

Лабораторная работа 5

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
СПЛАВОВ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ
МЕТАЛЛОВ**

5.1. Основы термической обработки

Термической обработкой называют технологические процессы, состоящие из нагрева и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств. Термической обработке подвергают слитки, отливки, полуфабрикаты, сварные соединения, детали машин, инструменты.

Наличие в сталях фазовых превращений в твердом состоянии обуславливает возможность проведения для деталей из этих материалов всех видов термической обработки. Как известно, все фазовые переходы можно проследить по диаграмме состояния железо—графит.

Рассмотрим часть диаграммы состояния, соответствующую сталям (рисунок 5.1). Температуры наиболее важных фазовых превращений или критические точки обозначают буквой А с соответствующими индексами.

Таблица 5.1: Линии фазовых переходов.

Линия диаграммы	PSK	GS	SE	NJ
Критическая точка	A_1	A_3	$A_{cт}$	A_4

При нагреве и охлаждении в реальных условиях критические точки не полностью совпадают с соответствующими равновесными линиями диаграммы. При нагреве они несколько выше, а при охлаждении — ниже этих линий. Поэтому введены дополнительные обозначения критических точек, которыми пользуются при термической обработке. Для обозначения критических точек при нагреве добавляют букву *c*, а при охлаждении — букву *r*, например A_{c1} , A_{c3} , A_{c4} — нагрев, A_{r1} , A_{r3} , A_{r4} — охлаждение.

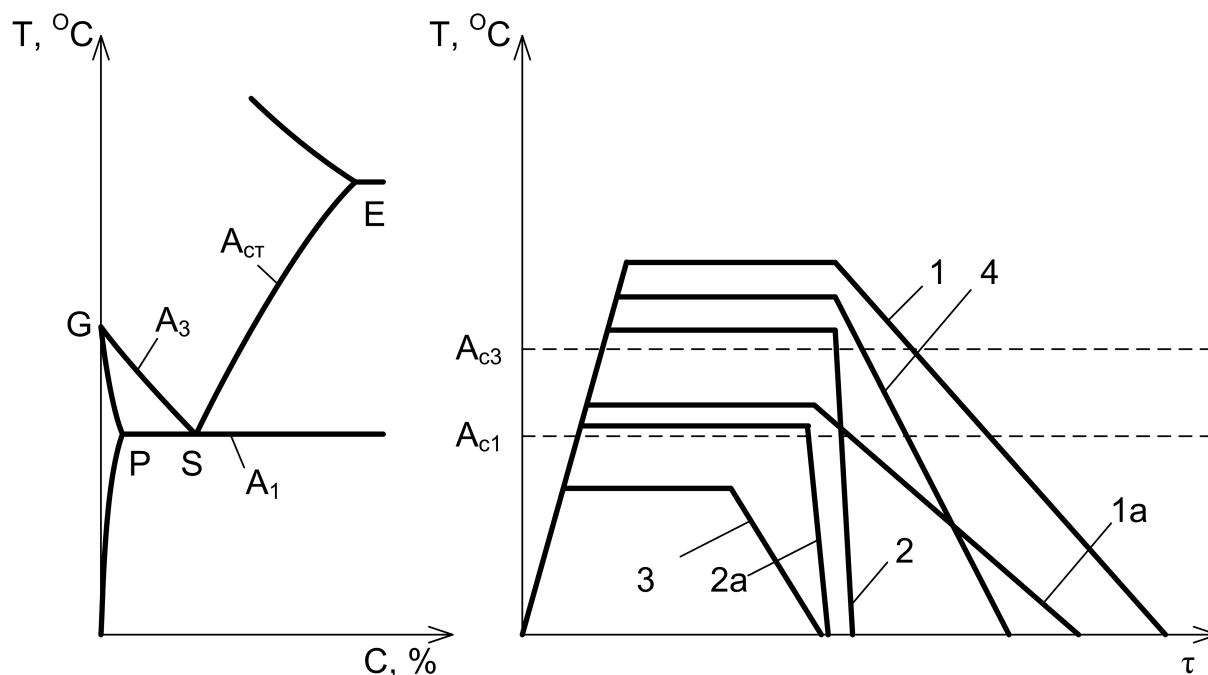


Рис. 5.1. Диаграмма состояния железо—углерод, соответствующая сталям. Циклограммы термических обработок. 1 — полный отжиг; 1а — неполный отжиг; 2 — полная закалка; 2а — неполная закалка; 3 — отпуск; 4 — нормализация.

