

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет
промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта
(наименование)

Кафедра
Сварочное, литейное производство и
материаловедение
(наименование)

Направление подготовки

22.03.01 «Материаловедение и
технологии материалов»
(код и наименование)

Профиль

«Материаловедение и технологии
новых материалов»
(наименование)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему

«Исследование влияние режимов термической обработки на структуру и
свойства легированных сталей, применяемых в изделиях специального
назначения»

Студент

(подпись, дата)

Сермин Вадим
Геннадьевич
(фио полностью)

Научный руководитель
д.т.н., профессор

(подпись, дата)

Розен А.Е.
(фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

(подпись, дата)

Хорин А.В.
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от _____ № _____)
Заведующий кафедрой

(подпись, дата)

Розен А.Е.
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой _____ (протокол заседания ГЭК от _____ № _____)

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

(подпись, дата)

Гуськов М.С.
(фамилия, инициалы)

Пенза 2022

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 64 с., 23 рис., 18 табл., 46 использованных источников, 3 приложения.

АРМАТУРОСТРОЕНИЕ, ИЗДЕЛИЯ ЦПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА

Целью данной работы является исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства крепежных изделий из стали 20Х13, применяемых в арматуростроении.

Объектом исследования являются механические свойства заготовок крепежных изделий, формируемые при термической обработке.

Предметом исследования является обоснование выбора технологии термической обработки для получения требуемых свойств крепежных изделий применяемых в арматуростроении.

Область применения – арматуростроение, запорная и регулирующая арматура.

Задачи:

- провести обзор основной нормативной документации, регламентирующей применение крепежных изделий в арматуростроении, выбор материалов и упрочняющей термической обработки при их изготовлении;
- обосновать выбор исходных материалов для изготовления крепежных изделий;
- выбрать методы и оборудования для исследования структуры и механических свойств;
- провести исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства стали 20Х13.

Содержание

Введение	4
1 Анализ состояния предметной области. Цель и задачи исследования	5
1.1 Постановка цели и задач исследования	5
1.2 Обзор основной нормотехнической документации.....	5
1.3 Патентный поиск	8
2 Теоретические основы термической обработки материалов	13
2.1 Виды и способы термической обработки	13
2.2 Влияние легирующих элементов на свойства сталей	16
3 Исследуемый материал	21
3.1 Обоснование выбора материала	21
3.2 Структурные особенности стали 20Х13 при термической обработке ..	23
3.3 Режимы термической обработки и свойства стали 20Х13, регламентируемые нормативной документацией	25
4 Методы исследования	31
4.1 Микроструктурное исследование	31
4.2 Исследование механических свойств.....	33
4.2.1 Испытание на равноосное растяжение.....	33
4.2.2 Исследование твёрдости.....	36
4.2.3 Испытание на ударную вязкость	37
5 Экспериментальная часть	40
5.1 Образцы и оборудование для исследования.....	40
5.2 Результаты эксперимента	45
Заключение	57
Список используемых источников	59
Приложение А	2
Приложение Б	4
Приложение В.....	5

Введение

Арматуростроение – это одна из важных отраслей машиностроения, производящая запорную и регулирующую арматуру.

В арматуростроении всегда возникает потребность в соединении различных элементов. Сделать это можно в том числе и при помощи специальных металлических крепежных изделий [1].

Поскольку крепежные изделия являются универсальной и востребованной продукцией в арматуростроении, их ассортимент отличается огромным разнообразием. Условно все крепежные изделия делятся на следующие группы:

- резьбовые, повышенной прочности;
- крепежи массового использования;
- крепежи для безударной фиксации и одностороннего монтажа;
- элементы для герметичных конструкций;
- фиксаторы, необходимые для крепления полимерных композитных материалов.

В представленные группы входят всеми известные гайки, дюбели, анкеры, шурупы, саморезы, заклепки, шпильки, шайбы и другие. Полный перечень всех изделий представлен в ГОСТ 27017 – 86 [2].

Сырьё для производства крепежных изделий – различные виды металлов, такие как сталь, алюминий, медь, но для ответственных конструкций рекомендуемым материалом остаётся легированные стали и их сплавы [3].

Вся крепежная арматура разрабатывается и изготавливается с учетом оказываемого механического воздействия. Таким образом, все шпильки, болты и прочие приспособления, предназначенные для крепежа, должны быть в достаточной степени прочными и надежными [4].

В настоящее время перед инженерами-конструкторами стоят задачи повышения качества продукции, ее эксплуатационных свойств, для использования при монтаже высоконагруженных конструкций.

1 Анализ состояния предметной области. Цель и задачи исследования

1.1 Постановка цели и задач исследования

Актуальность – по обращению одного из предприятий Пензенской области было необходимо разработать режимы термической обработки заготовок изделий арматуростроения, которые бы обеспечили получение свойства, регламентированные соответствующими нормативными документами.

Целью данной работы является исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства крепежных изделий из стали 20Х13, применяемых в арматуростроении.

Достижение указанной цели осуществлялось путем решения следующих основных задач:

- провести обзор основной нормативной документации, регламентирующей применение крепежных изделий в арматуростроении, выбор материалов и упрочняющей термической обработки при их изготовлении;
- обосновать выбор исходных материалов для изготовления крепежных изделий;
- выбрать методы и оборудования для исследования структуры и механических свойств;
- провести исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства стали 20Х13.

1.2 Обзор основной нормотехнической документации

Крепежные металлические изделия работают в основном при статических нагрузках, но также в процессе эксплуатации деталь может подвергнуться и какими-либо динамическим нагрузкам. Также крепежи подвергаются атмосферному воздействию, что может неблагоприятно сказаться на соединении. Эти факторы определяют требования к материалам.

Основным документом, регламентирующим применение крепежных изделий в арматуростроении является НП-089 – 15 [5]. Этот документ ссылается на

ГОСТ 20700 – 75 [6], который обозначает основные марки стали, применяемые для изготовления крепёжных изделий, и ГОСТ 23304 – 78 [7], регламентирующий требования к материалам. Также требования при выборе необходимого материала регламентирует ГОСТ 33260 – 2015 [8], согласно которому при выборе материалов для изготовления основных деталей трубопроводной арматуры учитывают заданные условия эксплуатации включающая в себя рабочее давление, температуру стенки (минимальную отрицательную и максимальную расчетную); химический состав и свойства рабочей среды (коррозионность, взрывоопасность, наличие примесей, приводящих к эрозионному износу). ГОСТ 33260 – 2015 определяет также требования к свойствам материала для определённых условий эксплуатации. Такими свойствами являются прочность, твёрдость, пластичность, вязкость и химическая стойкость к эксплуатационной среде.

Крепежные изделия бывают различных видов и назначений, но некоторые из них, например, болт и шпилька требуют особого подхода при выборе материала, подходящего для предполагаемого применения. Выбирая крепеж из различных материалов, можно существенно повлиять на качество и продолжительность срока службы изделия. Согласно ГОСТ Р 54786 – 2011 [9] при выборе материалов для крепежных изделий должны быть учтены условия работы резьбового соединения: температура, давление среды, напряженное состояние, опасность хрупкого разрушения, воздействие коррозионной среды и возможность проявления контактной, щелевой или межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания.

Особой популярностью в арматуростроении пользуются крепежные элементы из стали и ее сплавов. Стальной крепеж характеризуется высокой прочностью, гибкостью, низкой усталостью металла (легко переносит изменения нагрузок), отличной электропроводностью и доступной ценой. При высоких нагрузках стальные крепежные детали не изменяют свою форму, как пластмассовые, и не разрушаются, как чугунные. ГОСТ Р 54786 – 2011 регламентирует изготовление крепёжных изделий (болты, шпильки, гайки и шайбы) из сорта, полуфабрикатов сталей проката толщиной до 250 мм из углеродистой качественной конструкционной стали марок 20, 30, 35, 40, 45, поставляемого по ГОСТ 1050 – 2013 [10]. По

СТ ЦКБА 012 – 2015 [11] крепёжные изделия следует изготавливать в соответствии с техническими требованиями по ГОСТ 23304 – 78.

Главным недостатком обычной углеродистой стали является ее низкая устойчивость к коррозии. Эту проблему при изготовлении крепежа решают путём применения легированной стали (с добавлением хрома, никеля, кремния, молибдена и др. элементов). Высоким сопротивлением коррозии отличаются стали с примесью хрома и небольшим количеством углерода. В процентном соотношении нержавеющая сталь – это смесь железа, углерода меньше 1,2 % и хрома больше 10,5 %. ГОСТ Р 54786 – 2011 также регламентирует применение для изготовления крепёжных изделий сорта и полуфабрикаты проката толщиной до 250 миллиметров из легированной конструкционной стали марок 30X, 35X, 40X, 45X, 35XM, 30ХМА, 38ХНЗМФА – по ГОСТ 4543 – 2016 [12], проката (поковок) диаметром или толщиной до 200 миллиметров из высоколегированной коррозионно-стойкой стали марок 08X18H10T, 12X18H10T, 31X19H9MBT, 20X13 – по ГОСТ 5949-2018 [13]. Данный ГОСТ 23304 – 78 регламентирует использование углеродистых конструкционных сталей 35, 45, по ГОСТ 1050 – 2013, низколегированных и среднелегированных 30X, 40X, 45X, 30ХМА, 35XM, 38ХНЗМФА по ГОСТ 4543 – 2016 и высоколегированных 20X13, 20X12ВНМФ по ГОСТ 18968 – 73. Все представленные стали применяются для крепёжных изделий исключительно только после термической обработки, проведённой по стандартам центрального конструкторского бюро арматуростроения.

Для повышения механических и эксплуатационных свойств крепежных изделий прибегают различным видам термической обработки. При выборе упрочняющей термической обработки руководствоваться несколькими гостами, например, ГОСТ 33260 – 2015, регламентирующий выбор нормативной документации по режимам и основным технологическим требованиям по термической обработке заготовок и деталей из высоколегированных сталей, коррозионно-стойких и жаростойких сталей и сплавов в поставке – по ГОСТ 5949-2018, ГОСТ 25054 – 81 [15]. Также допускается применять режимы указанные в ГОСТ 23304 – 78, ГОСТ 20700 – 75, ГОСТ 4543 – 2016. Режимы окончательной термической обработки для получения требуемых свойств, указанных в конструкторской докумен-

тации или технологических инструкциях завода-изготовителя, – по СТ ЦКБА 016 – 2005 [16].

Таким образом, были проанализированы основные нормативные документы, касающиеся требований к материалам и их эксплуатационным свойствам, а также нормативные документы по термической обработки.

1.3 Патентный поиск

Цель исследования – определение технологического уровня и тенденции развития в повышении эксплуатационных свойств стальных крепёжных изделий при помощи термической обработки.

Регламент патентного поиска – это план поиска. Он состоит из определения вида исследований, вида поиска, его глубины и широты. В регламент входит выбор источников информации, по которым будет вестись поиск аналогов объекта, а также индекс МПК (международная патентная классификация). Источники информации выбирают исходя из установленных областей поиска, учитывая при этом реальную доступность этих источников.

