

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы – ознакомить студентов с практикой термической обработки стали и полученными структурами стали.

Методические указания

Работа состоит из двух частей: практики термической обработки углеродистой стали и микроанализа углеродистой стали после термической обработки.

При выполнении термической обработки студенты устанавливают зависимость твердости стали от скорости охлаждения при закалке и температуры отпуска.

Для проведения работы берутся две марки стали: доэвтектоидная и заэвтектоидная, которые подвергаются закалке и отпуску.

Правильное проведение закалки стали сводится к выбору режима, куда относятся следующие параметры: оптимальная температура закалки, время нагрева, скорость охлаждения.

По условиям нагрева принято различать полную и неполную закалку. При полной закалке сталь переводят в однофазное аустенитное состояние, т.е. нагревают выше критических температур A_{c3} или A_{cm} , при неполной закалке сталь нагревают до межкритических температур - A_{c1} A_{c3} A_{cm} (рис. 3).

Доэвтектоидные стали подвергают полной закалке, при этом оптимальной температурой нагрева является температура $A_{c3} + (30-50^\circ)$, так как она обеспечивает получение при нагреве мелкозернистого аустенита и, соответственно, после охлаждения – мелкоигльчатого мартенсита. Неполная закалка для таких сталей не рекомендуется, потому что в структуре стали, наряду с мартенситом, будет присутствовать мягкий феррит, который понижает твердость и прочность стали. Заэвтектоидную сталь подвергают неполной закалке. Нагрев стали выше A_{cm} нецелесообразен, так как ведет к перегреву, а значит, к повышению хрупкости стали. При закалке с температурой выше A_{c1} , но ниже A_{cm} получается мелкоигльчатый мартенсит с мелкими включениями цементита. Цементит – очень твердая составляющая, поэтому твердость и износостойчивость закаленной стали повышается.

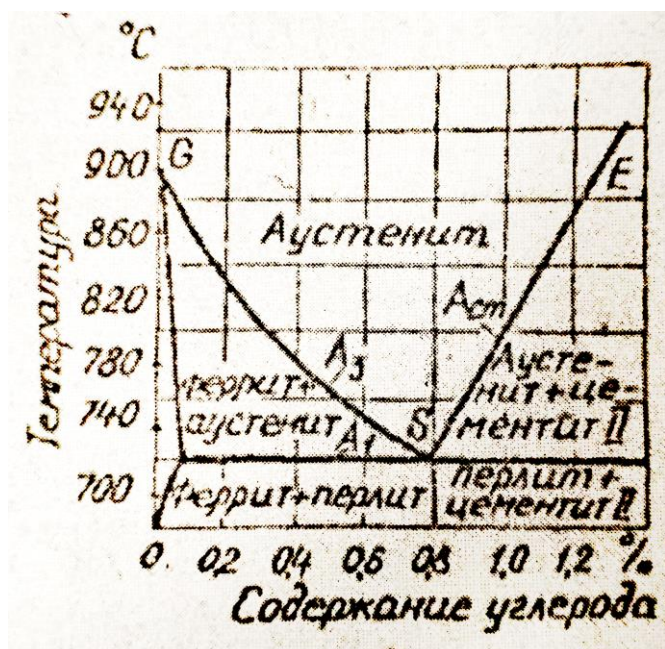


Рис. 3. Левый нижний угол диаграммы состояний системы железо цементит.

Время нагрева стали под закалку определяется временем, необходимым для превращения исходной структуры в аустенит.

Общее время нагрева складывается из времени нагрева до заданной температуры τ_n и времени выдержки при этой температуре τ_v :

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

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

Практически величина τ_v может быть принята равной 1 мин для углеродистых и 2 мин для легированных сталей. При нагреве крупных деталей величиной τ_v можно пренебречь.

Так как время нагрева зависит от многих факторов и на практике колеблется от 1-2 мин (нагрев мелких деталей в соли) до многих часов (нагрев крупных деталей тяжелого машиностроения в печи), точно установить время нагрева можно лишь опытным путем для данной детали в данных конкретных условиях. Приближенное значение рассчитывается по формуле:

$$\tau_n = 0,1 D_1 K_1 K_2 K_3 \quad (2)$$

Где D_1 - размерная характеристика изделия (минимальный размер максимального сечения), мм;

K_1 - коэффициент среды (для газа – 2, соли – 1, металла – 0,5);

K_2 - коэффициент формы (для шара – 1, цилиндра – 2, параллелепипеда – 2,5, пластины - 4);

K_3 – коэффициент равномерности нагрева (всесторонний нагрев – 1, односторонний - 4).