Линия МО (на рисунке не показана) показывает температуру превращения феррита из магнитного в немагнитное состояние (768°C). Это превращение не связано с фазовой перекристаллизацией и не относится к разряду фазовых превращений. Температура магнитного превращения обозначается точкой A_2 .

5.2. Виды термической обработки стали

Классификация по Бочвару выделяет следующие виды термической обработки стали:

I группа. Отжиг первого рода. К этой группе относится рекристаллизационный отжиг, а также диффузионный отжиг для уменьшения дендритной ликвации стальных слитков и отливок.

II группа. Отжиг второго рода (с фазовыми превращениями). Этот отжиг применяется для получения равновесной структуры с целью снижения твердости, повышения пластичности и вязкости стали, улучшения обрабатываемости, измельчения зерна. Так как все стали, кроме эвтектоидной, имеют две критические температуры A_1 и A_3 , то для них возможны два вида фазового отжига (полный отжиг с температурой нагрева выше температуры A_{c3} и неполный отжиг, когда температура выше A_{c1} , но ниже A_{c3}).

III группа. Закалка стали. Целью закалки является получение неравновесной структуры и высокой твердости стали. Структура, образующаяся при закалке стали, называется мартенситом. Как и фазовый отжиг, закалка стали может быть полной и неполной.

IV группа. Отпуск стали. Отпуском стали называется нагрев закаленной стали ниже температуры точки A_{c1} . При этом происходят превращения, уменьшающие степень неравновесности структуры закаленной стали. Уменьшаются внутренние напряжения, возникающие в процессе закалки, повышается вязкость и пластичность.

5.2.1. Закалка стали

При закалке сталь нагревается выше критической температуры и затем охлаждается со скоростью, равной или выше критической, необходимой для получения неравновесной структуры — мартенсита закалки. Выбор температуры закалки производится в зависимости от температуры критических точек. При этом доэвтектоидные стали нагреваются выше температуры точки A_{c3} на 30–40°С.

Нагрев доэвтектоидных сталей выше температур точки A_{c1} , но ниже A_{c3} недопустим, ибо при последующем охлаждении с критической скоростью образуется смесь структур мартенсита закалки и феррита. Из-за низкой твердости феррита (НВ = 80 МПа) твердость стали после закалки будет существенно понижена. Для заэвтектоидных сталей оптимальной является температура нагрева выше температуры точки A_{c1} на 30–40°С. После охлаждения с критической скоростью образуется структура мартенсита закалки и вторичного цементита. При таком сочетании структурных составляющих обеспечивается максимальная твердость стали после закалки, так как твердость цементита (НВ = 750 МПа) даже выше, чем твердость мартенсита высокоуглеродистой стали (НВ = 700 МПа).

Необходимо учитывать, что при нагреве выше температуры точки A_{c1} заэвтектоидных сталей (при неполной закалке) оптимальные результаты будут получены только в том случае, если выделения вторичного цементита имеют зернистую (сфероидальную) форму. Поэтому заэвтектоидные стали для получения качественной исходной структуры перед закалкой обязательно подвергают отжигу — сфероидизации.

Наиболее ответственной операцией при закалке является охлаждение, которое должно проводиться со скоростью выше критической для получения структуры мартенсита. При этом при больших скоростях охлаждения при закалке возникают внутренние напряжения, которые могут привести к короблению или растрескиванию деталей.