Выбранные элементы регламента приведены в таблице 1. В ней записаны индексы МПК, в заголовке таблицы регламента указано общее название исследуемого объекта.

Исследуемый объект – механические свойства крепёжных изделий ответственных конструкций применяемых в арматуростроении.

Предмет поиска – повышения механических свойств стали, повышение механических свойств материалов термической обработкой, термическая обработка крепёжных изделий в арматуростроении.

Вид исследований и вид поиска – патентные исследования, тематический поиск.

Параметры информационной базы (фонда) – Патентные фонды Федерального института промышленной собственности (ФИПС) [17].

Таблица 1 – Регламент поиска

Предмет поиска	Индекс МПК	Широта поиска	Глубина поиска	Источник информации
1	2	3	4	5
Повышение механических свойств стали	<i>C21D8/08</i> <i>C21D 6/00</i> <i>C21D 8/00</i> <i>C22C 38/54</i> <i>C21D 1/02</i> <i>C21D 9/00</i>	Россия	15 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Повышение механических свойств материалов термической обработкой	<i>C21D 6/02</i> <i>C21D 6/00</i> <i>C21D 1/78</i> <i>C21D 1/25</i>	Россия	15 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Термическая обработка крепежных изделий в арматуростроении	<i>C21D 6/00</i> <i>C21D 1/42</i>	Россия	15 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС

C21D 8/00 – 8/00 – изменение физических свойств путем деформации в сочетании или с последующей термообработкой.

C22C 38/54 – сплавы черных металлов, например легированные стали с бором.

C21D 1/02 – закалка кованых или прокатанных изделий без дополнительного нагрева.

C21D 9/00 – термообработка, например отжиг, закалка, отпуск, специальных изделий; печи для этого.

C21D8/08 – изменение физических свойств путем деформации в сочетании или с последующей термообработкой для армирования бетона.

C21D 6/02 – термообработка сплавов на основе железа, дисперсионное твердение.

C21D 6/00 – термообработка сплавов на основе железа.

C21D 1/78 – общие способы или устройства для термообработки, например отжига, закалки или отпуска, комбинированные способы термообработки, не предусмотренные в предыдущих рубриках.

C21D 1/25 – общие способы или устройства для термообработки, например отжига, закалки или отпуска, закалка в сочетании с отпуском при температуре между 300 °С и 600 °С, т.е. термическое улучшение качества.

C21D 1/42 – общие способы или устройства для термообработки, например отжига, закалки или отпуска, индукционный нагрев.

Результаты патентного обзора приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты патентного обзора

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс МПК	Заявитель (патентообладатель) номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
1	2	3	4
Повышения механических свойств стали	Россия, патент, <i>RU 2573304 C9</i> <i>C21D 8/08</i>	Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Профессионального Образования Пензенский государственный университет Архитектуры и строительства (<i>RU</i>) № 2014109309/02 Россия, 20.01.2016	Способ повышения технологического ресурса и стойкости стержневой и трубчатой арматуры [18]
Повышения механических свойств стали	Россия, патент, <i>RU 2749815 C1</i> <i>C21D 8/00</i> <i>C21D 1/02</i> <i>C21D 9/00</i>	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») (<i>RU</i>) № 2020136558 Россия, 17.06.2021	Способ получения упрочненных заготовок крепежных изделий из нержавеющей аустенитной стали [19]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Повышения механических свойств стали	Россия, патент, <i>RU 2688017 C1</i> <i>C21D 6/00</i> <i>C21D 8/00</i> <i>C22C 38/54</i>	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») (RU) № 2018126676 Россия 17.05.2019	Способ термомеханической обработки жаропрочной стали мартенситного класса [20]
Повышение механических свойств материалов термической обработкой	Россия, патент, <i>RU 2388833 C1</i> <i>C21D 6/02</i>	Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» (ФГУП ЦНИИ км «Прометей») (RU) № 2009118984/02 Россия, 10.05.2010	Способ термической обработки высокопрочной коррозионностойкой стали мартенситного класса [21]
Повышение механических свойств материалов термической обработкой	Россия, патент, <i>RU 2591901 C2</i> <i>C21D 6/00</i> <i>C21D 1/78</i> <i>C21D 1/25</i>	Открытое акционерное общество «ТВЭЛ» (RU) № 2014150597/02 Россия, 10.07.2016	Способ термической обработки заготовки из нержавеющей хромистой стали [22]
Повышение механических свойств материалов термической обработкой	Россия, патент <i>RU 94026838</i> <i>A1</i> <i>C21D 6/00</i>	Акционерное общество открытого типа «Ижорские заводы» (RU) № 94026838/02 Россия, 27.06.1996	Способ термообработки изделий из стали типа 20X13 [23]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Повышение механических свойств материалов термической обработкой	Россия, патент, <i>RU 2734208 C1</i> <i>C21D 1/78</i>	Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра Курчатовский институт (<i>RU</i>) <i>№ 2020105506</i> Россия, 13.10.2020	Способ термической обработки для получения деталей с повышенной размерной точностью [24]
Термическая обработка крепежных изделий в арматуростроении	Россия, патент, <i>RU 2691022 C1</i> <i>C21D 6/00</i> <i>C21D 1/42</i>	Общество с ограниченной ответственностью Производственное коммерческое объединение «Термическая обработка металлов» (<i>RU</i>) <i>№ 2018111157</i> Россия, 07.06.2019	Способ поверхностной термообработки изделий из нержавеющей хромистых сталей [25]

Патентное исследование показывает, что ведутся активные разработки способов повышения ресурса работы стальных крепёжных изделий, крепёжных изделий, используемых в атомной энергетической промышленности, крепёжных изделий из высокопрочных легированных сталей, изделий применяемых в арматуростроении, а также изделий, применяемых для изготовления высоконагруженного резьбового крепежа в области использования теплового и атомного оборудования и сосудов давления и другого оборудования. Большое внимание уделяется термической обработке, как способу повышения свойств материалов. В частности, предполагают также применение ТВЧ закалки, как способу повышения эксплуатационных свойств изделий. Все эти способы повышения эксплуатационных свойств металлических крепёжных изделий нашли широкое применение в промышленности.

Таким образом, был проведён патентный поиск и определена тенденция развития в повышение эксплуатационных свойств стальных крепёжных изделий.

2 Теоретические основы термической обработки материалов

2.1 Виды и способы термической обработки

Термическая обработка любых сплавов заключается в нагреве их до определённой температуры, выдержке и охлаждении с целью изменения внутреннего строения и свойств. В основе процессов термической обработки железных сплавов лежит явление полиморфизма, т.е. способность материала изменять свою кристаллическую структуру под действием высоких температур.

Термическая обработка применяется либо в качестве промежуточной технологической операции для улучшения обрабатываемости давлением или резанием, либо как окончательная операция для придания металлу или сплаву такого комплекса механических или химических свойств, который смог бы обеспечить заданные эксплуатационные характеристики изделия.

В практике термической обработки стали различают отжиг, нормализацию, закалку и отпуск. Рассмотрим каждый вид термической обработки более подробно [26].

Отжигом называется термическая обработка, в процессе которой производится нагрев стальных деталей до требуемой температуры с последующей выдержкой и медленным охлаждением с печью для получения однородной, равновесной, менее твёрдой структуры, свободной от остаточных напряжений.

Различают отжиг с полной фазовой перекристаллизацией (диффузионный, полный, изотермический), неполной фазовой перекристаллизацией (неполный, изотермический) и без фазовой перекристаллизации (низкий, рекристаллизационный).

Разновидностью отжига является нормализация, отличающаяся от полного отжига только повышенной скоростью охлаждения (охлаждение на воздухе).

Диффузионный отжиг (гомогенизацию) применяют для устранения химической неоднородности, возникающей при кристаллизации металла.

В результате диффузионного отжига металл приобретает крупное зерно, а в ряде случаев видманштеттову структуру.

Полный отжиг (фазовая перекристаллизация) применяется для измельчения зерна, устранения видманштеттовой структуры, снижения твёрдости и прочности, что облегчает обработку резанием. При этом исходная крупнозернистая структура превращается в аустенит. Ограничение температуры нагрева связано с ограничением роста зерна.

Неполный отжиг отличается от полного тем, что сталь нагревают до более низкой температуры. Неполный отжиг, главным образом применяют для заэвтектоидных сталей. Нагрев до температуры выше A_{C1} от 10 до 30 °С приводит практически к полной перекристаллизации стали и получению зернистой формы перлита вместо обычной пластинчатой. Поэтому такой отжиг обычно называют сфероидизирующим [27].

Изотермический отжиг применяют для улучшения обрабатываемости конструкционных сталей.

Нормализация отличается от полного отжига более быстрым охлаждением (на спокойном воздухе). Применяют как промежуточную операцию для смягчения низкоуглеродистой стали перед обработкой резанием, а также для устранения цементитной сетки в заэвтектоидных сталях.

Низкий отжиг проводится с целью снять внутренние напряжения в стали. Рекристаллизационный отжиг проводится с целью снятия наклёпа в стали.

Целью закалки стали является получение мартенситной структуры. Различают полную закалку, обычно применяемую к доэвтектоидным сталям и неполную, обычно применяемую для заэвтектоидных сталей.

При закалке стали обычно преследуют две основные цели:

- получение высокой твёрдости;
- получение однородной мартенситной структуры во всём объёме изделия.

Выбор того или иного способа охлаждения при закалке определяется, во-первых, получением наибольшей прокаливаемости и, во-вторых, минимальным уровнем остаточных внутренних напряжений, чтобы уменьшить коробление деталей.

Используются несколько способов закалки, которые классифицируются по методу охлаждения:

- закалка в одном охладителе;
- закалка в двух охладителях;
- ступенчатая закалка;
- изотермическая закалка.

Закалка в одном охладителе. Это наиболее простой и распространенный способ. Однако некоторые стали при охлаждении в воде склонны к возникновению трещин. При охлаждении в масле скорость охлаждения меньше, но многие стали при таком охлаждении не закаляются.

Закалка в двух охладителях. При этом методе в верхнем интервале температур скорость охлаждения велика, но сталь достаточно пластична и значительных напряжений не возникает. Твердость при таком методе закалки такая же, как при закалке в воде. Такой способ приводит к уменьшению внутренних напряжений и снижает вероятность появления трещин.

Ступенчатая закалка заключается в том, что после нагрева детали переносят в печь-ванну с расплавом щелочей обычно КОН и NaOH, нагретую до температуры немного выше начала образования мартенсита, выдерживают небольшое время для выравнивания температуры по сечению, а затем охлаждают в масле или на воздухе. При этом обеспечивается быстрое охлаждение стали в верхней области температур, а затем делается выдержка, во время которой температура по сечению детали выравнивается, и термические напряжения уменьшаются.

