

Лабораторная работа № 10

Термическая обработка углеродистой стали с фазовой перекристаллизацией

Введение

Лабораторный практикум является одним из видов учебной работы студентов, имеющих большие возможности для реализации принципа связи теории с практикой. Основная задача лабораторного практикума состоит в экспериментальном подтверждении студентами теоретических положений изучаемых курсов, в расширении и углублении их научно-теоретических основ.

Не менее важна решаемая на лабораторных занятиях задача обучения студентов постановки и проведения эксперимента, обработки экспериментальных данных, анализа полученных результатов и сравнения их с теоретическими данными.

Лабораторный практикум преследует цель формирования у студентов навыков и умений работы с приборами, установками, измерительной аппаратурой, нагревательными устройствами и др.

Лабораторный практикум способствует развитию у студентов элементов творческой активности и исследовательской деятельности. Он является важным звеном связи между лекционным курсом, практическими занятиями, курсовым проектированием и учебно-исследовательской работой (УИР), важным этапом подготовки студентов к выполнению выпускной квалификационной работы с развитой исследовательской частью.

При выполнении лабораторной работы у студента формируются профессиональные компетенции - способность использовать методы стандартных испытаний для определения механических свойств и технологических показателей материалов.

Выполнив лабораторную работу, студент должен:

Знать:

- методы стандартных испытаний по определению механических
- оборудование для стандартных испытаний.

Уметь:

- применять методы и оборудование для стандартных испытаний.

Иметь навыки:

- работы на испытательном оборудовании для стандартных испытаний;
- анализа полученных результатов в соответствии с техническим заданием.

На каждое занятие студент должен являться подготовленным к предстоящим работам и с предварительным отчетом, составленным в соответствии с требованиями к нему. Отчеты составляются по каждой лабораторной работе, аккуратно и грамотно, в тексте не следует допускать сокращенных записей.

Чертежи и графики сопровождаются необходимыми пояснениями. Применяемые термины и обозначения должны соответствовать ГОСТам.

Перед выполнением лабораторной работы у студентов проверяется наличие составленного предварительного индивидуального отчета по работе, а также теоретическая подготовленность студентов методом их устного опроса по контрольным вопросам, приведенным в конце описания работ или по специальным тестам.

Студенты, не имеющие составленного индивидуального отчета, и не готовые к ответу на контрольные вопросы к выполнению лабораторных работ не допускаются. Таким студентам следует отработать эту работу со студентами другой группы или в конце семестра.

По окончании лабораторного практикума каждый студент обязан сдать зачет по всему лабораторному циклу, запланированному на семестр, независимо от того, предусмотрен учебным планом зачет по данной дисциплине или нет.

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является:

- изучение разновидностей термической обработки углеродистых сталей с фазовой перекристаллизацией;
- установление влияния скорости охлаждения при термической обработке углеродистых сталей с фазовой перекристаллизацией с содержанием углерода 0,45 и 0,8 % на их твердость;
- определение влияния углерода на твердость стали после отжига, нормализации, одинарной обработки и закалки.

2. Задачи лабораторной работы

Задачами лабораторной работы являются:

- приобретение умений и навыков эксплуатации термического оборудования и приборов контроля температуры;
- получение навыков выбора температурного режима при термической обработке углеродистых сталей с фазовой перекристаллизацией;
- дальнейшее закрепление, углубление и расширение знаний студентов в области теории термической обработки углеродистых сталей;
- выработка способностей осмысления самостоятельно полученных данных при выполнении экспериментальной части лабораторной работы.

3. Теоретическая часть

Углеродистые стали являются дешевыми и технологичными конструкционными материалами. Помимо железа и углерода, они содержат некоторое количество примесей. Однако именно углерод оказывает решающее влияние на структуру и свойства сталей. Кроме того, структурой и свойствами сталей можно управлять при помощи термической обработки. Возможность термической обработки сталей основана на фазовой перекристаллизации, связанной с

полиморфизмом железа, а также с различной растворимостью углерода в α -, γ -железе.

