

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
для студентов специальностей
23.05.01, 23.05.02, 15.03.01,
15.03.04, 15.03.05, 15.04.01,
20.03.01, 23.03.03

Курган 2021

Кафедра: «Энергетика и технология металлов».

Дисциплина: «Технология конструкционных материалов и материаловедения» (направление 23.05.01, 23.05.02, 15.03.01, 15.03.04, 15.03.05, 15.04.01, 20.03.01, 23.03.03).

Составили: канд. техн. наук, доцент Т. А. Дудорова,
канд. техн. наук, доцент Л. М. Савиных.

Печатается в соответствии с планом издания, утвержденным методическим советом университета «10» декабря 2020 г.

Утверждены на заседании кафедры «29» октября 2021 г.

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Научиться самостоятельно проводить операции закалки и отпуска стали.

1.2 Ознакомиться с оборудованием, применяемым при термической обработке стали и контроле твердости.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 Выбрать температуру закалки для каждой стали, выданной преподавателем.

2.2 Произвести закалку образцов (один образец каждой марки стали закаливается в воде, а второй – в масле).

2.3 Определить твердость образцов после закалки.

2.4 Произвести отпуск закаленных образцов при температурах 200 °С, 450 °С, 650 °С.

2.5 Определить твердость образцов после каждого отпуска.

2.6 Построить кривые изменения твердости в зависимости от температуры отпуска.

2.7 Составить отчет о работе.

3 ПРИБОРЫ, МАТЕРИАЛЫ И ИНСТРУМЕНТ

К приборам, материалам и инструментам при закалке и отпуске стали относят:

- а) муфельные и трубчатые электрические печи;
- б) термоэлектрические приборы;
- в) закалочный бак с водой;
- г) закалочный бак с маслом;
- д) клещи, совки, решетчатые корзины, крючки;
- е) твердомер;
- ж) образцы стали (по указанию преподавателя);
- з) шлифовальная бумага;
- и) шлифовальный станок.

4 ВВЕДЕНИЕ

Закалка производится с целью повышения твердости и прочности стали, причем лучшие прочностные свойства достигаются в том случае, когда получа-

ется структура мартенсита в доэвтектоидной стали и мартенсит + цементит вторичный – в заэвтектоидной стали. Для получения этой структуры, зная марку стали, необходимо выполнить следующее:

а) обеспечить нагрев деталей до минимальной температуры, при которой в структуре нагретой стали перлит и феррит оказываются неустойчивыми и превращаются в аустенит. В случае, если при нагреве остается ферритная составляющая, например, при нагреве доэвтектоидной стали выше A_{c1} , но ниже A_{c3} , то в конечном счете при закалке будет получена структура феррит + мартенсит, которая из-за наличия феррита обладает пониженными механическими свойствами. Этот вариант закалки называется «неполной закалкой» и практически не применяется;

б) выдержать деталь при температуре нагрева в течение определенного времени с целью выравнивания температуры по сечению детали и получения мелкозернистого однородного (гомогенного) аустенита, т. е. такого аустенита, в котором углерод и легирующие элементы распределены по объему равномерно;

в) обеспечить достаточно быстрое охлаждение деталей по окончании выдержки. Это достигается применением такой охлаждающей среды, в которой скорость охлаждения больше критической, т. е. $V_{\text{охл.}} > V_{\text{крит.}}$. Критическую скорость закалки можно определить по термокинетической диаграмме распада переохлажденного аустенита для данной марки стали. Подтверждением правильно выбранной среды охлаждения для закалки деталей из данной марки стали является их высокая твердость после закалки ($HRC_3 > 50$) и минимальные внутренние напряжения. При содержании углерода более 0,6 % $HRC_3 > 60$.

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Закалка

5.1.1 Определить температуру закалки углеродистой стали, используя нижнюю часть диаграммы состояния железо-цементит, и полученные значения записать в протокол.

Для доэвтектоидной стали температура закалки на $30 \div 50$ °C выше линии GS, т. е.

$$t_{\text{зак}} = A_{c3} + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для заэвтектоидной стали температура закалки на $30 \div 50$ °C выше линии SK, т. е.

$$t_{\text{зак}} = A_{c1} + (30 \div 50) ^\circ\text{C}.$$

Для легированных сталей критические точки и температура закалки определяются по диаграмме состояния: железо-углерод.

5.1.2 Определить общее время нагрева образцов из расчета 1,0–1,5 мин на 1 мм его диаметра и результаты внести в протокол.