Твердость после такой закалки такая же, как и в предыдущих способах, но напряжения и вероятность образования трещин еще меньше. В качестве жидких сред для ступенчатой закалки используют расплавы щелочей, селитры, легкоплавких металлов.

Ступенчатая закалка применяется только для мелких изделий до 10 миллиметров из углеродистых сталей. Для более крупных деталей ее не применяют, так как в расплаве щелочей скорость охлаждения внутри детали мала.

Для легированных сталей, обладающих высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, такую закалку применять нецелесообразно, так как они обычно хорошо закаляются в масле, которое достаточно медленно охлаждает при температурах образования мартенсита.

Изотермическая закалка проводится так же, как и ступенчатая, но в расплаве щелочей детали выдерживают более длительное время до полного распада аустенита на бейнит. При этом существенных напряжений не возникает, но твердость получается ниже, чем при других способах закалки. Преимуществом этого способа является то, что после него не требуется отпуск. Изотермическая закалка обычно применяется для деталей сложной формы, склонных к деформациям и образованию трещин [28].

Отпуск является заключительной операцией термической обработки стали. Целью отпуска может являться снятие внутренних напряжений или получение определённой структуры, обеспечивающей необходимый комплекс механических свойств.

Термическая обработка, состоящая из закалки с высоким отпуском, улучшающая общий комплекс механических свойств, получила название улучшение.

Таким образом, были рассмотрены основные виды и способы термической обработки сталей.

2.2 Влияние легирующих элементов на свойства сталей

Различие в термической обработке легированной и углеродистой сталей состоит в выборе различных температур и скорости нагрева, длительности выдержки при этих температурах и способе охлаждения.

Легированные стали менее теплопроводны по сравнению с углеродистыми. Это необходимо учитывать и особенно осторожно нагревать детали из стали, содержащей такие элементы, как вольфрам [29].

Критические температуры у одних легированных сталей выше, у других – ниже; выбор температур термической обработки производится в зависимости от содержания в стали легирующих элементов.

Все легирующие элементы можно разбить на две группы: элементы, повышающие критические точки A_{C1} и A_{C3} , а следовательно, и температуры нагрева при термической обработке и элементы, понижающие критические точки. К первой группе относятся Cu, V, W, Si, Mo, Ti, Nb и другие. В связи с этим отжиг, нормализация и закалка сталей, содержащих перечисленные элементы, произво-

дятся при более высоких температурах, чем отжиг, нормализация и закалка углеродистых сталей. Ко второй группе элементов относятся Mn, Ni и другие. При выборе температуры термической обработки имеет значение склонность аустенитного зерна к росту.

Все легирующие элементы, за исключением Mn, препятствуют росту аустенитного зерна при нагреве. Особенно сильное влияние на уменьшение роста аустенитного зерна оказывают элементы, образующие в сталях карбиды такие как Cr, Mo, W, V, Ti. Карбиды располагаются по границам зерна и затрудняют его рост при нагреве. Таким образом, легированные стали за исключением марганцевых при термической обработке не склонны к перегреву, нагревать их возможно до более высоких температур, чем углеродистые стали.

Время выдержки устанавливается несколько большее, чем для углеродистых сталей, так как легированная сталь обладает худшей теплопроводностью и полный прогрев изделия требует большего времени. Кроме того, для получения лучших механических свойств необходима выдержка, чтобы полностью растворились легированные карбиды в аустените.

Скорость охлаждения при термической обработке устанавливается в соответствии с устойчивостью переохлажденного аустенита и величиной критической скорости закали. Практически это приводит к тому, что многие легированные стали закаливаются на мартенсит в масле, то есть при меньшей скорости охлаждения, чем углеродистая сталь.

Легированная сталь обладает большей прокаливаемостью. Чем выше степень легированности сталей, тем более глубокой прокаливаемостью они обладают.

Почти все легирующие элементы кроме Co сдвигают кривые распада аустенита вправо и, соответственно, снижают критическую скорость закали. Поэтому легированные стали прокаливаются на значительно большую глубину, чем углеродистые. Особенно сильно повышают прокаливаемость марганец, хром, никель.

При отпуске легированной стали можно наблюдать явление отпускной хрупкости, т. е. понижение ударной вязкости, происходящее несмотря на уменьшение твердости. Причиной отпускной хрупкости является выделение хрупких

фаз по границам зерен у таких широко распространенных сталей, как хромистые, хромоникелевые и другие. Можно полностью избежать отпускной хрупкости, охлаждая такую сталь после отпуска не на воздухе, а в масле или в воде, а также применяя хорошо раскисленную сталь или другие марки стали, содержащие молибден или вольфрам, препятствующие выделению хрупких фаз.

Отметим, наконец, еще одну важную особенность термической обработки легированной стали. При закалке большинства сталей часть зерен высоколегированного аустенита мартенситного превращения не претерпевает, и в структуре стали сохраняется некоторое количество остаточного аустенита [30].

При закалке углеродистых сталей из переохлажденного аустенита образуется мартенсит. Влияние легирующих элементов на рост зерна аустенита при нагреве зависит от их способности образовывать карбиды при взаимодействии с углеродом. Элементы, не образующие карбиды, такие как Ni, Co, Si, и Cu, практически не препятствуют росту зерна аустенита, а элементы, образующие карбиды, такие как Cr, W, Mo, V и Ti, препятствуют росту зерна аустенита. Сохранение мелкозернистого состояния аустенита обусловлено высокой теплостойкостью карбидов, являющихся барьерами для перемещения границ зерна аустенита.

Влияние легирующих элементов на мартенситное превращение выражается в изменении температурного интервала этого превращения, что отражается на количестве остаточного мартенсита в закаленной стали. Степень влияние легирующих элементов на структуру стали представлена на рисунке 1.

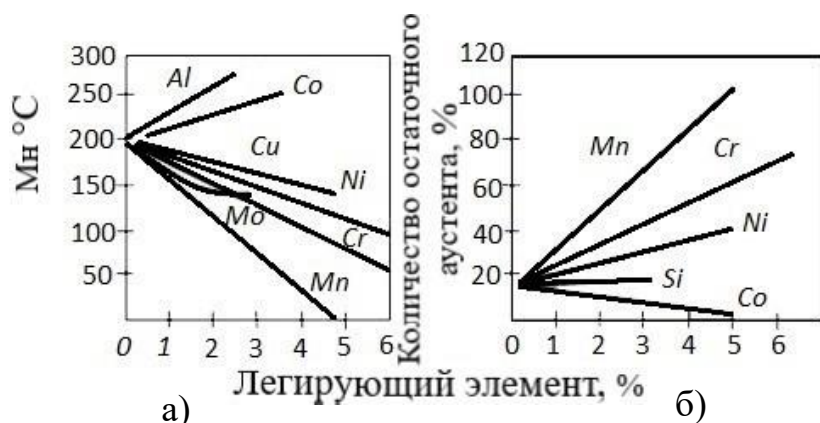


Рисунок 1 – Влияние легирующих элементов: а) – на температуру мартенситного превращения; б) – на количество остаточного аустенита в стали с 1,0 % углерода

Из рисунка 1 следует что, алюминий и кобальт повышают мартенситную точку и снижают количество остаточного аустенита, но большинство легирующих элементов такие как марганец, молибден, хром снижают мартенситную точку и увеличивают количество остаточного аустенита, что ухудшает качество стали после закалки. Для устранения остаточного аустенита такие стали после закалки обрабатываются холодом.

Марганец и хром при содержании до 1 % повышают ударную вязкость; при большей концентрации она снижается, достигая уровня нелегированного феррита примерно при 3 % Cr и 1,5 % Mn.

Большинство легирующих элементов измельчают зерно, что способствует повышению работы развития трещины и снижению порога хладноломкости. Наиболее сильно понижает порог хладноломкости и увеличивает сопротивление распространению трещины никель. Введение 1,0 % Ni снижает порог хладноломкости после термического улучшения стали от 60 до 80 °C. Остальные элементы, за исключением небольших добавок хрома, марганца и молибдена, повышают порог хладноломкости.

Влияние легирующих элементов на отпуск стали выражается количественно и качественно. Количественное влияние легирующих элементов – уменьшение скорости превращений и повышение температуры превращения. Это наиболее заметно проявляется при введении хрома, ванадия, титана, вольфрама, молибдена, кремния. Поэтому температурные интервалы всех видов отпуска легированных сталей на 100 или 150 °C выше по сравнению с углеродистыми

Качественное влияние легирующих элементов – карбидные превращения (преобразование легированного цементита в специальные карбиды) и влияние вторичной твердости (превращение остаточного аустенита в мартенсит и выделение дисперсных карбидов). Таким образом, легирование, изменяя скорости и температуру превращений, а также тепловые свойства стали, существенно влияет на режимы термической обработки [31].

Марганец и хром при содержании до 1 % повышают ударную вязкость; при большей концентрации она снижается, достигая уровня нелегированного феррита примерно при 3 % Cr и 1,5 % Mn.

Таким образом, были выявлены отличительные особенности термообработки, легированной и нелегированной стали. В легированных сталях нагрев изделий производится с меньшей скоростью. Температура нагрева для получения аустенита при введении карбидообразующих элементов повышается. Из-за замедления процесса распада переохлаждённого аустенита, мелкозернистое состояние охлажденного изделия возможно со значительно меньшей скоростью и в более мягком охладителе. Увеличивается прокаливаемость сталей, что позволяет упрочнять закалкой крупные изделия во всем сечении.

3 Исследуемый материал

3.1 Обоснование выбора материала

Для крепежных изделий применяются 11 классов прочности. Чтобы конечная продукция соответствовала их требованиям, заводы-производители руководствуются нормами, приведёнными в ГОСТ 33260 – 2015.

В качестве материала используют стали самых различных марок, как нелегированные и низколегированные, так и высоколегированные стали.

Наиболее распространёнными материалами для производства крепёжных изделий являются легированные стали, в особенности легированные хромом и никелем. Также особой популярностью пользуются нержавеющие стали. Эти стали по своему химическому составу и механическим свойствам подразделяются на несколько групп.

Стали нержавеющие аустенитные. Антикоррозионные свойства аустенитных сталей продуцируют входящие в их состав элементы Cr от 15 до 20 % и Ni от 5 до 15 %. Металл такого типа хорошо сваривается, отлично переносит горячую и холодную обработку. Аустенитная сталь, в свою очередь, бывает нескольких разновидностей.

A1 – из-за наличия примесей серы эта сталь в небольшой степени подвержена воздействию процесса коррозии. Но данный минус в некоторых случаях нивелируется повышенной твердостью и хорошей износостойкостью. Металлургией выпускается сталь под маркой 12X18H10.

A2 – сталь, получившая наибольшее распространение. Применяется для производства крепежа, используемого в химической отрасли и пищевой промышленности. Ближайшие аналоги – нержавеющие стали 03X18H11 и 08X18H10.