Под фазовой перекристаллизацией понимают разнообразные фазовые превращения (полиморфные, эвтектоидные, перитектоидные, растворение одной фазы в другой при нагреве и выделение при охлаждении), протекающие в твердом состоянии.

В соответствии с диаграммой состояния сплавов системы $Fe-Fe_3C$ в сталях в равновесном состоянии присутствует две фазы: **феррит** - твердый раствор внедрения углерода в железе с ОЦК решеткой и **цементит** - химическое соединение железа Fe_3C .

Всё разнообразие процессов термической обработки сталей с фазовой перекристаллизацией основано на влиянии скорости охлаждения на механизм и кинетику превращения аустенита, рассмотрим это на примере эвтектоидной стали, содержащей 0,8 % углерода.

3.1. Влияние степени переохлаждения на параметры фазовой перекристаллизации

Одним из основных превращений, протекающих во время охлаждения - это эвтектоидный распад аустенита на ферритно-цементитную смесь. Для прохождения этого превращения необходимо выполнение двух условий:

- 1) наличие термодинамической движущей силы превращения;
- 2) высокой диффузионной подвижности атомов.

Термодинамической движущей силой превращения аустенита в ферритно-цементитную смесь является выигрыш в свободной энергии в результате перехода стали в термодинамически более устойчивое состояние.

Как видно из рисунка 1. при температуре A_1 , распад аустенита на ферритно-цементитную смесь не происходит, поскольку свободные энергии этих фаз равны.

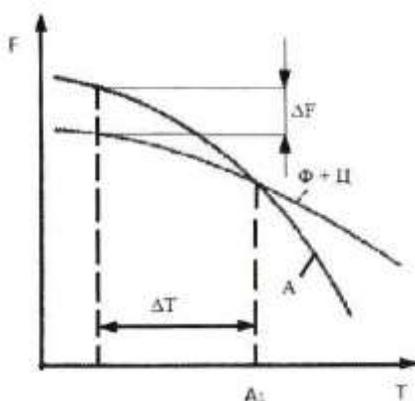


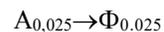
Рис. 1. Изменение свободных энергий аустенита (А) и ферритно-цементитной смеси в зависимости от степени переохлаждения

Преобразование может происходить только при некоторой степени переохлаждения ΔT , когда свободная энергия ферритно-цементитной смеси будет меньше свободной энергии аустенита на величину ΔF . Разницу в уровнях свободной энергии называют термодинамической движущей силой превращения. Чем больше степень переохлаждения, которая определяется скоростью охлаждения, тем выше движущая сила превращения аустенита в ферритно-цементитную смесь и тем быстрее должен происходить процесс распада аустенита.

Однако, картина превращения осложняется тем, что для его протекания необходимо развитие диффузии, поскольку продукты распада имеют состав, отличный от состава аустенита: из аустенита с 0,8%С должно образоваться почти чистое α -железо и цементит, в котором содержится 6,67% углерода. Процесс развивается таким образом, что сначала из аустенита выделяется цементит:



а затем обедненный углеродом аустенит претерпевает полиморфное превращение

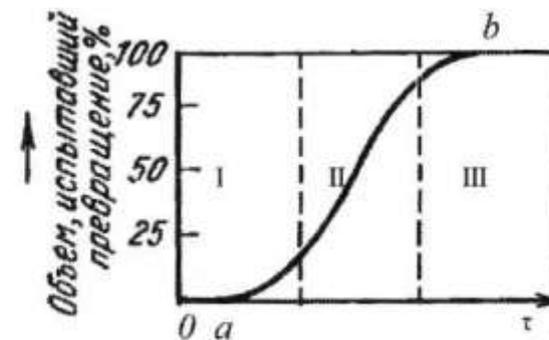


При понижении температуры превращения диффузионные процессы замедляются, что затрудняет процесс распада аустенита на ферритно-цементитную смесь.

Учет обоих факторов приводит к тому, что в начале скорость распада аустенита на ферритно-цементитную смесь увеличивается, а затем уменьшается.