Повышение температуры нагрева или увеличение времени выдержки выше рекомендуемых нежелательно, так как при этом происходит рост аустенитного зерна. Увеличение размера аустенитного зерна приводит к получению после охлаждения крупноигльчатого мартенсита, обладающего повышенной хрупкостью и склонностью к образованию трещин.

5.1.3 Образцы обеих марок поместить в печь, нагретую до температуры закалки. Одновременная загрузка в печь образцов разных марок допускается при условии, что разница по температуре закалки не превышает 50° (в этом случае берется более высокое значение температуры закалки).

Все образцы располагают в наиболее горячей зоне печи, в один ряд по длине.

5.1.4 Выдержать образцы в печи требуемое время.

При нагревании до температуры закалки образцов из доэвтектоидной стали исходная феррито-перлитная структура превращается в структуру аустенита.

В заэвтектоидной стали совершается превращение перлита в аустенит, а вторичный цементит в основном остается нерастворимым.

5.1.5 Извлечь из печи в корзину два образца (по одному от каждой марки). Быстро перенести корзину в закалочный бак с водой, опустить в воду и перемещать в горизонтальной плоскости, обеспечивая интенсивное охлаждение.

5.1.6 Затем извлечь из печи другие два образца и охладить их в масле без перемещения. Перед закалкой включить вентилятор, подсоединенный к масляной ванне.

5.1.7 Извлечь образцы из масла и положить корзину на кромку бака для обеспечения стока масла.

При охлаждении в воде происходит превращение аустенита в мартенсит, так как скорость охлаждения больше критической скорости закалки. Получаемая структура – мартенсит.

При охлаждении углеродистой стали в масле скорость охлаждения значительно ниже критической скорости закалки. Вследствие этого, кроме мартенсита, образуется значительное количество немартенситных продуктов (феррит, перлит, бейнит).

$$V_{\text{охл. в воде}} > V_{\text{кр. угл. стали}} > V_{\text{охл. в масле}} .$$

Легирующие элементы повышают устойчивость переохлажденного аустенита и этим значительно уменьшают критическую скорость закалки.

$$V_{\text{кр. лег. стали}} \ll V_{\text{кр. угл. стали}} .$$

Поэтому даже при закалке легированной стали в масле скорость охлаждения оказывается выше критической и получается мартенситная структура (рисунок 1).

$$V_{\text{охл. в воде}} > V_{\text{охл. в масле}} > V_{\text{кр. лег. стали}} .$$

5.1.8 Проверить номера образцов, закаленных в воде и в масле, и записать в протокол.

5.1.9 Обтереть все образцы сухой тряпкой или фильтровальной бумагой.

5.1.10 Все образцы зачистить с обоих торцов на шлифовальном станке. Нижний торец (с рисками) зачищается до неполного удаления окалины, а верхний торец (без рисков) – до удаления окалины и обезуглероженного слоя (снимается не менее 0,3 мм).

Если обезуглероженный слой не удален, то при замере твердости будут получены пониженные показания.

5.1.11 Определить твердость каждого образца на приборе Роквелла со стороны верхнего торца.

Результат записать в протокол и предъявить преподавателю.