A3 – состав этого сплава схож с предыдущим вариантом. Но в него добавляются такие легирующие элементы, как тантал, ниобий и титан. Благодаря этому сталь A3 повышается ее устойчивость к воздействию коррозии при работе в условиях высоких температур. Ближайший аналог – нержавеющая сталь марки 08X18H10T.

А4 – используется для производства крепежа, предполагаемое место работы которого – это хлор- и кислотосодержащая среда. По уровню востребованности в сфере изготовления метизов она находится на втором месте вслед за сталью А2.

А5 – обладает хорошей устойчивостью к воздействию повышенных температур. Придают данному сплаву это свойство те же легирующие элементы, что и в стали А3, но с несколько иным процентным содержанием. Нержавеющая сталь А5 способна работать в кислотной среде. Ближайший аналог – 08Х17Н13М2Т.

Мартенситные нержавеющие стали более твердые по сравнению с аустенитными сталями. Упрочнение мартенситных сталей осуществляется закалкой, после которой следует технологический процесс отпуска. Наиболее популярны следующие марки мартенситной нержавеющей стали: Х9М, 15Х11МФ, 10Х9МФБ, 18Х11МНФБ и некоторые другие.

Стали нержавеющие ферритные. Эти стали характеризуются низким содержанием углерода. Поэтому по сравнению предыдущим вариантом металла они значительно мягче. Отечественной металлургией выпускаются следующие марки ферритных сталей: 12Х17, 12Х13, 08Х13 и другие.

В работе исследуется жаропрочная хромистая сталь 20Х13. Выбор этого материала основан на запросе предприятия Пензенской области.

Сталь 20Х13 – жаропрочная хромистая сталь мартенситного класса. Химический состав по ГОСТ 5632 – 2014 представлен в таблице 3 [32]. Требуемые свойства стали 20Х13 в состоянии поставки представлены в таблице 4.

Таблица 3 – Химический состав стали 20Х13

Хим. элемент	С	Si	Mn	Cr	S	P
Значение, %	0,16...0,25	не более 0,8	не более 0,8	12,0...14,0	не более 0,025	не более 0,030

Таблица 4 – Механические свойства стали 20Х13 в состоянии поставки

Параметры	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %	Твердость HB	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²
Значение	490,0	20,0	126...197	61,0...171,0

Сталь 20X13 обладает ограниченной свариваемостью, не чувствительна к образованию флокенов и склонна к отпускной хрупкости.

Углерод занимает от 0,16 до 0,25 % общего состава. Сильно влияет на прочностные и технологические характеристики стали. Карбиды железа обладают повышенной твердостью, а также они делают возможным упрочнение стали за счет проведения термической обработки. Обратным эффектом такого легирования является ухудшение пластичных свойств и свариваемости.

Хром от 12,0 до 14,0 % повышает износостойкость стали благодаря образованию на его поверхности оксидов хрома. Помимо этого, он благоприятно воздействует на способность металла к термическому упрочнению, увеличивает сопротивление к образованию коррозии. Стали, легированные хромом, лучше переносят нагрузку в условиях повышенных температур. Однако существует и негативное проявление данного элемента. Хром увеличивает вероятность появления отпускной хрупкости, что требует тщательного подхода к выбору режима термической обработки.

Кремний и марганец – обязательные добавки для стали. Они являются главными раскислителями и способствуют удалению кислорода из ее состава. Их концентрация регламентируется ГОСТ 5632 – 2014. Помимо этого, данные компоненты хорошо влияют на технологические свойства, такие как пластичность и свариваемость. Марганец, кроме всего прочего, оказывает положительное воздействие на чистоту поверхности.

Таким образом, был обоснован выбор материалов применяемых для изготовления крепёжных изделий. Был приведён химический состав стали 20X13, а также рассмотрены влияния легирующих элементов на свойства исследуемого материала.

3.2 Структурные особенности стали 20X13 при термической обработке

Сталь 20X13 – жаропрочная хромистая сталь мартенситного класса. При нагреве отожженной стали 20X13 полиморфное α -гамма превращение в ней про-

исходит в интервале температур от 820 °С (A_{c1}) до 950 °С (A_{c3}). Температура точки A_{r1} составляет 780 °С. Диаграмма состояния представлена на рисунке 2.

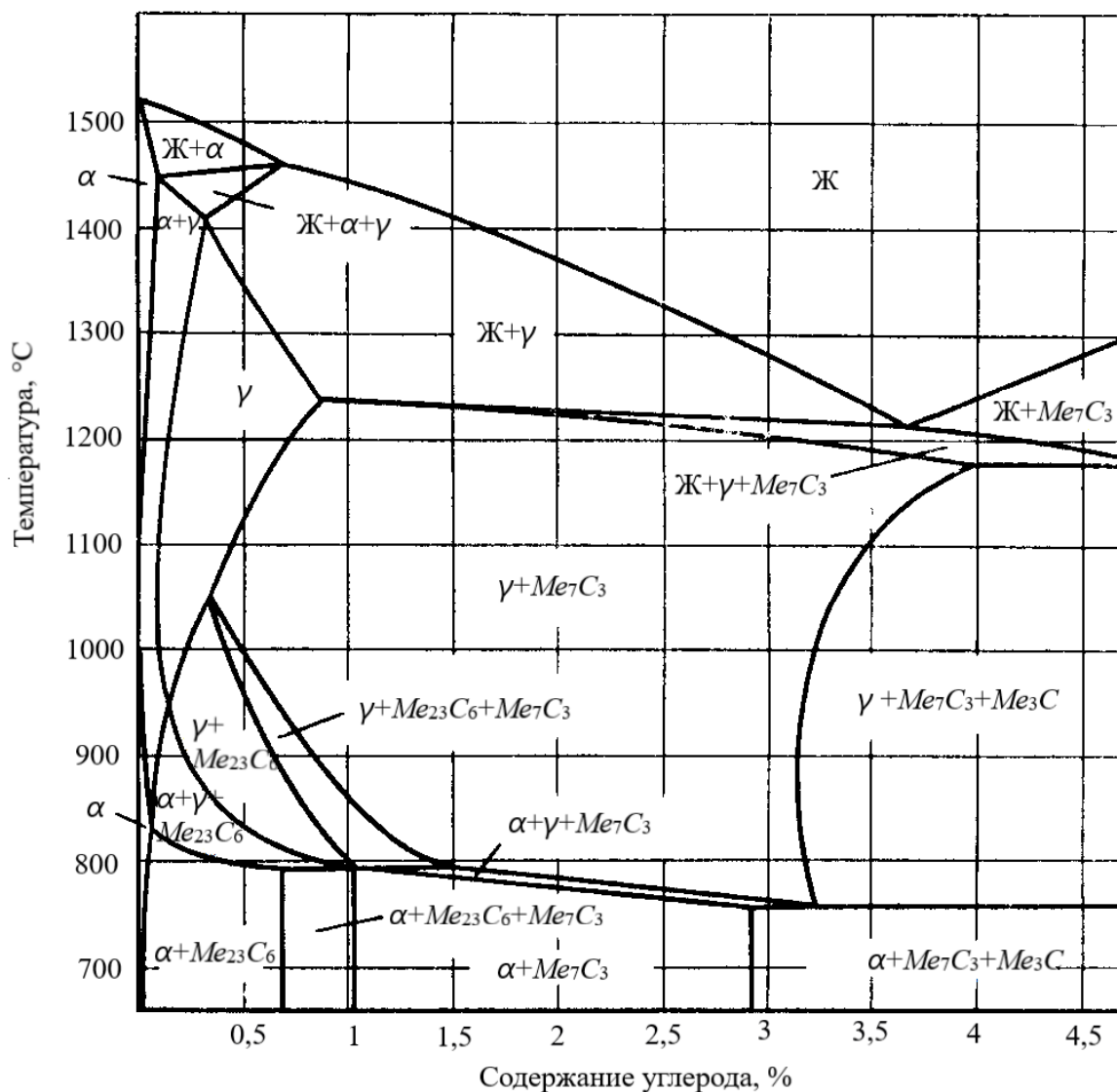


Рисунок 2 – Диаграмма состояния стали, содержащей 13 % хрома

При изотермической выдержке или медленном охлаждении в интервале от 800 до 550 °С аустенит распадается на феррито-карбидную смесь. Эта феррито-карбидная смесь состоит из высокохромистого феррита и карбида типа $Cr_{23}C_6$.

Перед началом закалки фазовый состав стали 20X13 представляет собой феррит и мелкодисперсные карбиды $Cr_{23}C_6$. При нагреве стали до температуры под закалку на мартенсит происходит частичное растворение мелкодисперсных карбидов. Структуру стали после закалки, как правило составляет мелкоигольчатый мартенсит и незначительные включения карбидом хрома [33].

Рекомендуемая температура отпуска и время выдержки выбирается в соответствии со стандартами таким образом, чтобы получить требуемые прочностные и эксплуатационные свойства. Как правило, выбирают высокий отпуск с охлаждением на воздухе, чтобы получить сталь с минимальными внутренними напряжениями и достаточно высокими прочностными характеристиками. После отпуска на воздухе сталь 20X13 имеет структуру отпущенного сорбита, с незначительными включениями карбидов хрома. Важно знать и тот факт, что сталь 20X13 склонна к отпускной хрупкости 2-го рода, график которой представлен на рисунке 3.

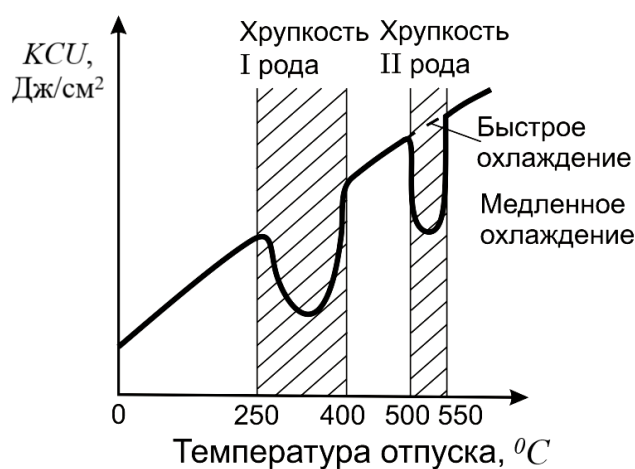


Рисунок 3 – График отпускной хрупкости

Таким образом, были выявлены структурные особенности стали 20X13, которые помогут в дальнейшем исследовании.

3.3 Режимы термической обработки и свойства стали 20X13, регламентируемые нормативной документацией

Температура критических точек материала 20X13: $A_{c1} = 820$ °C, $A_{c3} = 950$ °C, $A_{r1} = 780$ °C. Диаграмма состояния представлена на рисунке 2 в подразделе 3.2.

Из ГОСТ 5949 – 2018 следует, что для данной стали предусматривается два варианта термической обработки. Первый вариант заключается в закалке с темпе-

ратурой от 1000 до 1050 °С с охлаждением на воздухе или в масле и отпуске с температурой от 660 до 770 °С с последующим охлаждением на воздухе, в масле или в воде. Механические свойства стали 20Х13 по первому варианту термической обработки представлены в таблице 5.