Указанная методика расчета τ_n относится к нагреву примерно до 800-900°C.

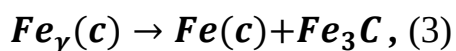
В таблице 2 предоставлены нормы нагрева стали на один миллиметр диаметра для круга и на один миллиметр толщины для квадрата при термической обработке в лабораторных электрических печах.

Температура нагрева, °C	Продолжительность нагрева, мин	
	Круг	Квадрат
600	2	3
700	1,5	2,2
800	1,0	1,5
900	0,8	1,2
1000	0,4	0,6

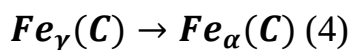
Таблица 2

Скорость охлаждения стали определяется получением требуемой структуры. В зависимости от скорости охлаждения различают два принципиально отличных друг от друга превращения в стали:

- диффузионное превращение, при котором происходит распад аустенита на феррито-цементитную смесь:



- бездиффузионное, при котором происходит превращение аустенита в мартенсит:



Наименьшая скорость охлаждения, при которой происходит превращение аустенита в мартенсит, является критической скоростью закалки. При охлаждении стали со скоростью ниже критической (рис. 4) ($V_1 < V_2 < V_3 < V_{кр}$) происходит превращение (3), в результате которого образуется феррито-цементитная смесь (перлит, сорбит, троостит). Эти структуры отличаются друг от друга степенью дисперсности цементита. Чем больше скорость охлаждения, тем выше дисперсность

феррито-цементитной смеси. При переохлаждении ($V_{охл} < V_{кр}$), когда невозможны диффузные процессы, происходит бездиффузионное (4) превращение аустенита в мартенсит, при котором не наблюдаются изменения состава фаз. В решетке мартенсита остается то же количество атомов углерода, которое имелось в решетке аустенита. При мартенситном превращении происходит лишь переход кубической гранецентрированной решетки аустенита в кубическую (тетрагональную) объемно-центрированную решетку мартенсита.

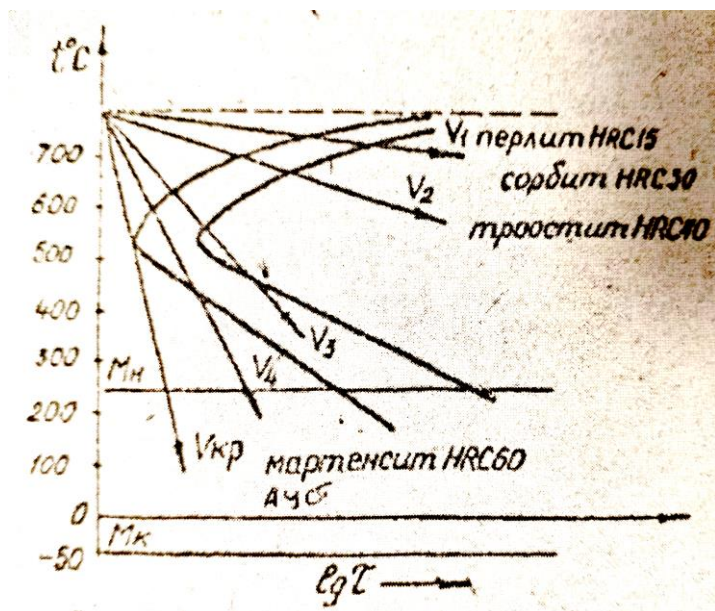


Рис. 4 Диаграмма изотрического превращения аустенита

Поэтому мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. Мартенситное превращение происходит в интервале температур $M_H - M_K$. Температура мартенситного превращения не зависит от скорости охлаждения, а зависит от химического состава стали. При увеличении содержания углерода в углеродистой стали температуры M_H и M_K понижаются, и в сталях, содержащих более 0,4% углерода, температура конца мартенситного превращения M_K становится ниже нормальной, поэтому структура закаленной стали будет состоять из мартенсита и небольшого количества остаточного аустенита. Таким образом, в зависимости от скорости охлаждения стали получают различные структуры, имеющие различные свойства.