При нагреве под закалку большинство легирующих элементов растворяются в аустените. Карбиды NbC, ZnC, VC, TiC не растворяются в аустените. Эти карбиды

тормозят рост аустенитного зерна при нагреве и обеспечивают получение многоигольчатого мартенсита при закалке.

Характерными свойствами стали с мартенситной структурой являются высокая твердость и малая пластичность. Хрупкость стали увеличивается с повышением в ней содержания углерода и с укреплением мартенситных игл.

Целью закалки является получение мартенситной структуры. Учитывая влияние режимов охлаждения на внутренние напряжения для выбора оптимального режима охлаждения необходим подбор закалочных сред.

Рассмотрим в какой степени наиболее распространенные охлаждающие среды (вода и масло) удовлетворяют условиям закалки. Для жидкостей, температура кипения которых ниже температуры охлаждения тела, при погружении в них нагретого тела различают три периода, которые характеризуются различной интенсивностью охлаждения.

1. В первый период, после погружения нагретого тела в жидкость, вокруг него образуется паровая рубашка. Этот период называется пленочным кипением. Скорость охлаждения при пленочном кипении относительно мала.

2. Разрушение паровой рубашки создает контакт охлаждающей среды с металлом и интенсивное испарение жидкости, для чего затрачивается много теплоты, и интенсивность охлаждения резко возрастает. Это период пузырьчатого кипения.

3. При температуре кипения жидкости, охлаждение создается конвективным теплообменом и скорость охлаждения уменьшается.

Вода. Пленочное кипение воды находится в интервале температур 400–650°С, и чистая вода охлаждает в этом интервале температур не с максимальной скоростью. Для ускорения охлаждения рекомендуется перемещать изделие в воде, что улучшает теплообмен.

При температурах 200–300°С происходит пузырьчатое кипение и вода охлаждает слишком быстро. Установлено, что повышение температуры воды создает еще более неблагоприятные условия охлаждения при температурах 200–300°С.

Недостатки при охлаждении в воде несколько меньше у водных растворов щелочей, солей и кислот. У этих жидкостей почти нет периода пленочного кипения и скорость охлаждения при 200–300°С меньше, чем у чистой воды.

Масло. Положительной особенностью масла является низкая скорость охлаждения (200–300°С). В ряде случаев (легированные стали) скорость охлаждения при закалке в масле при 400–650°С может быть достаточной для предотвращения распада аустенита. Возможность использования масла при закалке обеспечивает уменьшение брака от трещин. Для углеродистых сталей скорость охлаждения в масле в интервале температур 400–650°С недостаточна для предотвращения распада аустенита.

Возможно использование различных способов охлаждения при закалке стали: закалка в одном охладителе; закалка в двух средах; ступенчатая закалка; изотермическая закалка; закалка с самоотпуском; обработка стали холодом.

5.2.2. Отпуск стали

Отпуск является заключительной операцией термической обработки. При отпуске формируется окончательная структура и свойства изделия, уменьшаются или устраняются внутренние закалочные напряжения, повышаются вязкость и пластичность. Длительность отпуска принимается 1–6 часов в зависимости от размеров детали. Однако исследования влияния длительности отпуска на ударную вязкость показывают, что увеличение времени отпуска существенно снижает ударную вязкость.

При выборе температуры при отпуске необходимо иметь в виду, что при монотонном изменении предела текучести σ_T , предела прочности σ_B , относительного сужения ψ , относительного удлинения δ и твердости HRC с изменением температуры отпуска ударная вязкость изменяется не монотонно. Некоторое снижение ударной вязкости связано с отпускной хрупкостью стали при температурах 200–300°С (отпускная хрупкость первого рода).

При быстром охлаждении от температуры отпуска частично подавляется выделение карбидной фазы. Для массивных деталей достичь быстрого охлаждения практически очень трудно. Другим средством борьбы с отпускной хрупкостью является использование сталей, в состав которых входит молибден или вольфрам.

В зависимости от температуры нагрева различают отпуск: низкотемпературный, среднетемпературный и высокотемпературный.

