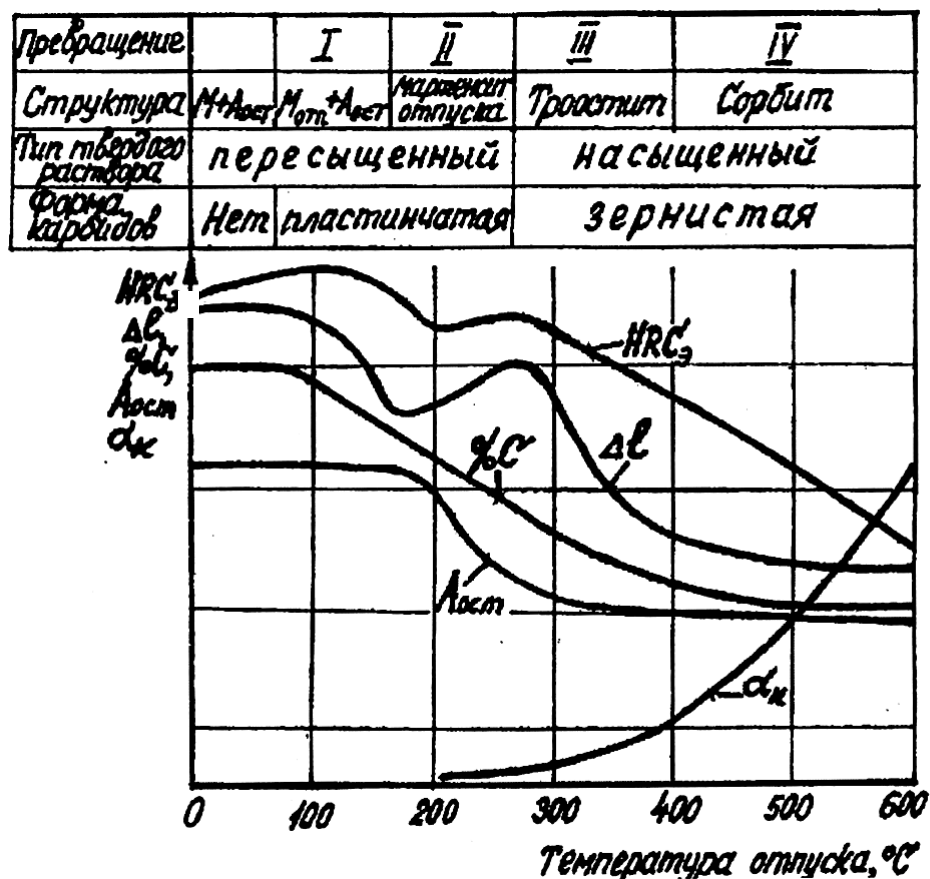


Рис. 5. Изменение структуры и свойств углеродистой стали при отпуске

4) Четвертое превращение – процесс сфероидизации и коагуляции карбидных частиц, происходящий при нагреве закаленной стали до 400–650 °С. Структура стали после четвертого прекращения называется *сорбитом отпуска*. Сорбит, как и троостит, состоит из феррито-цементитной смеси, но цементитные частицы имеют большие размеры и более округленную форму.

В зависимости от режима и назначения различают три вида отпуска.

1) *Низкий отпуск* – нагрев закаленной стали до 150–220 °С с целью снятия внутренних напряжений, повышения вязкости и пластичности без существенного понижения твердости. Низкий отпуск используют при обработке измерительного и режущего инструмента, холодных штампов и деталей после цементации, т. е. при термообработке заэвтектоидных, эвтектоидных и цементуемых сталей.

2) *Средний отпуск* – нагрев закаленной стали до 300–400 °С с целью повышения пластичности, ударной вязкости и упругости стали за счет небольшо-

го снижения прочности и твердости. Этому отпуску подвергают стали с 0,5–0,65 % углерода, применяемые для рессор и пружин.

3) *Высокий отпуск* – нагрев закаленной стали до 500–600 °С с целью получения максимально возможной вязкости и пластичности при относительно высокой прочности. Высокий отпуск применяют при термообработке большинства ответственных деталей машин, изготовленных из сталей с содержанием углерода 0,3–0,5 %.