3.2. Изотермический распад аустенита

Анализ кинетики превращения аустенита в ферритно-цементитную смесь удобно проводить при помощи экспериментально построенных диаграмм изотермического распада. Для построения этих диаграмм проводят следующие эксперименты. Образец нагревают до аустенитного состояния, затем его быстро переносят в среду с температурой меньше A_1 и выдерживают при этой температуре, следовательно, распад аустенита происходит в изотермических условиях. При этом фиксируют время начала и конца изотермического превращения аустенита в ферритно-цементитную смесь. Зависимость полноты распада аустенита от времени изотермической выдержки выражается кинетической кривой (рис. 2). Скорость распада вначале возрастает (I), достигая максимума к тому времени, когда превратилось около 50% аустенита в ферритно-цементитную смесь (II), затем затухает вследствие уменьшения количества остающегося аустенита (III).



Точка «а» соответствует началу, точка «б» - концу распада аустенита на ферритно-цементитную смесь. Oa - время до начала распада аустенита называется инкубационным периодом или временем устойчивости переохлажденного аустенита.

По кинетическим кривым для разных степеней переохлаждения строится С-образная диаграмма распада переохлажденного аустенита (рис. 3). Кривая $a-a'$ — область существования переохлажденного аустенита. Между $a-a$ и $b-b'$ идет распад аустенита на ферритно-цементитную смесь, правее $b-b'$ - область существования ферритно-цементитной смеси.

Как видно, аустенит наименее устойчив в температурном диапазоне 550...600 °С.

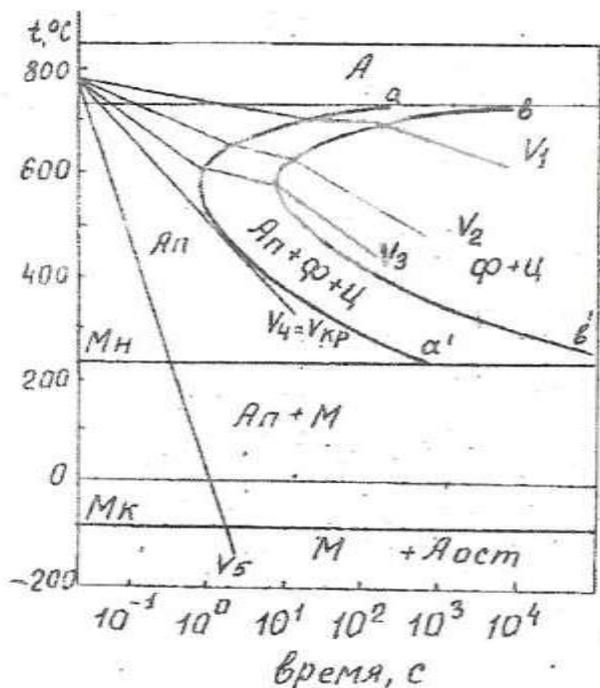


Рис. 3. Диаграмма превращения переохлажденного аустенита для стали с 0,8 % С: А — аустенит устойчивый; Ап — аустенит переохлажденный; Аост - аустенит остаточный; Ф - феррит; М - мартенсит; Ц - цементит

3.3. Влияние скорости непрерывного охлаждения на механизм и кинетику распада переохлажденного аустенита

Для выяснения влияния скорости непрерывного охлаждения на механизм и кинетику распада переохлажденного аустенита и формирование структуры стали при охлаждении, на С-образную диаграмму распада наложим различные скорости непрерывного охлаждения ($V_1 < V_2 < V_{KP} < V_4 < V_5$).

Было доказано, что наложение кривых непрерывного охлаждения на диаграмму изотермического превращения, не даёт количественно правильных значений, но качественные закономерности процесса подтверждаются.