Низкий отпуск проводят с нагревом до 150–200°С. При низком отпуске несколько снижаются внутренние напряжения. Твердость остается высокой (58–62 HRC). Структура стали после низкого отпуска состоит из мартенсита отпуска. Этот вид отпуска применяется в основном для режущих и измерительных инструментов, для изделий, подвергаемых поверхностной закалке, цементации. Низкий отпуск рекомендуется для деталей из малоуглеродистых легированных сталей, так как малоуглеродистый мартенсит отпуска имеет высокий комплекс механических свойств.

Средний отпуск проводят при 350–500°С после закалки пружин и рессор. Структура троостита отпуска обеспечивает высокий предел упругости, твердость 40–50 HRC. Охлаждение после отпуска при 400–450°С рекомендуется проводить в воде, что приводит к образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, которые увеличивают предел выносливости деталей.

Высокий отпуск проводят при 550–600°С. После отпуска структура состоит из сорбита отпуска (с зернистым строением Fe_3C), имеющего высокий комплекс механических свойств (максимальную вязкость). Высокий отпуск применяется для нагруженных конструкционных деталей. Закалку с высоким отпуском называют улучшением.

Важнейшей характеристикой конструкционных сталей является их надежность в работе, которая определяется сопротивлением стали хрупкому разрушению. Многочисленные исследования показывают, что изменение ударной вязкости сталей в зависимости от температуры отпуска происходит весьма своеобразно.

По характеру изменения зависимости $KCU^1 = f(T_{отп})$ стали можно разделить на две группы. Первую группу составляют углеродистые стали и стали с некарбидообразующими элементами. Стали этой группы имеют провал ударной вязкости после отпуска при температуре 200–300°С. При этих температурах имеет место монотонное повышение ударной вязкости. Появление хрупкости в интервале температур 200–300°С называется необратимой отпускной хрупкостью. Такое название обусловлено тем, что сталь, находящаяся в состоянии хрупкости после отпуска, при более высокой температуре нагрева становится вязкой. Повторный нагрев её в интервале температуры охрупчивания повторного понижения ударной вязкости не вызывают.

Вторую группу образуют стали, легированные карбидообразующими элементами, а также стали, комплексно легированные карбидообразующими и некарбидообразующими элементами (Si, Ni). Для таких сталей кроме охрупчивания при 200–400°С наблюдается второй провал ударной вязкости при 400–570°С. Этот провал тем больше, чем меньше охладилась сталь после отпуска.

Охрупчивание стали после высокого отпуска названо обратимой отпускной хрупкостью. В этом случае после устранения хрупкости при других температурах, например, при 600°С для хромистой стали, она снова может возникнуть при повторном отпус-

¹KCU — ударная вязкость

ке (или нагреве) при 400–570°С. Отпускная хрупкость не только снижает ударную вязкость, но также вызывает повышение температурного порога хладноломкости. Уменьшается работа зарождения и распространения трещины.

Первопричиной необратимой отпускной хрупкости является выделение и обособление цементита из решетки твердого раствора. Наличие в стали водорода, азота и некоторых других примесей усугубляет это явление, но не является его причиной. На обратимую отпускную хрупкость особенно сильно влияет обогащение границ зерна, и поэтому наличием фосфора в стали часто объясняли это явление.

Фазовый анализ показывает, что первый провал КСУ в легированных сталях связан с обособлением от решетки твердого раствора карбидов железа типа Fe_3C . Поэтому первый провал ударной вязкости при отпуске на 200–400°С легированных сталей подобен необратимой отпускной хрупкости углеродистых сталей.

5.2.3. Отжиг стали

Отжиг является довольно распространенной операцией термической обработки сталей и чугунов. Рассмотрим некоторые виды отжига.

Рекристаллизационный или смягчающий отжиг. Применяется для устранения наклепа после холодной пластической деформации (обработки давлением), а также для восстановления пластичности, необходимой для дальнейшей обработки давлением (например, промежуточные отжики при волочении проволоки).