Для получения требуемых свойств обычно рекомендуются следующие выдержки: для низкого отпуска – 2–3 часа, среднего – 1–2 часа и высокого – 0,5–1 час. Скорость охлаждения углеродистых сталей после отпуска не меняет структуры и свойств и поэтому используют, как правило, охлаждение на воздухе, что исключает возможность появления высоких термических напряжений.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Задание по практической и лабораторной работе

1. Пользуясь учебниками [1], [2], конспектом лекций и данным методическим руководством, изучить материал по теме «Термическая обработка углеродистых сталей».

2. Методом пробных закалок выбрать оптимальную температуру закалки стали 45.

3. Выбрать оптимальную охлаждающую среду для закалки стали 45.

4. Исследовать влияние температуры отпуска на твердость закаленной стали 45, сопоставить с поведением при отпуске низколегированной инструментальной стали 9ХС и быстрорежущей Р18 или Р6М5.

5. Провести анализ результатов и дать рекомендации для практического применения той или иной термообработки.

6. Подготовить отчет.

3.2. Обеспечивающие средства

1. Термические печи в количестве четырех штук на температуру до 1000 °С.

2. Сушильный шкаф на температуру 200 °С.

3. Твердомер Роквелла ТК с алмазным индентором.

4. Наждачное точило.

5. Образцы из стали 45 диаметром 15–30 мм и высотой 15–20 мм.

3.3. Методика выполнения работы

1. Для определения критических точек стали и оптимальной температуры нагрева для закалки в печь с температурой 680 °С загрузить не менее шести

образцов стали. После выдержки не менее 100 с на 1 мм диаметра один образец быстро извлечь и охладить в воде. При этом, чтобы предотвратить образование паровой рубашки, замедляющей охлаждение, образец необходимо непрерывно перемещать в охлаждающей среде до полного прекращения шипения. Далее температуру в печи поднять до 710 °С, выдержать образцы при этой температуре до ее выравнивания по сечению (около 5 мин) и охладить в воде второй образец. Третий и последующие образцы охладить с температур 750, 770, 820, 850 °С.

2. Измерить твердость образцов по Роквеллу, занести в табл. 1 и построить график изменения твердости в зависимости от температуры закалки.

Таблица 1

Зависимость твердости стали от температуры нагрева при закалке

Номер образца	Температура нагрева, °С	Твердость, HRC	Структура образца	Вид термообработки
1	680			
2	710			
3	750			
4	770			
5	820			
6	850			

3. По перегибам на кривой $HRC = f(T_{зак})$ определить критические точки Ac_1 и Ac_3 и выбрать оптимальную температуру закалки.

4. Для выбора оптимальной скорости охлаждения при закалке стали в печь с температурой 850 °С заложить не менее четырех образцов. После прогрева (время нагрева 1 мин на 1 мм диаметра) один образец охладить на воздухе, второй – в масле, третий – в холодной воде (~ 25 °С) и четвертый – в 5 %-м водном растворе поваренной соли.

5. Определить твердость, результаты занести в табл. 2, построить график изменения твердости в зависимости от скорости охлаждения.

Таблица 2

Влияние скорости охлаждения на твердость при закалке стали

Вид термообработки	Температура аустенизации, °С	Охлаждающая среда	Скорость охлаждения, град/с	Твердость, HRC	Структура
Нормализация	820–850	Воздух	2–3		
Закалка	820–850	Масло, 25 °С	150		
Закалка	820–850	Вода, 25 °С	600		
Закалка	820–850	5 %-й раствор поваренной соли в воде	1100		

6. Выбрать оптимальную охлаждающую среду для закалки стали 45.

7. Охарактеризовать получаемую структуру и свойства, дать применение термообработки.

8. Указать характер и причины возможного брака.

9. Для исследования влияния отпуска на твердость закаленные с 850 °С в воде образцы подвергнуть отпуску при 200, 400, 600 °С и измерить их твердость. Результаты занести в табл. 3 и построить график изменения твердости в зависимости от температуры отпуска.