При пересечении линии медленной скорости непрерывного охлаждения V_1 с линией начала распада переохлажденного аустенита на ферритно-цементитную смесь (рис. 3), число степеней свободы системы ($C = K+1-\Phi$) может быть равно нулю и в течение некоторого времени идёт распад. При этом необходимо иметь в виду, что правило фаз применимо исключительно для рассмотрения равновесного состояния сплавов. По завершении распада число степеней свободы становится отличным от нуля, что ведет к увеличению скорости охлаждения.

При увеличении скорости охлаждения правило фаз неприемлемо и кривые непрерывного охлаждения V_2, V_3 на участке начала и конца изотермического распада переохлажденного аустенита в ферритно-цементитную смесь в виду отставания диффузионных процессов не будут горизонтальными. Чем выше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения и тем при меньшей температуре начинается распад аустенита.

По мере снижения температуры начала распада аустенита растет термодинамическая движущая сила распада и, в соответствии с теорией фазовых превращений, увеличивается скорость образования зародышей новых фаз. Это ведет к повышению дисперсности ферритно-цементитной смеси. Частицы цементита являются эффективными препятствиями для движущихся дислокаций, поэтому повышение дисперсности ферритно-цементитной смеси приводит к росту прочности стали.

Если скорость охлаждения настолько велика (V_5 , рис. 3), что кривая охлаждения не попадает в поле распада аустенита на ферритно-цементитную смесь, то аустенит не успевает распасться

на феррит и цементит. Минимальная скорость охлаждения, при которой прекращается распад аустенита на ферритно-цементитную смесь называется критической скоростью охлаждения.

При температурах ниже A_{r1} ГЦК решетка аустенита неустойчива и в связи с полиморфным превращением она должна превратиться в ОЦК решетку, типичную для феррита. Но поскольку скорость диффузии при этих температурах небольшая, то начинается бездиффузионное полиморфное превращение. Однако, растворимость углерода в ОЦК решетке очень мала и не успевший выделиться из аустенита углерод деформирует кристаллическую решетку, превращая её из объемно-центрированной кубической в объемно-центрированную тетрагональную (рис. 4).

При этом отношение c/a , которое всегда больше единицы, называют степенью тетрагональностиTM. С увеличением содержания углерода в стали степень тетрагональностиTM растет и определяется по эмпирической формуле

$$c/a = 1 + 0,046 C,$$

где C - содержание углерода в стали, в % по массе.

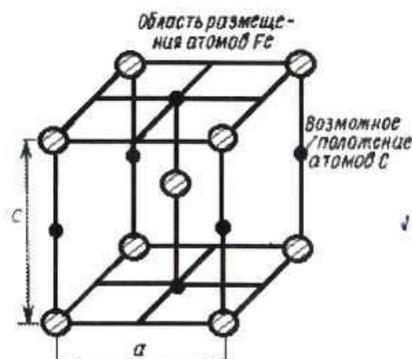


Рис. 4. Кристаллическая решетка мартенсита

Фазу с объемно-центрированной тетрагональной решеткой называют **мартенситом**. Другими словами, мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -Fe с той же концентрацией углерода, что и в исходном аустените.

Поскольку углерод деформирует решетку мартенсита, то объем мартенсита становится на несколько процентов больше объема исходного аустенита.

Мартенситное превращение при содержании углерода более 0,4% практически никогда не бывает полным, т.е. в стали остается какое-то количество аустенита, называемого остаточным. Затрудненность распада последних порций аустенита связана с появлением значительных сжимающих напряжений, возникающих вследствие увеличения объема мартенсита при бездиффузионном превращении, что является одной из причин значительного повышения его твердости.

Остаточный аустенит понижает твердость закаленной стали и может вызвать нестабильность размеров готовых деталей, так как, будучи нестабильной фазой, способен к распаду при низкой температуре с малой скоростью. Для стабилизации размеров закаленных изделий и повышения их твердости проводится охлаждение до температуры M_k в процессе которого остаточный аустенит превращается в мартенсит. Такой способ термической обработки с целью устранения остаточного аустенита называется обработкой холодом.

Превращение аустенита в мартенсит начинается при определенной температуре, называемой температурой начала мартенситного превращения и обозначаемой M_n .