Отжиг, преследующий цель повышения деформируемости (например, листовой стали в автомобилестроении), проводят при 650–670°С после деформации около 20%. Такой отжиг обеспечивает при дальнейшей холодной вытяжке хорошую пластичность и гладкую поверхность (не следует проводить отжиг после деформации, близкой к критической, вызывающей рост зерна).

Степень предварительной деформации и режим рекристаллизационного отжига являются способом регулирования величины зерна. Этим особенно пользуются для таких сплавов, которые не имеют фазовых превращений в твердом состоянии (например, ферритные и аустенитные стали). Для сталей, работающих при обычных условиях наилучшим является мелкое зерно. Для повышения жаропрочности предпочтительными являются стали с крупным зерном.

При отжиге электротехнической листовой стали также добиваются получения крупнокристаллической структуры, улучшающей магнитные характеристики сталей. Для снятия напряжений в отливках, в сваренных деталях проводится отжиг при 650–670°С. Для устранения термических напряжений охлаждение проводится до температуры 300–400°С. Отжиг и охлаждение должны проводиться медленно.

Смягчающий отжиг проводится в диапазоне температур 160–700°С в зависимости от назначения изделий. Отжиг для снятия сварочных напряжений проводится при 650–700°С, а для снятия шлифовочных напряжений проводится отжиг при 160–180°С.

Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг. Применяется для устранения дендритной ликвации в слитках и отливках. Для этих целей проводится нагрев при 1100–1150°С с продолжительной (12–15 часов) выдержкой и последующим медленным охлаждением. При этом образуется крупнозернистая структура имеющая характерное игольчатое строение феррита. Для исправления структуры, отливки после диффузионного отжига подвергают полному фазовому отжигу для образования нормальной структуры. У сталей, склонных к ликвации, диффузионный отжиг улучшает вязкость и пластичность в прокатной или ковальной стали, в направлении поперёк волокна.

Отжиг с фазовой кристаллизацией. Такой отжиг применяется для получения равновесной ненапряженной структуры стали. Он может быть полным и неполным. Пол-

ный отжиг применяется для исправления структуры литой или ковanej стали, если последняя крупнозернистая.

Полный отжиг. Заключается в нагреве стали выше температуры A_{c3} на $30-50^\circ\text{C}$, выдержке при этой температуре до полной перекристаллизации, с последующим медленным охлаждением. Скорость охлаждения углеродистой стали $150-200^\circ\text{C}/\text{час}$; легированной стали — $30-100^\circ\text{C}/\text{час}$. Полный отжиг повышает прочность, пластичность и вязкость литой стали. Полный отжиг используется также для исправления строчечной структуры, образующейся в малоуглеродистой стали при слишком низкой температуре (между точками A_1 и A_3). Такой отжиг также применяется для улучшения обрабатываемости резанием доэвтектоидных сталей.

Неполный отжиг. Заключается в нагреве стали выше температуры точки A_{c1} но ниже A_{c3} , выдержке и последующем медленном охлаждении. Такой отжиг для доэвтектоидных сталей применяется после правильно выполненной горячей обработки давлением, когда не требуется исправление всей структуры заготовки. Поскольку температура неполного отжига ниже, чем полного, то неполный отжиг более экономичен. Неполный отжиг применяется также для получения зернистого перлита в структуре заэвтектоидных инструментальных сталей.

Изотермический отжиг. Заключается в нагреве стали выше точки A_{c3} или A_{c1} , выдержке при этой температуре до полного завершения фазовых превращений и перенесении изделий в соляную ванну или в печь, нагретую до температуры на $120-180^\circ\text{C}$ ниже температуры точки A_{r1} где производится выдержка до полного распада аустенита. Этот вид отжига экономичней обычного и обеспечивает получение более стабильных результатов, так как контролировать температуру легче, чем скорость охлаждения. Образование однородной ферритно-цементитной смеси происходит при постоянной температуре по всему сечению изделия. Поэтому изотермический отжиг применяется часто, особенно для легированных сталей.