Мартенсит обладает наибольшей твердостью и в то же время хрупок. Твердость мартенсита составляет **HRC 60-65**. Чем больше в стали углерода, тем выше твердость мартенсита.

Троостит имеет меньшую твердость (**HRC 40-45**) и прочность, чем мартенсит, но обладает большей вязкостью. Его твердость **HRC 25-35**.

Перлит обладает наименьшей твердостью (**HRC 15-20**) и прочностью.

Во второй части работы студенты изучают структуру стали после различных видов термической обработки.

Принято различать четыре основных вида термической обработки стали: отжиг, нормализацию, закалку и отпуск.

Отжиг заключается в нагреве стали до температуры выше критических точек A_{C3} (полный отжиг) или A_{C1} (неполный отжиг) с последующим медленным охлаждением стали. Скорость охлаждения соответствует лучу V_1 (см. рис.4). В результате отжига получается перлитная структура, сопровождаемая ферритом (в доэвтектоидной стали) и цементитом (в заэвтектоидной стали). Отжиг Придает стали высокую пластичность и низкую твердость.

Перегрев стали при отжиге приводит к значительному росту аустенитного зерна, а при последующем медленном охлаждении – к образованию видманштеттовой структуры. Например, если сталь, содержащую 0,4% С, подвергнуть отжигу при 1000-1100°C, то несмотря на те же фазы, величина зерен, их форма и расположение будут иными (рис. 5). Для видманштеттовой структуры характерно выделение феррита в виде игл (пластин), расположенных внутри перлита по определенным кристаллографическим плоскостям. Сталь с такой структурой имеет более низкую вязкость. Перегретую сталь можно сделать снова мелкозернистой если подвергнуть её полному отжигу при оптимальной температуре нагрева.

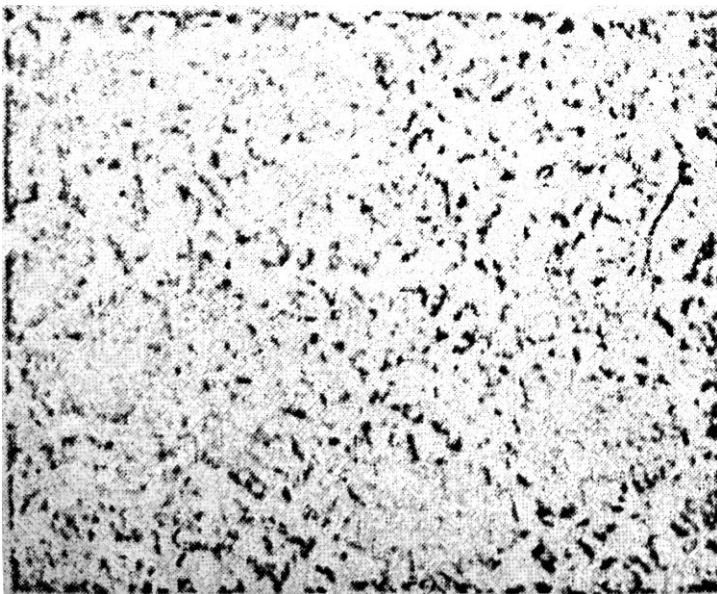


Рисунок 5. Сталь (0,4% С) после отжига при 1000°C. Феррит и перлит (видманштеттовая структура) x200.

В заэвтектоидной стали после неполного отжига, т.е. нагрева до температуры $A_{C1} + (20-50^\circ\text{C})$ и длительной выдержки с последующим медленным охлаждением вместе с печью, образуется структура, состоящая из перлита и вторичного цементита, причем цементит перлита и вторичный цементит находятся в виде зерен. Образуется зернистый перлит. Сталь со структурой зернистого перлита обладает более низкой

твердостью и прочностью, но повышенной вязкостью и лучшей обрабатываемостью режущим инструментом по сравнению со сталью, имеющей структуру пластинчатого перлита, поэтому заэвтектоидные стали отжигают на зернистый перлит.

Нормализация состоит в нагреве стали до температуры выше критической точки A_{C3} (или A_{cm}) с последующим охлаждением на воздухе. В результате нормализации получается мелкопластинчатый перлит (сорбит). Скорость охлаждения стали при нормализации соответствует лучу V_2 (см. рис.4). В результате нормализации сталь, содержащая более 0,3% углерода, несколько упрочняется, пластичность ее понижается, сталь с меньшим содержанием углерода остается мягкой, пластичной.