При достижении определенной температуры дальнейшее превращение аустенита в мартенсит прекращается. Эта температура называется концом мартенситного превращения и обозначается M_k .

Положение температур (точек) M_n и M_k не зависит от скорости охлаждения и определяется содержанием углерода в стали. Чем больше углерода в стали, тем ниже располагаются эти температуры, причем при увеличении содержания углерода интервал мартенситного превращения сужается (рис. 5).

Мартенситное превращение происходит сдвиговым путем, путем кооперативного, взаимосвязанного перемещения атомов на расстояния, меньше межатомных. Это сопровождается чрезвычайно сильным ростом плотности дислокаций, достигающей $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Академик Г.В. Курдюмов дал классическое определение мартенситного превращения: «Мартенситное превращение состоит в закономерной перестройке решетки, при которой атомы не

обмениваются местами, а лишь смещаются на расстояния, не превышающие межзатомные». Кристаллы мартенсита, имея пластинчатую форму, растут с огромной скоростью, равной скорости звука в стали (~5000 м/с).

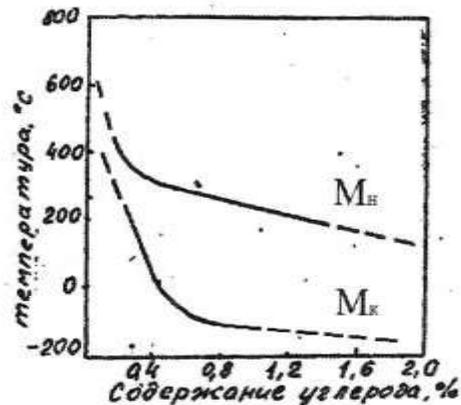


Рис. 5. Зависимость температур начала (M_n) и конца (M_k) мартенситного превращения от содержания углерода в стали

Первые кристаллы мартенсита обычно ориентированы один по отношению к другому под углом 60 или 120°. Размеры пластинок мартенсита определяются величиной исходного зерна аустенита. В плоскости шлифа пластинки имеют вид игл, поэтому в микроскопе видна игольчатая структура.

Высокая твердость мартенсита обусловлена прежде всего образованием пересыщенного твердого раствора в α -железе, повышением плотности дислокаций при мартенситном превращении как в мартенсите, так и в остаточном аустените и другими факторами.

В доэвтектоидных сталях перлитному превращению должно предшествовать выделение избыточного феррита. На диаграмме изотермического превращения должна быть нанесена линия начала образования избыточного феррита (рис. 6). При непрерывном охлаждении избыточный феррит начинает образовываться при переохлаждении аустенита ниже точки A_3 и продолжает зарождаться и расти до температур ниже точки A_1 . При увеличении количества феррита углерод накапливается в аустените, т.к. в феррите его

содержание не может превышать 0,025%. При температурах ниже A_1 в этих обогащенных углеродом участках аустенита могут зародиться цементитный кристалл и соответственно перлитная колония. Для этого состав аустенита не обязательно должен достигать концентрации 0,8% С. В перлите (сорбите, троостите), образовавшемся из аустенита с содержанием менее 0,8% С, увеличена доля ферритных промежутков. Такой эвтектиод с повышенным содержанием феррита был назван квазиэвтектиодом.