Второй вариант заключается в закалке с температурой от 1000 до 1050 °С с охлаждением на воздухе или в масле и отпуске с температурой от 600 до 700 °С с последующим охлаждением на воздухе или в масле. Механические свойства стали 20Х13 по второму варианту термической обработки также представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Механические свойства стали 20Х13 после термообработки

Параметры	Варианты термо- обработки	Предел текучести σ_t , Н/мм ²	Твёрдость НВ,	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU , Дж/см ²
Значение	1	440,0	126...150	650,0	16,0	55,0	78,0
	2	635,0	155...197	830,0	10,0	50,0	59,0

По ГОСТ 23304 – 78 для достижения требуемых свойств болтов и шпилек, изготовленных из горячекатаных и кованых заготовок стали 20Х13, диаметром до 200 миллиметров, представленных в таблице 6, проводится термическая обработка, включающая в себя закалку при температуре от 1000 до 1050 °С с охлаждением на воздухе или масле и отпуск с температурой от 650 до 720 °С с охлаждением в воде или масле.

Таблица 6 – Механические свойства стали 20X13

Параметры	Изделие	Категория прочности	Твёрдость НВ	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Предел прочности σ_B	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²
Значение	болты, шпильки	90	277...352	882,0 ... 1078,0	980,0	15,0	45,0	59,0
		55	187...269	539,0...686,0	686,0	15,0	50,0	59,0
		60	229...285	588,0...735,0	784,0	15,0	45,0	59,0
	гайки	55	187...269	539,0...686,0	686,0	15,0	50,0	59,0
		60	217...269	588,0...735,0	784,0	15,0	45,0	59,0

По ГОСТ 25054-81 для достижения требуемых свойств заготовки из стали 20X13, представленных в таблице 7, проводится термическая обработка, включающая в себя закалку при температуре от 1000 до 1050 °С на воздухе или в масле и отпуск с температурой от 660 до 770 °С с охлаждением на воздухе.

Таблица 7 – Механические свойства стали 20X13

Параметры	Твёрдость НВ	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ Н/мм ²	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²
Значение	229...285	411,0	647,0	16,0	50,0	64,0

Согласно СТ ЦКБА 016 – 2005 для достижения требуемых свойств заготовки из стали 20X13, представленных в таблице 8, проводится термическая обработка, включающая в себя закалку при температуре от 1000 до 1050 °С в масле и отпуск с температурой от 600 до 670 °С, от 650 до 700 °С и от 700 до 770 °С для охлаждения на воздухе. Выдержка при температуре заковки – из расчета от 1 до 1,5 минут на 1 миллиметр толщины (диаметра) заготовки, но не менее 20 минут. Выдержка при температуре отпуска – из расчета от 3 до 3,5 мин на 1 миллиметр толщины (диаметра) заготовки, но не менее 2 часов.

Таблица 8 – Механические свойства стали 20X13

Параметры	Температура отпуска °C	Диаметр заготовки	Твёрдость HB	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²
Значение	600...670	до 60	269...310	686,0	882,0	10,0	40,0	40,0
	650...700		235...269	539,0	784,0	12,0	45,0	60,0
	700...770	до 100	197...248	441,0	647,0	15,0	50,0	75,0
		до 300				13,0	45,0	50,0

По ГОСТ 20700 – 75 для достижения требуемых свойств болтов и шпилек, изготовленных из стали 20X13, проводится термическая обработка, включающая в себя закалку при температуре от 1000 до 1050 °C с охлаждением на воздухе или в масле и отпуск с температурой от 650 до 720 °C также с охлаждением на воздухе или в масле. При охлаждении массивных заготовок в масле начальная температура его, во избежание загорания, не должна превышать 50 °C. Механические свойства после такой термической обработки представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Механические свойства стали 20X13

Параметры	Изделие	Категория прочности	Твёрдость HB	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ Н/мм ²	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²
Значение	болты и шпильки	60	229...285	588...735	784,0	15,0	45,0	59,0
		55	217...269	539...686	686,0		50,0	
	гайки	60	187...217	—	—	—	—	—

По ГОСТ 18968 – 73 для получения требуемых свойства горячекатаных и кованых заготовок диаметром до 60 миллиметров из стали 20X13, представленных в таблице 10, проводится термическая обработка, включающая в себя закалку при

температуре от 1000 до 1050 °С с охлаждением на воздухе или в масле и отпуск с температурой от 660 до 770 °С с охлаждением на воздухе.

Таблица 10 – механические свойства стали 20Х13

Параметры	Твёрдость НВ	Условный предел те- кучести $\sigma_{0,2}$ Н/мм ²	Предел прочно- сти σ_B , Н/мм ²	Относитель- ное удлинение δ_5 , %	Относитель- ное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCU , Дж/см ²
Значение	207...241	490...655	670,0	18,0	50,0	69,0

Наглядный обзор нормотехнической документации по термической обработке стали 20Х13 представлен в приложении А в таблице А 1. Из приложения следует, что ГОСТ 5949 – 2018, ГОСТ 25054 – 81 и ГОСТ 18968 – 72 при практически одинаковых режимах термической обработки требуют разные свойства. Это наблюдается и в ГОСТ 23304 – 78 и ГОСТ 20700 – 75. Сравнительные диаграммы представлены на рисунках 4 и 5.

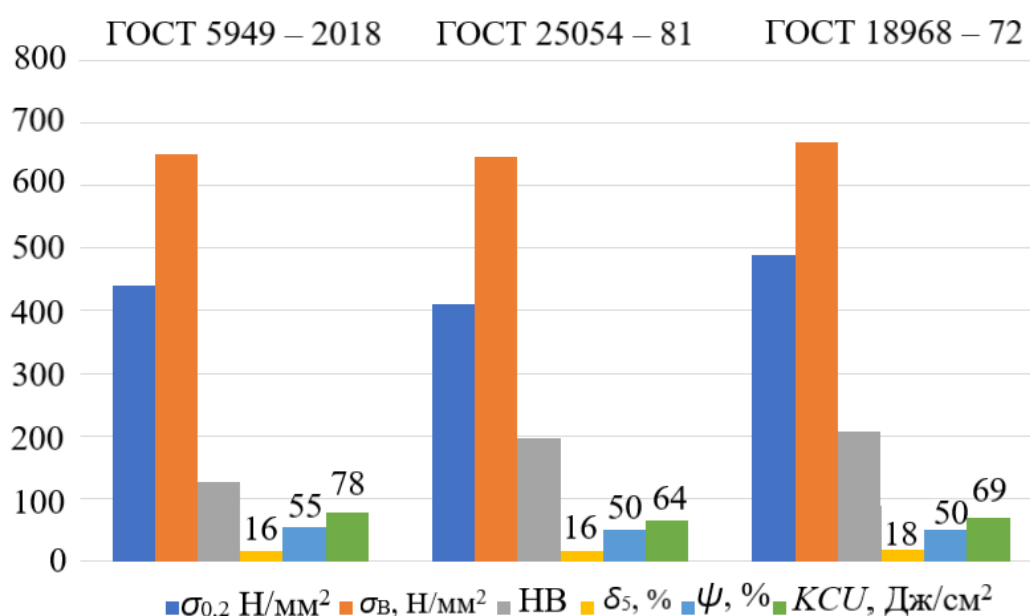


Рисунок 4 – Сравнительная диаграмма свойств ГОСТ 5949 – 2018, ГОСТ 25054 – 81 и ГОСТ 18968 – 72

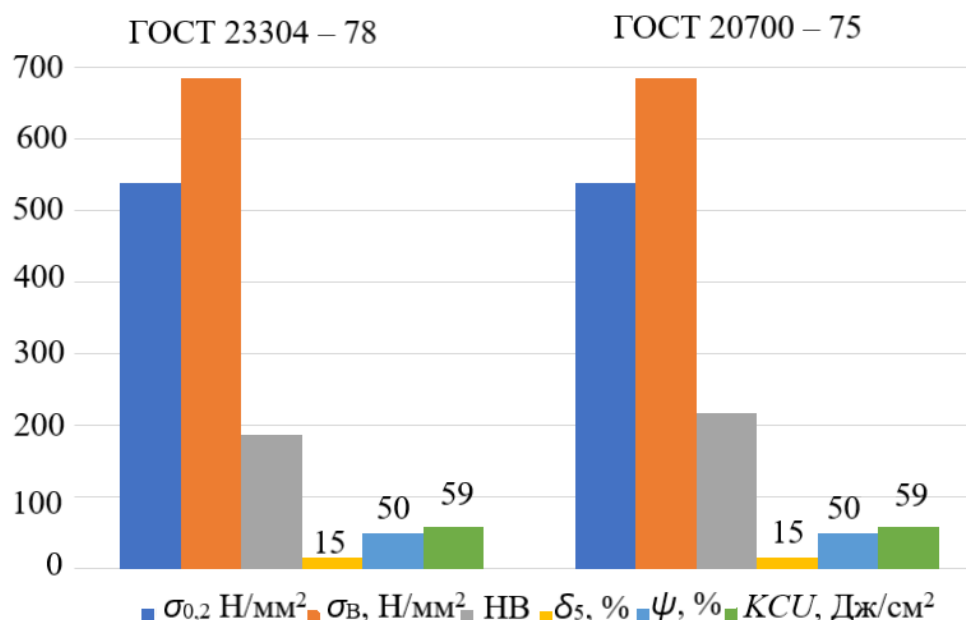


Рисунок 5 – Сравнительная диаграмма свойств ГОСТ 23304 – 78 и ГОСТ 20700 – 75

Таким образом, был проведён анализ нормотехнической документации и выявлено, что разные стандарты при одинаковых режимах термической обработки требуют разные свойства, например, при практически одинаковых режимах термообработки ГОСТ 5949 – 2018, ГОСТ 25054 – 81 и ГОСТ 18968 – 73 дают нам отличия по ударной вязкости. ГОСТ 5949 – 2018 даёт нам существенные отличия твёрдости в сравнении с ГОСТ 25054 – 81 и ГОСТ 18968 – 73. По ГОСТ 23304 – 78 и ГОСТ 20700 – 75 для болтов и шпилек категории прочности 55 при одинаковых режимах даёт нам схожие значения по всем параметрам кроме твёрдости, а именно по его минимальному значению, которое в ГОСТ 23304 – 78 меньше на 30 НВ чем в ГОСТ 20700 – 75. Также в данных стандартах имеются существенные отличия по получаемой твёрдости для гаек. Такие различия в механических свойствах могут вызвать определённые проблемы при выборе режимов термической обработки.

4 Методы исследования

4.1 Микроструктурное исследование

Микроструктурный анализ – метод исследования структуры металлов и сплавов методами оптической, просвечивающей электронной (ПЭМ) и растровой электронной (РЭМ) микроскопии на специально приготовленных образцах. Микроструктура показывает размер, форму и характер взаимного расположения фаз в металлах и сплавах. Проведение микроструктурного анализа регламентирует ГОСТ 5640 – 2020 [34].