Закалка стали на мартенсит приводит к резкому возрастанию твердости, прочности, износоустойчивости при сильном снижении пластичности. Скорость охлаждения при закалке на мартенсит (см. рис. 4) должна быть больше V_{KP} . Мартенсит имеет характерное игольчатое строение. Размеры игл (пластин) мартенсита определяются размером исходного зерна аустенита. Чем мельче зерно аустенита, тем меньше протяженность иглы мартенсита. В связи с этим, чем выше температура нагрева стали под закалку, тем крупнее будут иглы мартенсита и выше хрупкость. На рис.6 показана структура стали, содержащей 0,4% C, после нормальной закалки при 860°C в воде. Получившаяся структура – мелкоигольчатый мартенсит.

На рис.7 показана структура стали, содержащей 0,4% C, после закалки при 1000°C в воде. Видны крупные иглы мартенсита и их различная направленность в каждом зерне.

Под отпуском понимают нагрев закаленной стали на мартенсит до температуры ниже критической точки A_{C1} с последующим охлаждением. Целью отпуска является устранение внутренних напряжений и получение требуемых механических свойств.

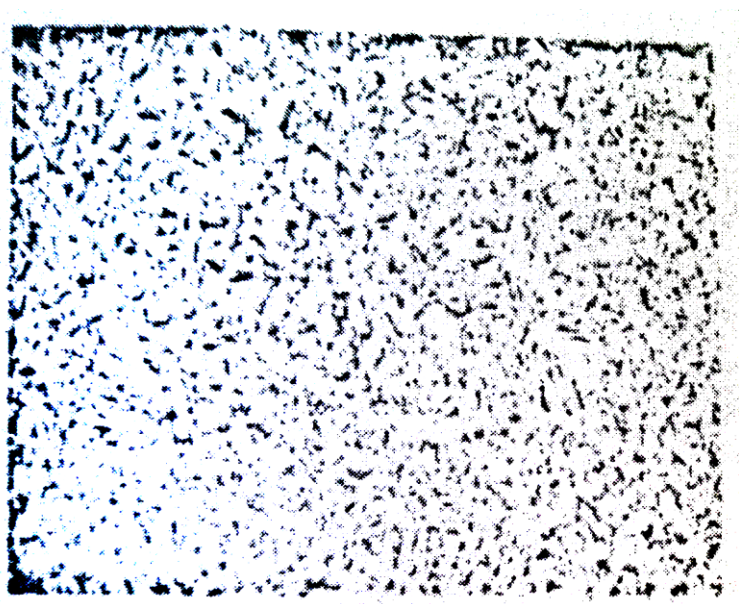


Рис.6. Сталь (0,4% C) после нормальной закалки при 860°C в воде. Мелкоигольчатый мартенсит x 200.

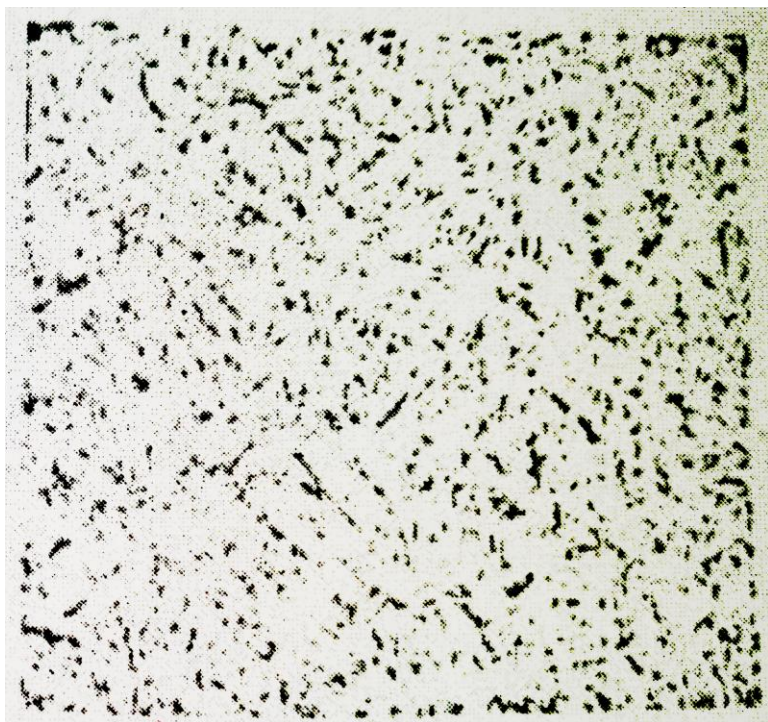


Рис.7. Сталь (0,4% C) после закалки при 1000°С в воде. Крупноигольчатый мартенсит х 200.