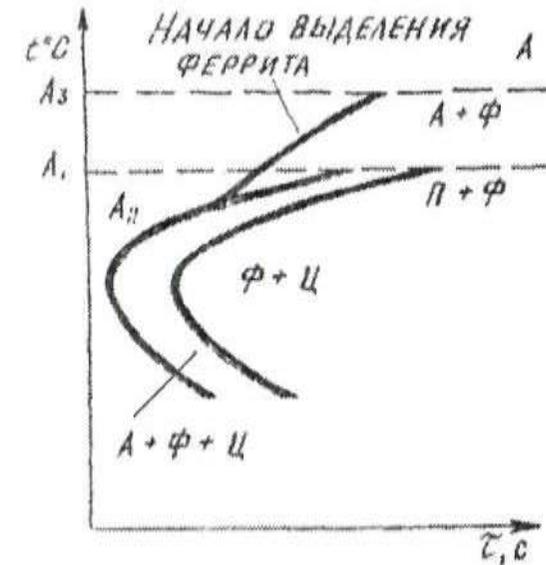


Рис. 6. Диаграмма изотермического распада доэвтектоидной стали

Относительное количество выделившегося феррита зависит от скорости охлаждения (степени переохлаждения) аустенита. С увеличением скорости охлаждения доэвтектоидной стали приводит к уменьшению количества выделившегося феррита и увеличению количества квазиэвтектиода. При достаточно большой степени переохлаждения (250...300 °С) образование феррита в виде самостоятельной структурной составляющей полностью предотвращается и сталь доэвтектоидного состава приобретает чисто квазиэвтектиодную структуру.

3.4. Практика термической обработки углеродистых сталей 45 (ГОСТ 1050-88) и У8 (ГОСТ 1435-99) с фазовой перекристаллизацией

При термической обработке с фазовой перекристаллизацией сталь 45 нагревают до температуры выше точки $A_{c3} + (30...50\text{ }^{\circ}\text{C})$, а сталь У8 до температуры выше точки $A_{c1} + (50...70\text{ }^{\circ}\text{C})$. выдерживают при этих температурах для полного завершения фазовых превращений и выравнивания химического состава аустенита.

В зависимости от целей термообработки используются следующие разновидности фазовой перекристаллизации:

1. **Отжиг.** При отжиге после нагрева и выдержки сталь охлаждают вместе с печью. Скорость охлаждения составляет $1...2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в минуту. После охлаждения формируется ферритно-цементитная смесь с межпластиночным расстоянием $0.7...0.9\text{ мкм}$ (рис. 7.). Такую смесь принято называть перлитом. Применяется для смягчения стали и подготовке ее к дальнейшей обработке резанием и холодной обработке давлением. Отжиг - малопроизводительная и поэтому дорогая операция. Твердость стали составляет $190...230\text{ НВ}$.

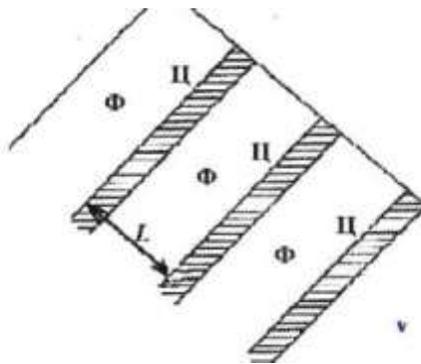


Рис. 7. Схема строения перлита (ферритно - цементитной смеси).
 L - межпластиночное расстояние, равное сумме толщины пластин феррита и цементита

2. **Нормализация.** После нагрева и выдержки сталь охлаждается на воздухе. Скорость охлаждения составляет $1...2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в секунду. После охлаждения формируется феррито-цементитная смесь

с межпластиночным расстоянием $0,3...0,4\text{ мкм}$. Полученную смесь называют сорбитом. Применяется для устранения крупнозернистой структуры и улучшения обрабатываемости резанием. Нормализация является более дешёвой операцией и часто используется вместо отжига. Твердость составляет $250...300\text{ НВ}$.

3. **Одинарная обработка,** которая применяется взамен двойной окончательной термообработки — закалки и последующего отпуска.

После нагрева и выдержки сталь охлаждается в минеральных маслах. Скорость охлаждения составляет $100...150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в секунду. После охлаждения формируется дисперсная ферритно-цементитная смесь с межпластиночным расстоянием $0,1...0,2\text{ мкм}$. Полученную смесь называют трооститом. Твердость составляет $350...450\text{ НВ}$.

4. **Закалка** применяется для повышения твердости деталей. После нагрева и выдержки сталь охлаждается со скоростью больше критической, что обеспечивается при охлаждении в воде. Скорость охлаждения составляет $300...500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в секунду. Полученную структуру называют мартенситом. Твердость стали составляет $600...650\text{ НВ}$.