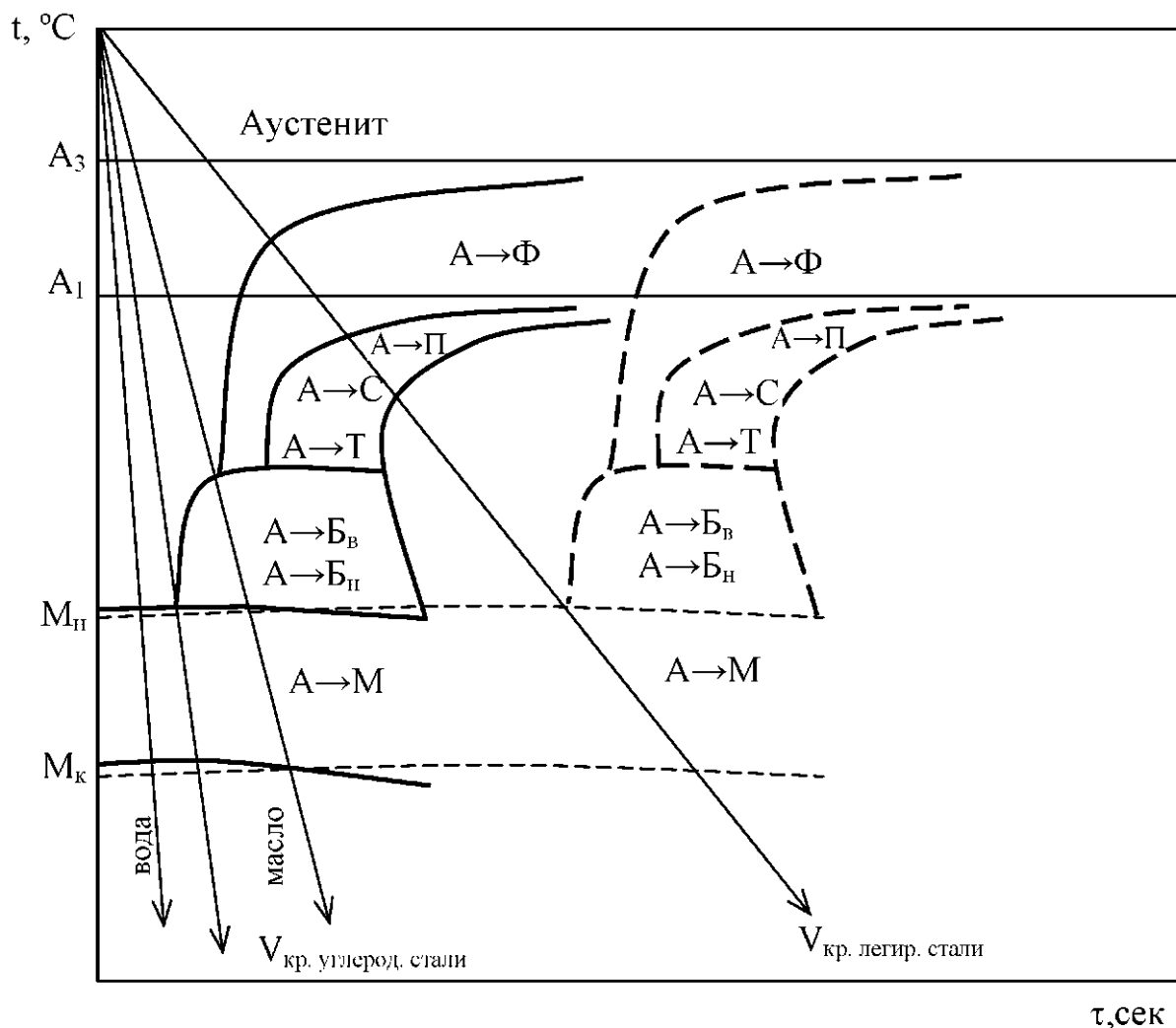


Рисунок 1 – Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита углеродистой (сплошной линия) и легированной (пунктирная линия) сталей

6 ОТПУСК ОБРАЗЦОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПОСЛЕ ОТПУСКА

Свежезакаленная деталь обладает высоким уровнем внутренних напряжений. Если такую деталь оставить при комнатной температуре в течение длительного времени, то в ней возможно образование трещин. Поэтому закаленную деталь необходимо сразу же после закалки подвергнуть отпуску ($150 \div 650$ °C). В процессе нагрева и выдержки при отпуске происходят изменения структуры и свойств стали в большей степени, чем температуры нагрева.

Для определения влияния температуры отпуска сначала все образцы подвергаются низкому отпуску (200 °C) и проверяется твердость, затем среднему (450 °C) и высокому (650 °C) и также проверяется твердость.

6.1 Низкий отпуск

6.1.1 Определить время выдержки при температуре отпуска из расчета 2 мин на 1 мм диаметра образца.

6.1.2 Все образцы, уложенные в металлическую коробку, поместить в печь, нагретую до 200 °С, выдержать в печи заданное время и охладить в воде.

В результате отпуска при 200 °С происходит превращение мартенсита закалки в мартенсит отпуска. Мартенсит отпуска – смесь перенасыщенного углеродом α -раствора и мельчайших частиц ε -карбида, кристаллические решетки которых связаны когерентно. При отпуске снимаются внутренние напряжения. Твердость изменяется незначительно.

6.1.3 Определить твердость каждого образца на приборе Роквелла (по HRQ), результаты внести в протокол. Твердость замеряется на верхнем торце.

6.2 Средний отпуск

6.2.1 Все образцы поместить в печь, нагретую на 450 °С, выдержать их в ней необходимое время и охладить в воде.