При отпуске закаленной стали наблюдается четыре превращения:

1. При нагреве в интервале температур 80-180°С происходит уменьшение тетрагональности решетки мартенсита в связи с выделением из нее атомов углерода в виде высокодисперсных, еще не обособившихся частиц карбида железа. Образуется мартенсит отпуска.
2. При нагреве в интервале температур 200-300°С остаточный аустенит, который всегда в том или ином количестве содержится в закаленной стали, превращается в отпущенный мартенсит.
3. При нагреве в интервале температур 300-400°С происходит полное превращение мартенсита в феррито-цементитную смесь, при этом образуется троостит отпуска.

При нагреве выше 400°С происходит укрупнение (коагуляция) мелких частиц цементита. При этом образуется сорбит отпуска.

Таким образом, троостит и сорбит можно получить не только на аустенита непосредственно закалкой, но и путем отпуска мартенсита, при этом структура троостита и сорбита отпуска зернистая, а не пластинчатая, как структура троостита и сорбита закалки. Троостит и сорбит отпуска имеют большую вязкость при той же прочности по сравнению с трооститом и сорбитом закалки.

В зависимости от температуры нагрева различают три вида отпуска: низкий, средний, высокий.

Низкий отпуск производится при температуре 150-200°C для уменьшения внутренних напряжений и повышения вязкости с сохранением высокой твердости: образующаяся структура в результате отпуска – отпущенный мартенсит ($HRC \geq 60$). Низкому отпуску обычно подвергают мерительный инструмент и режущий инструмент. На рис.8 показана структура заэвтектоидной стали, содержащей 1,2% C после закалки при 770°C в воде и последующего отпуска при 150°C. Структура состоит из мартенсита отпуска и зерен вторичного цементита.

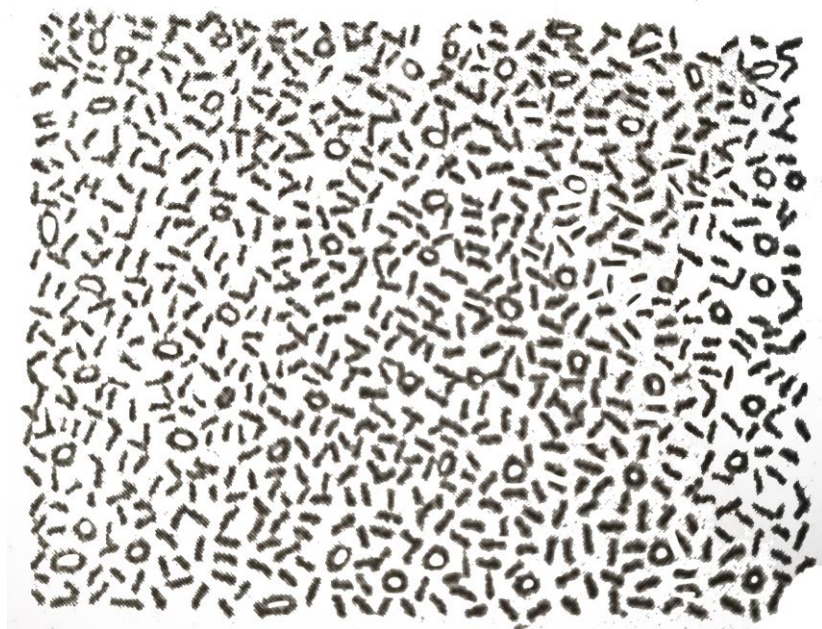


Рис.8. Сталь (1,2% C). Закалка при 770°C в воде и отпуск при 150°C. Мартенсит отпуска и цементит (схема микроструктуры).