4. Задание и методика выполнения работы

Для выполнения лабораторной работы необходимо:

1. Получить 4 образца сталей 45 и У8.
2. По диаграмме состояния Fe-Fe₃C выбрать температуру нагрева образцов.
3. Определить выдержку образцов в печи из расчета 1 минута на 1 мм толщины образца.
4. Поместить образцы в печь, нагреть до заданных температур и выдержать после прогрева необходимое время.
5. По окончании выдержки образцов в печи охладить по одному образцу каждой стали следующим образом:
 - в воде при интенсивном помешивании;
 - в масле при интенсивном помешивании;
 - на спокойном воздухе;
 - вместе с печью.

6. После охлаждения зачистить торцы образцов на наждачной бумаге для удаления окалины и измерить твердость.
7. Результаты измерения внести в таблицу и построить графики зависимости твердости от скорости охлаждения в координатах $HV \sim V_{охл}$.

Таблица

Результаты измерений

Марка стали	Структура после нагрева	Способ охлаждения	Твердость после охлаждения			Структура после охлаждения	Название термообработки
			HRB	HRC	HV		
45							
У8							

5. Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Краткое изложение теоретической части.
3. Материал исследования.
4. Порядок выполнения работы.
5. Экспериментальные данные в виде таблицы и графика.
6. Объяснение полученных результатов.
7. Выводы по работе.

6. Критерии результативности лабораторного практикума

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- приобрел навыки эксплуатации термического оборудования при выполнении практической части лабораторной работы;

- научился грамотно выбирать режимы термической обработки углеродистых сталей;
- в соответствии с методикой выполнил практическую часть лабораторной работы;
- освоил методику обработки экспериментальных данных и на их основании строить графики;
- четко и грамотно ответил на контрольные и дополнительные вопросы при защите лабораторной работы.

7. Меры по технике безопасности при выполнении лабораторного практикума

Перед началом лабораторного практикума в каждой лаборатории проводится инструктаж студентов по технике безопасности данной лаборатории и студенты расписываются в контрольном листе инструктажа.

Кроме того, в каждой лаборатории находятся инструкции по пожарной безопасности и электробезопасности.

Контрольные вопросы

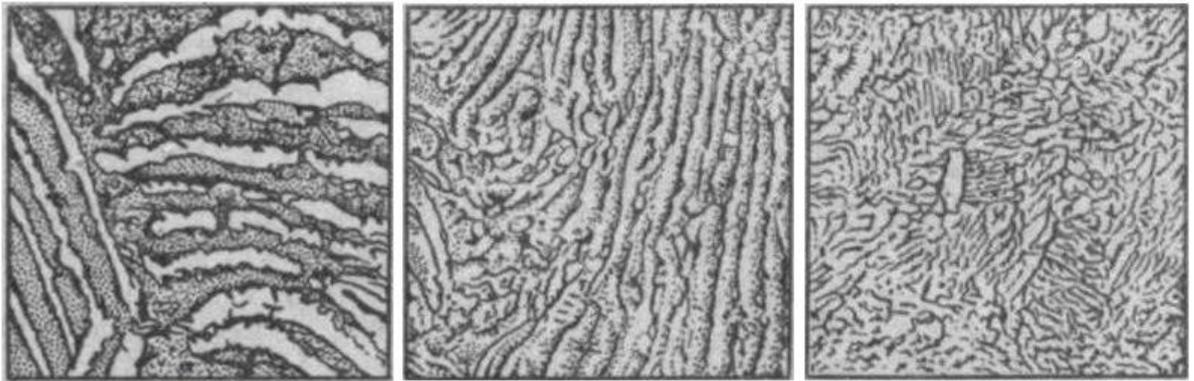
1. Как называется термообработка стали, состоящая в нагреве её выше $A_{с3}$ или $A_{с1}$, выдержке и последующем охлаждении вместе с печью?
2. Как называется термообработка стали, состоящая в нагреве её выше $A_{с3}$ или $A_{с1}$, выдержке и охлаждении со скоростью больше критической?
3. Как называется термообработка стали, состоящая в нагреве её до аустенитного состояния и последующего охлаждения на спокойном воздухе?
4. При какой температуре проводится полный отжиг стали У8 и стали 45?
5. Какие стали подвергаются неполной закалке?