Нормализация стали. При нормализации сталь нагревают выше температуры точек A_{c3} или A_{ct} на $30-50^\circ\text{C}$. После выравнивания температуры по всему сечению детали охлаждаются на спокойном воздухе. Таким образом, по режиму нормализация является промежуточной операцией между отжигом и закалкой. Основной целью нормализации является получение мелкозернистой однородной структуры; устранение цементитной сетки в структуре заэвтектоидной стали; частичное снятие внутренних напряжений и наклепа. Нормализация иногда является предварительной операцией перед окончательной термообработкой.

5.2.4. Старение стали

Старением называют изменение свойств сплавов с течением времени. В результате старения изменяются физико-механические свойства. Прочность и твердость повышаются, а пластичность и вязкость понижаются. Старение может производиться при температуре 20°C (естественное старение) или при нагреве до невысоких температур (искусственное старение).

Различают два вида старения: термическое, протекающее в закаленных сплавах, и деформационное (механическое), происходящее в сплавах, пластически деформированных при температуре ниже температуры рекристаллизации.

Термическому старению подвергают сплавы, компоненты которых обладают ограниченной переменной растворимостью в твердом состоянии. Деформационное старение не связано с диаграммой состояния сплава. К старению склонны многие сплавы железа и сплавы цветных металлов.

Результаты старения могут быть разными. В одних случаях старение является

положительным и его используют при термической обработке сплавов для повышения прочности и твердости (термическое старение); для упрочнения деталей из пружинных сталей, которые при эксплуатации должны обладать высокими упругими, прочностными и усталостными свойствами (деформационное старение). В других случаях старение является отрицательным: резкое снижение ударной вязкости и повышение порога хладноломкости в результате старения (особенно деформационного) могут явиться причиной разрушения конструкции; ухудшение штампуемости листовой стали; изменение размеров закаленных деталей и инструмента при естественном старении, что особенно вредно для точного измерительного инструмента и прецизионных деталей (например, подшипников), размагничивание в процессе эксплуатации стальных закаленных постоянных магнитов.

5.3. Протокол испытаний

1. Подготовка образца.

Материал образца: Сталь Ст. 3.

Поверхность образца очищают от посторонних веществ.

2. Испытание на твердость по методу Бриннеля.

Устанавливаем образец на испытательную установку и проводим измерения в трех разных местах.

$$d_1 = 4,0 \text{ мм};$$

$$d_2 = 4,1 \text{ мм};$$

$$d_3 = 4,2 \text{ мм}.$$

Вычисляем среднее значение:

$$d_{cp} = \frac{d_1+d_2+d_3}{3} = \frac{4,0+4,1+4,2}{3} = 4,1 \text{ мм}.$$

По среднему значению из таблицы 2.1 выбираем опытное значение твердости по Бриннелю:

$$HB = 72,4.$$

3. Испытание на твердость по методу Роквелла.

Для измерения твердости образца выбираем шкалу С. Устанавливаем образец на испытательную установку и проводим измерения в трех разных местах.

$$HRC_1 = 20;$$

$$HRC_2 = 19;$$

$$HRC_3 = 21.$$

Вычисляем среднее значение:

$$HRC_{cp} = \frac{HRC_1+HRC_2+HRC_3}{3} = \frac{20+19+21}{3} = 20.$$

4. Испытание на твердость по методу Виккерса.

Для определения твердости по методу Виккерса воспользуемся значением твердости по шкале Бриннеля и переводной таблицей 2.1:

$$HV_{cp} = 217.$$

5. Закалка стали.

Помещаем образец в муфельную печь. Нагреваем до температуры 900°С. Выдерживаем в печи 17 минут. После этого достаем образец из печи и закаливаем в воду.

6. Испытание на твердость по методу Бриннеля.