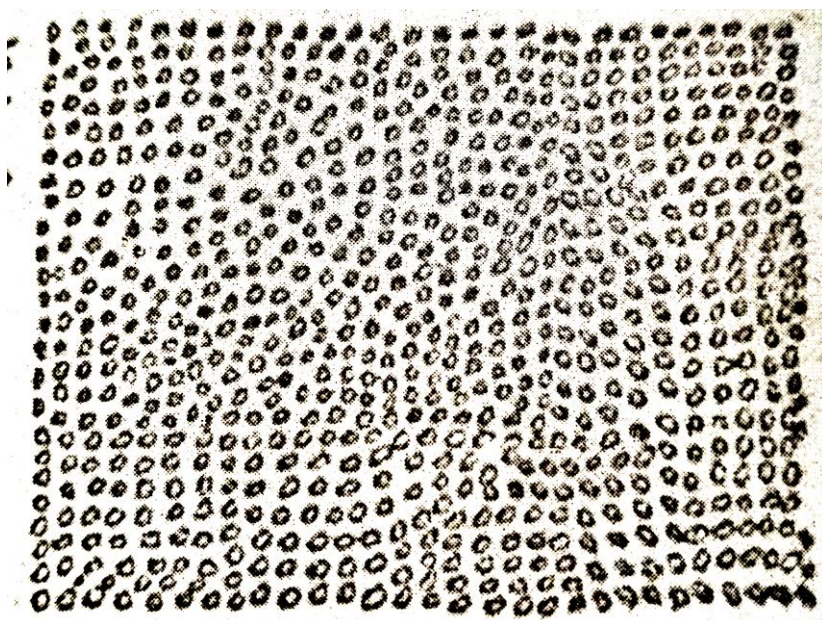


Рис.9. Сталь (0,4% C). Закалка при 860°C в воде и отпуск при 550°C. Сорбит отпуска (схема микроструктуры).

Средний отпуск производится при температуре 300-450°C. При этом происходит значительное понижение твердости, прочности, повышение вязкости и предела

упругости. Полученная структура отпущенной стали – троостит (**HRC 40**). Среднему отпуску подвергаются пружины и рессоры.

Высокий отпуск производится при 500-650°C. Цель высокого отпуска - получение высокой вязкости и пластичности при достаточной прочности. Микроструктура – сорбит (рис.9), твердость **HRC 30**.

Условия образования структурных составляющих определяется по диаграмме состояния **Fe - Fe₃C** и **C** –образная кривой изометрического превращения аустенита. Изучение структуры стали после термической обработки производится на металлографическом микроскопе на заранее подготовленных образцах. Рисунок микроструктуры должен передавать характерные особенные структуры.

Оборудование и материалы: образцы углеродистой до- и заэвтектоидной стали диаметром 10-15мм, высотой 15-20 мм; печи с термоэлектрическими пирометрами, бачки с водой и маслом, щипцы, наждачная бумага, прибор Роквелла, металлографический стали после термообработки и альбом микрофотографий.

Порядок проведения работы

- I. Практика термической обработки.
 1. Определить твердость образцов до закалки.
 2. Провести закалку и нормализацию образцов по установленному режиму.
 3. Определить твердость образцов после охлаждения.
 4. Произвести отпуск закаленных в воде образцов.
 5. Определить твердость отпущенных образцов.
 6. Результаты измерений твердости образцов после закалки и отпуска занести в табл.3.

Таблица 3

Марка стали	Размер образца	Закалка			Твердость	Отпуск			Твердость	Структура
		температура нагревания, °C	время выдержки, мин	охлаждающая среда		температура нагревания, °C	время выдержки, мин	охлаждающая среда		

7. Построить график измерения твердости в зависимости от скорости охлаждения для доэвтектоидной и заэвтектоидной стали.

8. Построить график изменения твердости в зависимости от температуры отпуска для доэвтектоидной стали.
 9. Проанализировать экспериментальные кривые, показать влияние скорости охлаждения и температуры отпуска на твердость стали.
 10. Составить отчет. В отчете поместить таблицу 3; описать превращения, происходящие в заданном сплаве при нагревании, охлаждении и отпуске; также построить графики зависимости твердости от скорости охлаждения и температуры отпуска. Сделать выводы.
- II. Микроанализ углеродистой стали после термической обработки.
1. Исследовать под микроскопом шлифы углеродистой стали после отжига, закалки и отпуска.
 2. Каждую микроструктуру зарисовать. Указать содержание углерода в стали, вид термической обработки и ее режим, наименование структуры, увеличение микроскопа и травитель.
 3. Составить отчет, в котором поместить рисунки микроструктур с соответствующими пояснениями.