При отпуске происходит распад мартенсита с образованием смеси феррита с дисперсными частицами зернистого цементита, называемой трооститом отпуска. Внутренние напряжения снимаются почти полностью. Твердость снижается.

6.2.2 Слегка зачистить торцы образцов наждачной бумагой.

6.2.3 Определить твердость верхнего торца каждого образца и результаты записать в протокол.

6.3 Высокий отпуск

6.3.1 Все образцы поместить в печь, нагретую до 650 °С. После соответствующей выдержки охладить в воде.

При температуре 650 °С происходит коагуляция (укрупнение) частиц цементита. Полученная структура, состоящая из феррита и укрупненных частиц зернистого цементита, называется сорбитом отпуска.

Повышение температуры отпуска с 450 °С до 650 °С сопровождается снижением твердости и прочности стали при резком повышении пластичности и ударной вязкости.

Если при закалке получена низкая твердость (структура бейнит, перлит, феррит и частично мартенсит), то отпуск не вызывает значительных изменений твердости, так как процессы отпуска преобразуют только мартенсит и бейнит.

В этом случае наблюдаемое при отпуске снижение твердости не сопровождается значительным повышением пластичности и ударной вязкости.

6.3.2 Зачистить на шлифовальном станке две противоположные стороны образца.

Определить твердость со стороны верхнего торца и результаты записать в протокол (рисунок 2).

Протокол

Режим термической обработки и твердость образцов

Марка стали	Закалка			Номера образцов	Твердость после закали (HRC ₃)	Твердость (HRC ₃) после отпуска при температуре		
	Температура нагрева, °C	Время нагрева, мин	Среда охлаждения			200°	450°	650°
			вода					
			масло					
			вода					
			масло					

Рисунок 2 – Образец протокола

7 ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

7.1 Построить кривые изменения твердости в зависимости от температуры отпуска и предъявить их преподавателю (рисунок 3).

7.2 Анализ результатов.

7.2.1 На углеродистой стали после закалки в масле получена более низкая твердость, чем после закалки в воде.

Это обусловлено различием в структуре: после закалки в воде – мартенсит, после закалки в масле – троосто-мартенситная структура.

При охлаждении в масле не достигается критическая скорость закалки (обратите внимание на пункт 5.1.7).

7.2.2 На легированной стали получена высокая твердость не только при закалке в воде, но и в масле.

Легированный аустенит обладает повышенной устойчивостью – критическая скорость закалки меньше, чем для углеродистой стали. Поэтому даже при закалке в масле скорость охлаждения больше критической.