Таблица 3

Влияние температуры отпуска на твердость закаленной стали

Вид отпуска	Температура отпуска, °С	Твердость, HRC	Структура
Без отпуска	20		
Низкий	200		
Средний	400		
Высокий	600		

10. Охарактеризовать получаемую структуру и свойства. Указать применение термообработки.

11. Провести анализ результатов и дать рекомендации для практического применения той или иной термообработки.

12. Подготовить отчет.

3.4. Требования к отчету

Отчет должен содержать описание цели и задач работы, методику выполнения опытов, их результаты, анализ и рекомендации по практическому применению. Данные представляются в виде таблиц, графиков, рисунков.

3.5. Контрольные вопросы

1. Что такое феррит, аустенит, перлит, цементит в стали? Покажите области их существования на диаграмме «железо – цементит» (рис. 6).

2. Нарисуйте элементарные ячейки феррита и аустенита. Охарактеризуйте растворимость углерода в решетке феррита и аустенита. Как это влияет на свойства стали при термической обработке?

3. Что такое термическая обработка? Что лежит в ее основе? Почему с ее помощью удается в столь широких пределах изменять свойства сплавов?

4. Какие виды термической обработки Вы знаете? Для чего они применяются?

5. Какую структуру при комнатной температуре имеет доэвтектоидная сталь 45 в равновесном состоянии?

6. Какие превращения происходят при нагреве стали выше критических точек? Их влияние на структуру и свойства стали после отжига и закалки.

7. Что такое отжиг стали? Как он выполняется? Для чего применяется?

8. До появления какой структуры необходимо нагреть сталь для ее перекристаллизации? Опишите изменения, происходящие при нагреве: в структуре, в свойствах.



Рис. 6. Диаграмма состояния «железо – цементит»

9. До какой температуры делается нагрев при полном и неполном отжиге стали 45? Покажите эти температуры на диаграмме «железо – цементит» (рис. 6). Какую структуру имеет сталь при этих температурах?

10. Какие явления обеспечивают измельчение зерна в стали 45? До какой температуры необходимо ее нагреть?

11. Приведите C-образную диаграмму распада переохлажденного аустенита. Какие структуры возникают в стали при различных температурах распада? Каковы их свойства?

12. Каково влияние скорости охлаждения аустенита на структуру и свойства стали?

13. Что такое перлит, сорбит, троостит? Каковы их свойства? Что их отличает друг от друга в структурном плане? Как это сказывается на свойствах?

14. Что такое мартенсит? Как выглядит его элементарная ячейка? Опишите механизм его появления, свойства. В чем отличие мартенсита от перлитных структур? Используется ли эта структура в изделии как окончательная?

15. Что такое закалка? Как она выполняется? Для чего применяется?

16. Какова сущность метода пробных закалок при определении критических точек стали?

17. Что такое критическая скорость при закалке? Отрадите ее на С-образной диаграмме распада переохлажденного аустенита в стали 45. Здесь же покажите кривые охлаждения углеродистой стали на воздухе, в масле, в воде. Какие структуры при этом возникают? Каковы их свойства?

18. В каких средах закаливается углеродистая сталь? Почему? К каким последствиям это приводит?

19. Какие виды брака возникают при закалке? Как избежать брака при закалке?

20. Что такое отпуск? Для чего он применяется?

21. Какую термообработку Вы порекомендуете для ответственного вала или шестерни из стали 45?

22. Какую термообработку Вы порекомендуете для режущего инструмента из стали У12А?

23. Какую термообработку Вы порекомендуете для пружин из стали У8?

24. Как влияет температура отпуска на твердость закаленной стали 45, У12, Р18? Покажите зависимость на графике. С чем связана разница в теплоустойчивости этих сталей?

25. Что такое нормализация и улучшение стали? Какие структуры при этом получаются? Каковы их свойства? Где применяются?

26. Какие структуры получаются при отжиге, при закалке, при отпуске стали? Каковы свойства у этих структур?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дальский, А. М.* Технология конструкционных материалов [Текст] : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. М. Дальский [и др.]. – 6-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2005. – 592 с.

2. *Фетисов, Г. П.* Материаловедение и технология металлов [Текст] / Г. П. Фетисов [и др.]. – М. : Высш. шк., 2002. – 640 с.