Устанавливаем образец на испытательную установку и проводим измерения в трех разных местах.

$$d_1 = 3,1 \text{ мм};$$

$$d_2 = 3,1 \text{ мм};$$

$$d_3 = 3,1 \text{ мм}.$$

Вычисляем среднее значение:

$$d_{cp} = \frac{d_1+d_2+d_3}{3} = \frac{3,1+3,1+3,1}{3} = 3,1 \text{ мм}.$$

По среднему значению из таблицы 2.1 выбираем опытное значение твердости по Бриннелю:

$$HB = 129.$$

7. Испытание на твердость по методу Роквелла.

Для измерения твердости образца выбираем шкалу С. Устанавливаем образец на испытательную установку и проводим измерения в трех разных местах.

$$HRC_1 = 40;$$

$$HRC_2 = 41;$$

$$HRC_3 = 42.$$

Вычисляем среднее значение:

$$HRC_{cp} = \frac{HRC_1+HRC_2+HRC_3}{3} = \frac{40+41+42}{3} = 41.$$

8. Испытание на твердость по методу Виккерса.

Для определения твердости по методу Виккерса воспользуемся значением твердости по шкале Бриннеля и переводной таблицей 2.1:

$$HV_{cp} = 406.$$

9. Отпуск стали.

Помещаем образец в муфельную печь. Нагреваем до температуры 650°С. Выдерживаем в печи 17 минут. После этого достаем образец из печи и даем ему остыть на воздухе.

10. Испытание на твердость по методу Бриннеля.

Устанавливаем образец на испытательную установку и проводим измерения в трех разных местах.

$$d_1 = 3,7 \text{ мм};$$

$$d_2 = 3,8 \text{ мм};$$

$$d_3 = 3,6 \text{ мм}.$$

Вычисляем среднее значение:

$$d_{cp} = \frac{d_1+d_2+d_3}{3} = \frac{3,7+3,8+3,6}{3} = 3,7 \text{ мм}.$$

По среднему значению из таблицы 2.1 выбираем опытное значение твердости по Бриннелю:

$$HB = 89,7.$$

11. Испытание на твердость по методу Роквелла.

Для измерения твердости образца выбираем шкалу С. Устанавливаем образец на испытательную установку и проводим измерения в трех разных местах.

$$HRC_1 = 27;$$

$$HRC_2 = 28;$$

$$HRC_3 = 29.$$

Вычисляем среднее значение:

$$HRC_{cp} = \frac{HRC_1+HRC_2+HRC_3}{3} = \frac{27+28+29}{3} = 28.$$

12. Испытание на твердость по методу Виккерса.

Для определения твердости по методу Виккерса воспользуемся значением твердости по шкале Бриннеля и переводной таблицей 2.1:

$$HV_{cp} = 271.$$

13. Результаты испытаний.

Таблица 5.2: Таблица результатов испытаний.

Вид термообработки	HB	HRC	HV
До термообработки	72,4	20	217
После закалки	129	41	406
После отпуска	89,7	28	271

5.4. Контрольные вопросы

Для успешного выполнения лабораторной работы рекомендуется подготовить ответы к следующим вопросам:

Что такое термическая обработка? Почему можно проводить термическую обработку? Что такое критические точки? Покажите на диаграмме состояния критическую точку A_1 . Покажите на диаграмме состояния критическую точку A_3 . Покажите на диаграмме состояния критическую точку $A_{ст}$. Для чего к названиям критических точек добавляют индексы s и r ? В чем особенность критической точки A_2 ? Приведите

классификацию видов термической обработки. Что такое закалка? Для чего проводят закалку? Что такое отпуск? Для чего проводят отпуск? Какие среды используют для закалки и отпуска? Какие существуют виды отжига? Что такое старение? Какие существуют типы старения?

В качестве дополнительного материала рекомендуется подготовиться к развернутому ответу по следующим темам:

- Виды термической обработки: закалка, отпуск. Выбор температур, скорости обработки.
- Виды и цели применения отжига.
- Изменение структуры материала при термообработке.