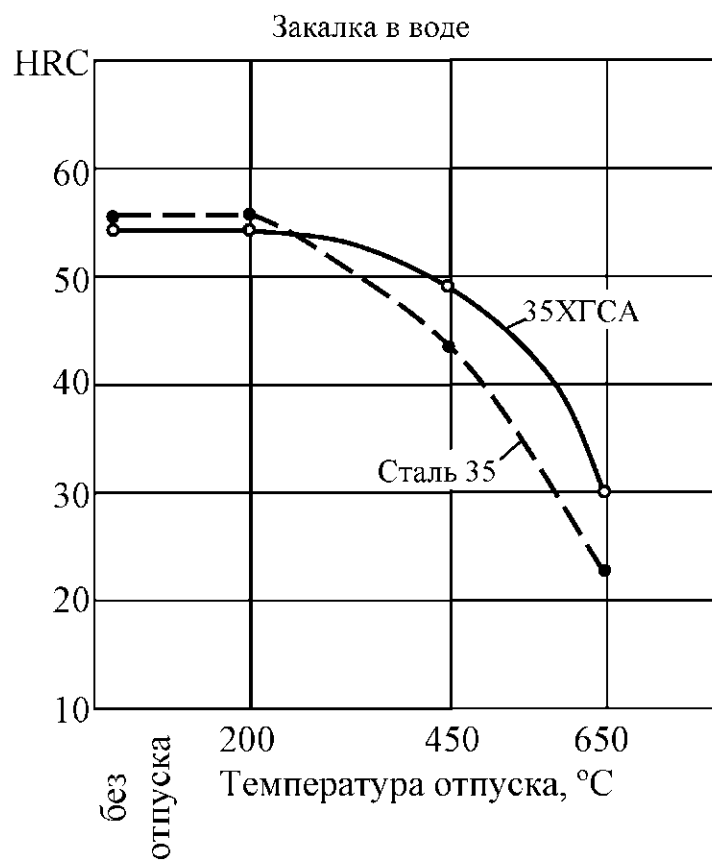
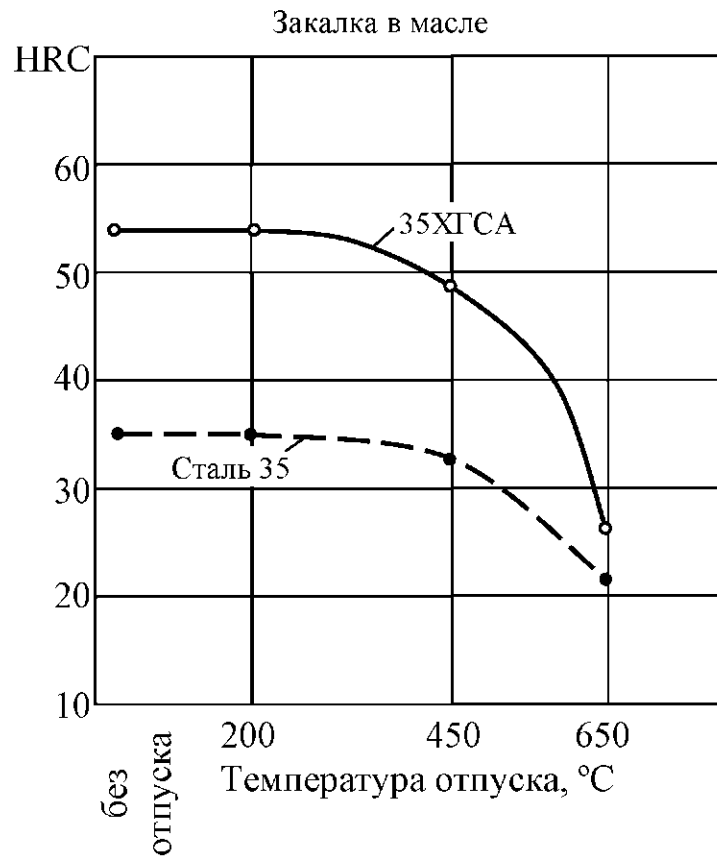


Рисунок 3 – Зависимость твердости стали от температуры отпуска после закалки в воде и масле

7.2.3 При повышении температуры отпуска с 200 °С до 650 °С твердость легированной стали снижается слабее, чем углеродистой (на образцах, закаленных в воде).

Легирующие элементы задерживают диффузию углерода в α -растворе. Поэтому замедляется выделение карбидов и их коагуляция. Для достижения одинаковой твердости легированную сталь следует отпускать при более высокой температуре, чем углеродистую.

8 СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

8.1 Отчет должен содержать:

- 1) краткое описание работы;
- 2) заполненный протокол;
- 3) кривые изменения твердости при отпуске для двух марок стали;
- 4) анализ превращений при закалке в воде и в масле для углеродистой и легированной сталей;
- 5) анализ превращений при отпуске образцов, закаленных на мартенсит.

8.2 Выбрать среду охлаждения для закалки углеродистой и легированной стали с учетом двух требований:

- а) получение мартенситной структуры (не менее 90 % мартенсита) – главное требование;
- б) получение по возможности невысоких внутренних напряжений.

8.3 Ответить на вопросы:

- 1) Как изменяется структура и твердость стали в зависимости от температуры отпуска?
- 2) Почему при одинаковой температуре отпуска (650 °С) твердость легированной стали выше, чем углеродистой?

Библиографический список

- 1 Металловедение / А. П. Гуляев. – Москва : Metallurgia, 1986.
- 2 Материаловедение : учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – 5 изд. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.
- 3 Основы материаловедения / под ред. И. И. Сидорина. – Москва : Машиностроение, 1976.
- 4 Гуревич Ю. Г. Теория термической обработки стали / Ю. Г. Гуревич, Л. М. Савиных, Т. А. Дудорова. – Курган, КГУ, 2013. – 95 с.

Дудорова Татьяна Александровна,
Савиных Леонид Михайлович

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
для студентов специальностей
23.05.01, 23.05.02, 15.03.01,
15.03.04, 15.03.05, 15.04.01,
20.03.01, 23.03.03

Редактор Л. П. Чукомина

Подписано в печать 25.01.22	Формат 60×84 1/16	Бумага 80 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ 06	Тираж 25	

БИЦ Курганского государственного университета.

640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.

Курганский государственный университет.