Микроанализ состоит из приготовления микрошлифа и исследования его под микроскопом. Основной структурой составляющей материалы являются зёрна. Микроскопические методы дают возможность определить размеры и форму кристаллов, наличие различных по своей форме кристаллов, их распределение и относительные объёмные количества, форму инородных включений и микропустот и др. Величина зерна поликристаллических материалов является одной из важных характеристик структуры и определяет большинство физико-механических свойств материалов.

Образец металла, приготовленный специальным способом для исследования его структуры под микроскопом, называется микрошлифом. Методика подготовки микрошлифов включает в себя такие операции, как заторцовка, шлифование, полирование и травление.

При заторцовке с помощью напильника одна из поверхностей образца опиливается на плоскость. Зачистка может быть произведена на наждачном круге.

Шлифование заключается в обработке полученной плоскости на наждачной бумаге, начиная с крупных и кончая мелкими абразивными зёрнами.

Полирование осуществляется на вращающемся плоском круге, покрытом сукном (войлоком). Круг смачивается водой с очень мелким абразивным порошком и приводится в быстрое вращение. Шлиф слегка прижимается к кругу. Полирование считается законченным, если удалены все риски и поверхность становится зеркальной.

Отполированный образец в первую очередь необходимо исследовать под микроскопом в нетравленном состоянии. Подобным способом возможно установить наличие дефектов (пор, трещин и т. п.) и неметаллических включений (шлаков, графита).

Для выявления микроструктуры полированную поверхность шлифа подвергают травлению различными химическими реактивами – травителями. Для выявления структуры необходимо создать рельеф поверхности. С этой целью образец погружают в раствор полированной поверхностью кверху либо книзу, или втирают реактив ватой, или смачивают поверхность образца из капельницы либо пипетки.

Продолжительность травления зависит от применяемого увеличения: для малого увеличения следует травить дольше, чем для большого.

В качестве растворителей используют различные спирты, а также неразведенные кислоты. Кислоты, щелочи, соли и органические растворители должны быть высокой степени чистоты, так как при загрязнении меняется скорость и исход травления.

Для выявления общей микроструктуры используют растворы азотной либо пикриновой кислот в спирте, либо воде; применяют их смеси. Водные растворы травят быстрее и сильнее спиртовых, и они рекомендуются для выявления структуры литой и отожженной стали, серого и белого чугуна, а кроме того, высокоотпущенной стали.[35].

В данной работе будет применяться реактив «Царская водка», смесь концентрированных азотной HNO_3 и соляной HCl кислот, взятых в соотношении 1 к 3 по объёму. Реактив будет наноситься методом втирания и промываться в растворе соды.

Таким образом, были рассмотрены основы микроструктурного анализа и этапы подготовки образцов. Также был выбран реактив и метод травления.

4.2 Исследование механических свойств

Механические свойства металлов (прочность, упругость, пластичность, вязкость), как и другие свойства, являются исходными данными при проектировании и создании различных конструкций.

Методы определения механических свойств металлов делятся на следующие группы:

- статические, когда нагрузка возрастает медленно и плавно;
- динамические, когда нагрузка возрастает с большой скоростью;
- циклические, когда нагрузка многократно изменяется (испытание на усталость);
- технологические, для оценки поведения металла при обработке давлением (испытания на изгиб, перегиб, выдавливание).

В данной работе исследуются, прочность, твёрдость и ударная вязкость и для определения этих свойств будут применены соответствующие стандартные методы исследования.

4.2.1 Испытание на равноостное растяжение

Для определения прочности и пластичности проводились испытания на равноостное растяжение образцов по методике, приведённой в ГОСТ 1497 – 84 [36].

Определяют следующие механические свойства:

- временное сопротивление или предел прочности σ_B ;
- предел текучести σ_T или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$;
- относительное удлинение δ_5 ;
- относительное сужение ψ .

Относительное удлинение рассчитывается по формуле [36].

$$\delta_5 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100, \quad (4.1)$$

где δ_5 – относительное удлинение, %;

L_u – длина после разрушения, мм;

L_0 – длина до разрушения, мм.

Относительное сужение рассчитывается по формуле [36].

$$\psi = \frac{S_0 - S_u}{S_0}, \quad (4.2)$$

где ψ – относительное сужение, %;

S_0 – площадь поперечного сечения до начала испытания, мм²;

S_u – площадь поперечного сечения после испытания, мм².

При испытании на растяжение необходимо использовать подготовленный образец, показанный на рисунке 7.

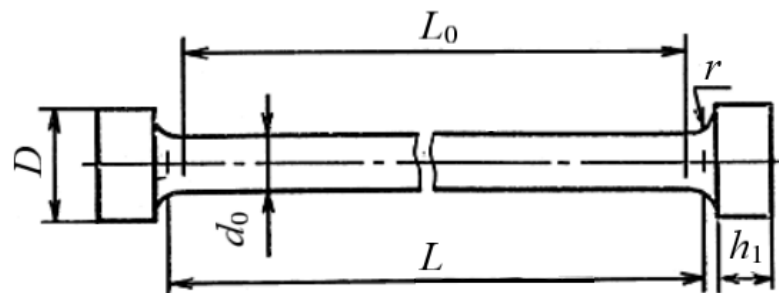


Рисунок 7 – Схема образца для испытаний на равноостное растяжение ГОСТ 1497 – 84: d_0 – диаметр рабочей части образца; L_0 – длина исследуемой части образца; L – длина цилиндрической части образца; r – радиус галтели; h_1 – длина головки образца; D – диаметр головки образца

Визуально образец для испытания на равноостное растяжение показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Образец для испытания на равноостное растяжение

Скорость нагружения, определяемая свободно движущимся ползуном, не должна превышать 25 мм/мин. Зажимы разрывной машины должны быть самоцентрирующимися во избежание бокового нагружения образца.

Разрывные и универсальные испытательные машины должны соответствовать требованиям ГОСТ 28840-90 [37]. Штангенциркули должны соответствовать требованиям ГОСТ 166-89 [38]. Микрометры должны соответствовать требованиям ГОСТ 6507-90 [39]. Тензометры должны соответствовать требованиям нормативно-технической документации.

Образцы рекомендуется изготавливать на металлорежущих станках. При изготовлении образцов принимают меры (охлаждение, соответствующие режимы обработки), исключающие возможность изменения свойств металла при нагреве или наклепе, возникающих в результате механической обработки.

Для испытания на растяжение применяют пропорциональные цилиндрические или плоские образцы диаметром или толщиной в рабочей части 3,0 миллиметра и более с начальной расчетной длиной l_0 , вычисляемой по формулам [36]

$$l_0 = 5,65\sqrt{F_0}, \quad (4.3)$$

$$l_0 = 11,3\sqrt{F_0}, \quad (4.4)$$

где l_0 – начальная расчётная длина;

F_0 – площадь поперечного сечения образца.

Форма и размеры головок и переходных частей цилиндрических и плоских образцов определяются способом крепления образцов в захватах испытательной машины. Способ крепления должен предупреждать проскальзывание образцов в захватах, смятие опорных поверхностей, деформацию головок и разрушение образца в местах перехода от рабочей части к головкам и в головках.

Предельные отклонения по толщине плоских образцов с механически не обработанными поверхностями должны соответствовать предельным отклонениям по толщине, установленным для металлопродукции.

Рабочая длина образцов должна составлять:

- от $l_0 + 0,5d_0$ до $l_0 + 2d_0$ – для цилиндрических образцов;
- от $l_0 + 1,5\sqrt{F_0}$ до $l_0 + 2,5\sqrt{F_0}$ – для плоских образцов.

При разногласиях в оценке качества металла рабочая длина образцов должна составлять:

- $l_0 + 2d_0$ – для цилиндрических образцов;
- $l_0 + 2\sqrt{F_0}$ – для плоских образцов.

При определении предела пропорциональности и пределов текучести условных с допусками на величину пластической или полной деформации при нагружении или остаточной деформации при разгрузении до 0,1 % относительная цена деления шкалы тензометра не должна превышать 0,005 % от начальной расчетной длины по тензометру; при определении предела текучести условного с допуском на величину деформации от 0,1 до 1 % – не должна превышать 0,05 % от начальной расчетной длины по тензометру. Линейки металлические должны соответствовать требованиям ГОСТ 427 – 75 [40].

4.2.2 Исследование твёрдости

Исследование твёрдости проводится на специальном оборудовании, называемом твердомером. Существует три шкалы измерения твёрдости. Измерение твёрдости по Виккерсу, которое регламентируется ГОСТ 2999 – 75 [41], по Бринеллю – ГОСТ 9012 – 59 [42], по Роквеллу – ГОСТ 9013 – 59 [43].

Измерение твёрдости в данной работе будет производится по Бринеллю и соответственно по ГОСТ 9012 – 59.

Толщина образца должна не менее чем в 8 раз превышать глубину отпечатка. Глубина отпечатка h определяется по формуле [42]:

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}, \quad (4.5)$$

где h – глубина отпечатка, мм;

D – диаметр стального шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Твердость по Бринеллю HB численно равна отношению приложенного усилия к площади сферического отпечатка.

Для стального шарика, если нагрузка выражена в ньютонах число твёрдости вычисляют по формуле [42]:

$$HB = \frac{0,100F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4.6)$$

где HB – значение твёрдости по Бринеллю;

F – нагрузка, приложенная к стальному шарiku, Н;

A – площадь поверхности сферического отпечатка, мм^2 ;

D – диаметр стального шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Если нагрузка выражена в килограмм-силах число твёрдости вычисляется по формуле [42]:

$$HB = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (4.7)$$

Твердость по Бринеллю обозначают символом HB , которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр, и после символа указывают диаметр шарика, значение приложенного усилия в килограмм-силах, продолжительность выдержки, если она отличается от 10 до 15 секунд. Измерение твёрдости может проводится как на подготовленных образцах, так и на самих изделиях.

4.2.3 Испытание на ударную вязкость

Определение ударной вязкости должно проводиться по ГОСТ 9454 – 78 на образцах с U -образным надрезом. Образец для испытания вырезается из заготовок стали в продольном направлении. Стандартные образцы имеют размеры 10×55 мм, площадь сечения в месте концентратора вида U $0,8 \text{ мм}^2$ [44].

Общей вид образца для испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454 – 78 показан на рисунке 6.