6. Чем объясняется более высокая твердость троостита по сравнению с перлитом?
7. Как называется эвтектоидная смесь феррита и цементита?
8. В какой последовательности формируется структура при увеличении скорости охлаждения аустенита в температурном интервале перлитного превращения?
9. Что такое мартенсит?
10. Чем объясняется более высокая твердость мартенсита по сравнению с сорбитом?
11. Какую кристаллическую решетку имеет мартенсит?
12. Какую скорость охлаждения при закалке называют критической?
13. Что означает точка $A_{с3}$ и $A_{г3}$?
14. На какой линии диаграммы состояния Fe-C расположены критические точки A_3 ?
15. Какова структура стали У8 и стали 45 после нормализации?
16. Какова температура закалки стали У8 и стали 45?
17. Каково содержание углерода в мартенсите стали 45?
18. Как влияет скорость охлаждения при закалке на температуру начала мартенситного превращения?

Список литературы

1. Лахтин Ю.М. Материаловедение:- Учебник для вузов - Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева - 5-е изд., стереотипное - М.: Издательский дом Альянс 2009. - 528с.: ил.
2. Материаловедение: учебник для вузов - Б.Н. Арзамасов и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина - изд. 8-е, стер. - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 648с.: ил.
3. ГОСТ 1435-99. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия. Введен в качестве государственного стандарта с 01.09.2001 г. - М.: Изд-во стандартов 2001 г.
4. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические требования. Введен в действие с 01.01.1991 г. - М.: Изд-во стандартов. 1990 г.

Микроструктуры перлита, сорбита, троостита и мартенсита

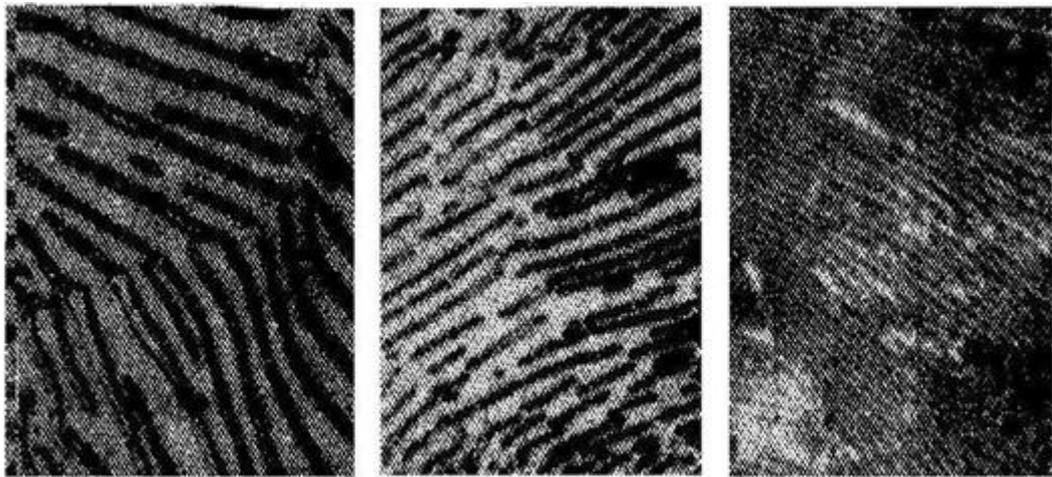


перлит

сорбит

троостит

микроструктуры при увеличении 7500



а

б

в

а - перлит, б - сорбит, в - троостит



Мартенсит

Таблица

Результаты измерений

Марка стали	Структура после нагрева	Способ охлаждения	Твердость после охлаждения			Структура после охлаждения	Название термообработки
			HRB	HRC	HВ		
У8							