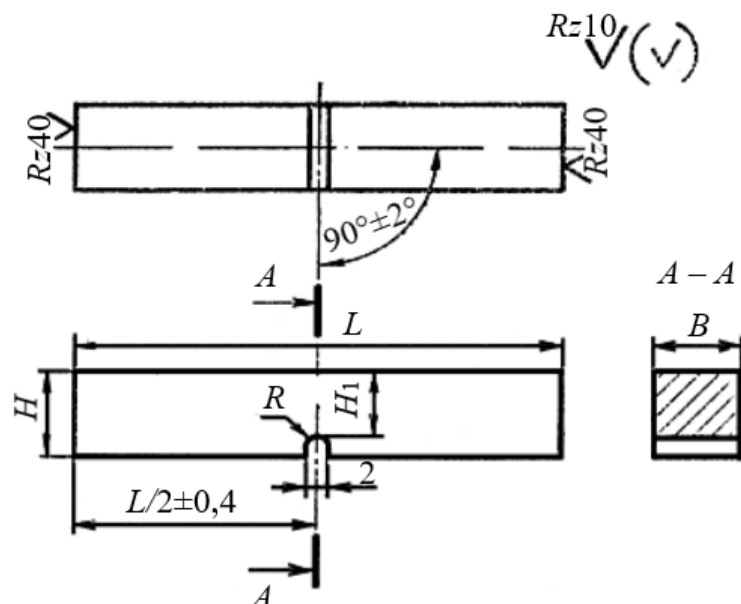


Рисунок 6 – Образец с концентратором вида *U* ГОСТ 9454 – 78: L – длина образца; B – толщина образца; H – высота образца; R – радиус концентратора; H_1 – высота рабочего сечения

Исследования на ударный изгиб проводили на образцах размером 10×55 мм, площадь сечения в месте концентратора вида *U* $0,8 \text{ мм}^2$. Вид некоторых из образцов, исследуемых в данной работе, представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Внешний вид образцов для испытания на ударный изгиб

Для проведения испытания используют маятниковые копры, требования к которым устанавливаются ГОСТ 10708 – 82 [45]. Скорость движения маятника в момент удара должна быть:

- $(5 \pm 0,5)$ м/с – для копров с номинальной потенциальной энергией маятника 50 (5,0); 150 (15); 300 (30,0) Дж (кгс·м);
- $(4 \pm 0,25)$ м/с – для копров с номинальной потенциальной энергией маятника 25 (2,5); 15 (1,5); 7,5 (0,75) Дж (кгс·м);
- $(3 \pm 0,25)$ м/с – для копров с номинальной потенциальной энергией маятника 5,0 (0,5) Дж (кгс·м) и менее.

Допускается применять копры с другой номинальной потенциальной энергией маятника. При этом номинальное значение потенциальной энергии маятника должно быть таким, чтобы значение работы удара составляло не менее 10 % от номинального значения потенциальной энергии маятника.

Таким образом, были рассмотрены основные механические свойства и методы испытания, по которым будут проводиться соответствующие исследования.

5 Экспериментальная часть

5.1 Образцы и оборудование для исследования

Для достижения задач, поставленных в выпускной работе, исследовались образцы в состоянии поставки, после закалки и после отпуска.

Исследование свойств и выбор температур термической обработки проводилось для разных видов изделий: шайбы, шпильки и шпинделя. Для шайб учитывались требования ГОСТ 18968 – 73, исследование осуществлялось на образцах диаметром 22 миллиметров. Для шпилек учитывались требования по ГОСТ 20700 – 75, исследовались образцы диаметром 22 миллиметров. Для шпинделей учитывались требования СТ ЦКБА 010 – 2004 [45], исследование проходило на образцах 75 и 120 миллиметров.

Исследование микроструктуры проводилось с помощью металлографического цифрового микроскопа *Altami MET 6C* представленного на рисунке 8. Это прямой микроскоп отраженного света для работы по методам светлого поля и поляризации. Данный микроскоп используется с программным обеспечением *Altami Studio 3.3* – сертифицированная программа для управления устройствами захвата изображения, а также для анализа и обработки полученных кадров.



Рисунок 8 – Металлографический цифровой микроскоп *Altami MET 6C*

Микроструктура стали 20Х13 в состоянии поставки представлена на рисунке 9 и представляет собой феррит и мелкодисперсные карбиды.

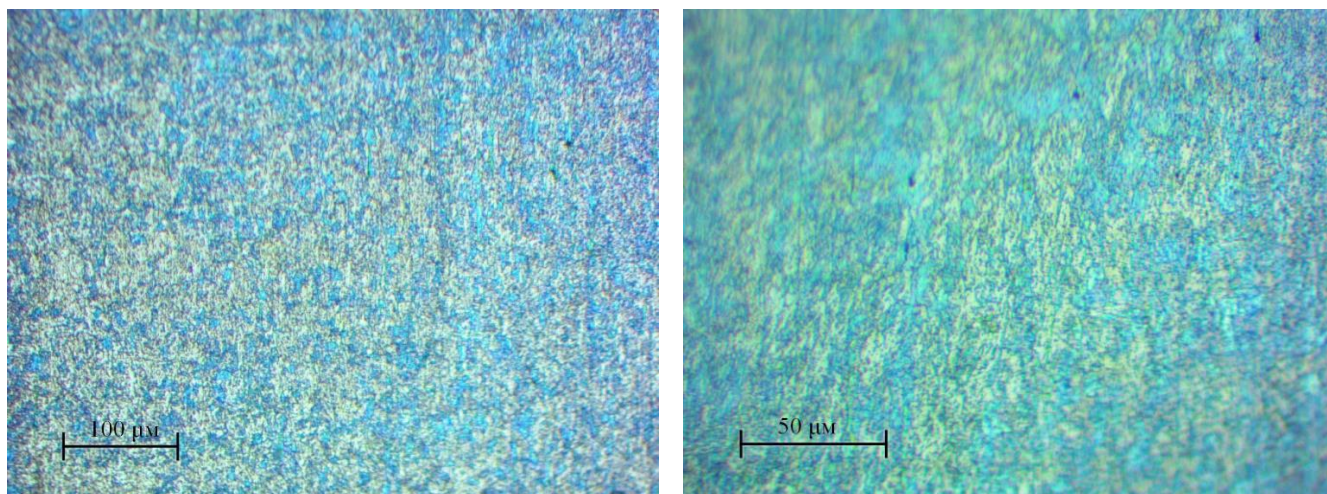


Рисунок 9 – Микроструктура стали 20Х13 в состоянии поставки

Исследование прочности проводилось на разрывной машине ИР 5145-500, изображение которой представлено на рисунке 10.



Рисунок 10 – Разрывная машина ИР 5145-500

ИР 5145-500 – разрывная машина универсального назначения с электронным силоизмерителем для испытания образцов материалов и изделий на растяжение, сжатие и изгиб на 500 кН. Могут быть использованы в производственных и лабораторных условиях в машиностроении, металлургии, энергетике, нефтегазовой и других отраслях промышленности при изучении и контроле физико-механических свойств металлов.

Испытание на равнооственное растяжение образцов из стали 20Х13 проводилось в состоянии поставки, после закалки и после отпуска. Образцы показаны на рисунке 11.



а)



б)

Рисунок 11 – Образцы испытания на равнооственное растяжение: а) – в состоянии поставки; б) – после отпуска

Определение твёрдости проводилось на оборудовании «Бринелль» ТШ-2, изображение которого представлено на рисунке 12.



Рисунок 12 – Твердомер «Бринелль» ТШ-2

Прибор «Бринелль» ТШ-2 предназначен для измерения твердости по методу вдавливания стального шарика в соответствии с методикой ГОСТ 9012 – 59. При испытаниях на твердость применяют шарики диаметром 10, 5 или 2,5 миллиметров в зависимости от толщины испытуемого материала. Отпечатки, полученные при таком методе измерения показаны на рисунке 13.

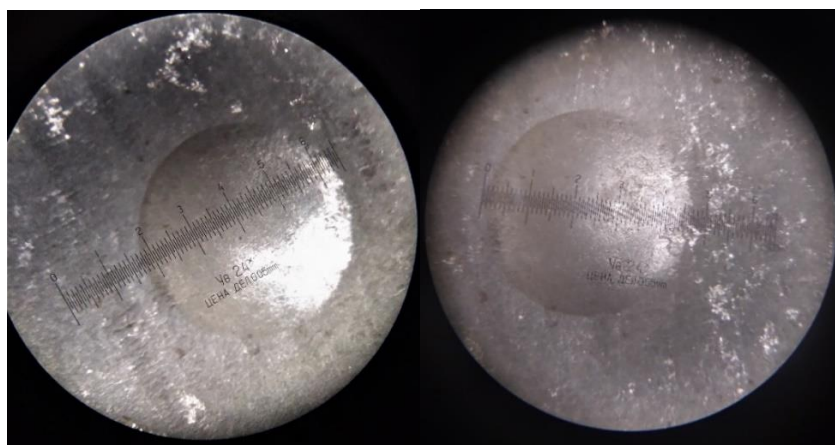


Рисунок 13 – Отпечатки при измерении твёрдости по Бринеллю, увеличение $\times 24$

Испытание на ударную вязкость проводилось на маятниковом копре ИО 5003-0,3-11, представленной на рисунке 14.

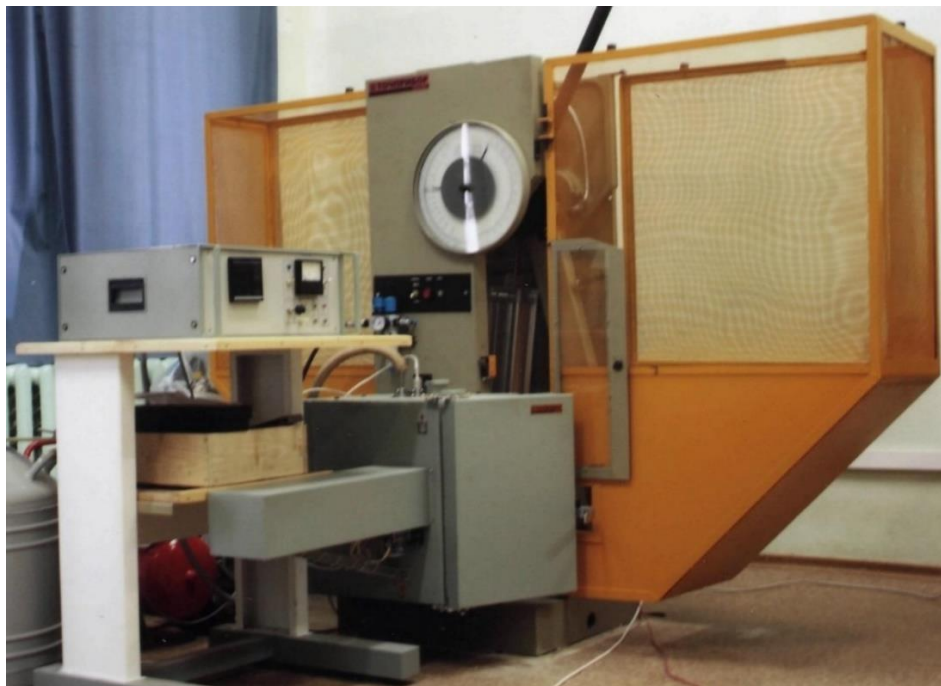


Рисунок 14 – Маятниковый копер ИО-5003-0,3-11

Копры используются для работы в помещениях лабораторного типа и устанавливаются на основании в 12 раз более тяжелом, чем масса копра. После разрушения образца маятник захватывается подъемным пневматическим устройством и взводится в верхнее заданное положение, работа пневматического захвата осуществляется при давлении питающего воздуха от 0,25 до 0,5 МПа. Результаты испытаний отображаются на дисплее компьютера, входящего в состав программно-технического комплекса. Программно-технический комплекс предназначен для работы с молотами любых энергий и углов сброса. Результаты испытаний статистически обрабатываются и распечатываются на лазерном принтере в виде протоколов испытаний. Файлы результатов испытаний сохраняются. Дополнительно имеется возможность производить с помощью программно-технического комплекса поверку копра. На копрах лабораторных ИО-5003-0,3-11 предусмотрено отключение питания и остановка маятника при отсутствии ограждения на местах установки и при недостаточном давлении воздуха в питающей сети.

Исследования на ударный изгиб проводили на образце размером 10×55 мм, площадь сечения в месте концентратора типа U 0,8 мм², представленном на рисунке 15.



Рисунок 15 – Образец испытания на ударную вязкость после отпуска

Таким образом были рассмотрены оборудования и проведены соответствующие испытания на образцах, результаты которых приведены в следующем подразделе 5.2.

5.2 Результаты эксперимента

В задачи выпускной работы входит определение режимов термической обработки для получения регламентируемых соответствующими нормативными документами механических свойств.

Для входящего контроля проведены исследования свойств стали 20Х13 в состоянии поставки. Результаты приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Механические свойства стали 20Х13 в состоянии поставки

Параметры	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	Твердость НВ	Ударная вяз- кость KCU , Дж/см ²
Значение	490,0...500,0	20,0...21,0	174,0...176,0	88,0...90,0

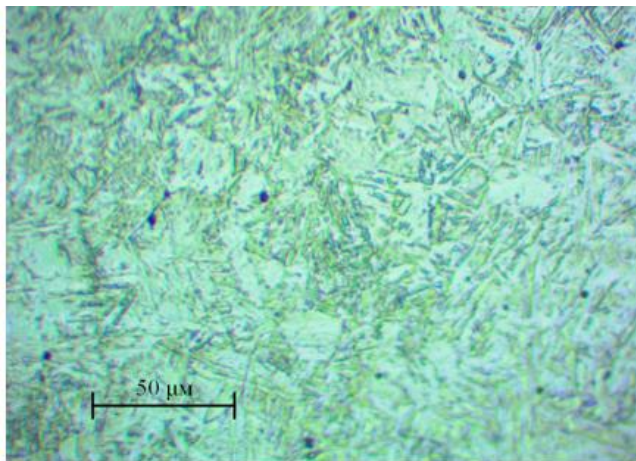
Механические свойства стали 20Х13 в состоянии поставки соответствуют требуемым свойствам ГОСТ 5632 – 2014.

Для исследования влияния температуры закалки на структуру и свойства стали 20Х13 проводилась закалка при 1000, 1050 и 1100 °С. Выбор данных температур обусловлен температурами критических точек материала 20Х13: $A_{c1} = 820$ °С, $A_{c3} = 950$, $A_{r1} = 780$ (смотри раздел 3.2). Время выдержки рассчитывалось от 1 до 1,5 минуты на 1 миллиметр толщины (диаметра), но не менее 20 минут [24]. Охлаждение проводилось в масле, чтобы получить структуру с минимальными внутренними напряжениями. Результаты исследований механических свойств приведены в таблице 12.

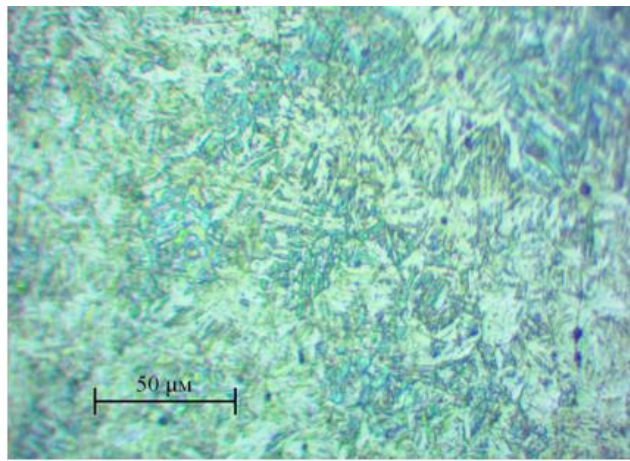
Таблица 12 – Зависимость твёрдости от температуры закалки

Изделия	Диаметр (толщина заготовки)	Температура закалки °С		
		1000	1050	1100
		Твёрдость НВ		
для шайб и шпилек	22	490,0...494,0	493,0...497,0	475,0...479,0
для шпинделей	75	485,0...488,0	489,0...491,0	470,0...474,0
	120	479,0...483,0	482,0...486,0	465,0...468,0

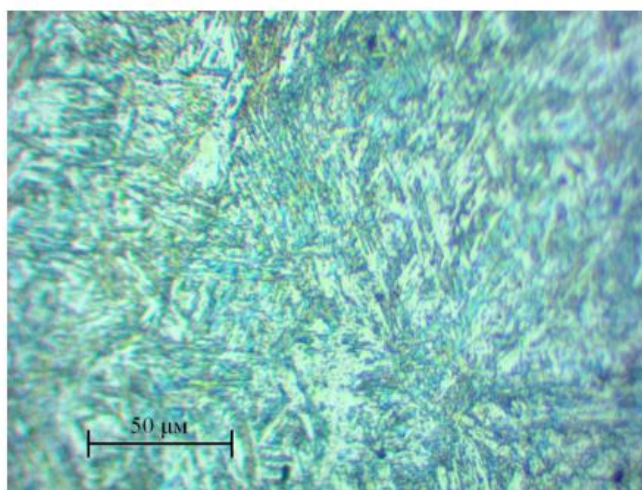
Результаты проведённых исследований показали, что рациональной температурой закалки является температура 1050 °С, так как она обеспечивает получение максимальной твёрдости и растворение карбидов хрома. С увеличением диаметра заготовки уменьшилась прокаливаемость и, в следствии чего, уменьшилась и твёрдость образца. Значение твёрдости, полученное при закалке в 1100 °С, получилась меньше, чем при 1050 °С – от 475 до 479 НВ и от 493 до 497 НВ, соответственно. Это связано с тем, что при нагреве выше 1050 °С начало увеличиваться зерно аустенита и в следствии чего в структуре стали 20Х13 наблюдается крупноигльчатый мартенсит, что и привело к уменьшению твёрдости. Данные выводы подтверждаются микроструктурными исследованиями, представленными на рисунке 16.



а)



б)



в)

Рисунок 16 – Микроструктура стали 20X13 диаметр 22 миллиметра после закалки при температуре: а) – 1000 °C; б) – 1050 °C; в) – 1100 °C

Исследования влияния отпуска на механические свойства проводилось по требованиям отраслевых и государственных стандартов. Время выдержки от 3 до 3,5 минуты на 1 миллиметр толщины, но не менее 2 часов. Среда охлаждения воздух.

Для шайб режимы термической обработки и требуемые свойства по ГОСТ 18968 – 73 приведены в таблице 13.

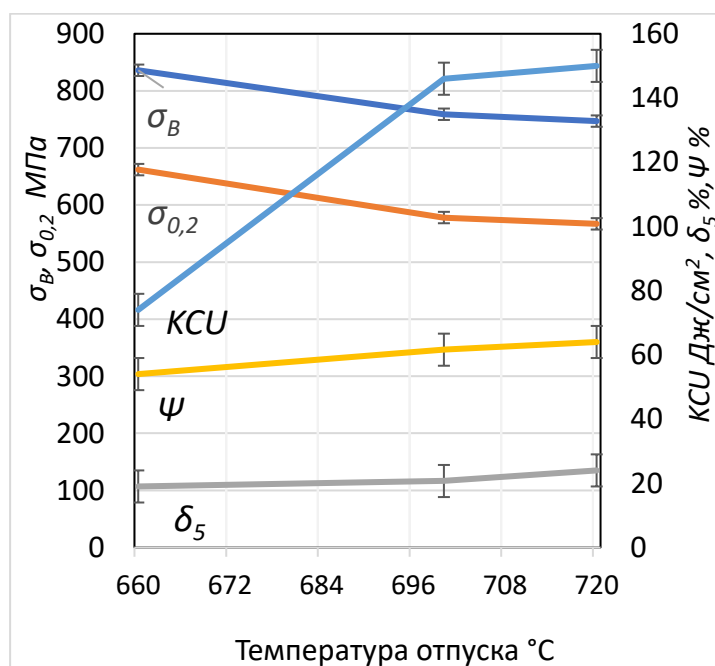
Таблица 13 – Механические свойства шайб из стали 20X13

Параметры	Температура отпуска °C	Предел прочности σ_B МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ МПа	Относительное удлинение δ_5 %	Относительное сужение ψ %	Ударная вязкость KCU Дж/см ²	Твёрдость HB
		Не менее					
Значение	660...770	670,0	490,0...550,0	18,0	50,0	59,0	207...241

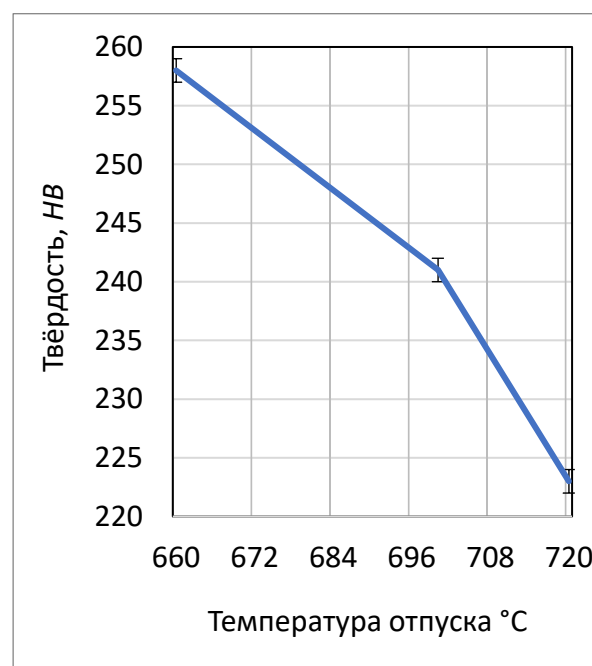
Проведено исследование влияния температуры отпуска на свойства стали 20X13. Результаты исследований приведены в таблице 14 и на рисунке 17.

Таблица 14 – Свойства после отпуска, шайбы диаметр 22 миллиметра

Параметры	Температура отпуска °C	Предел прочности σ_B МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ МПа	Относительное удлинение δ_5 %	Относительное сужение ψ %	Ударная вязкость KCU Дж/см ²	Твёрдость HB
Значение	660	836,0	662,0	19,1	54,1	74,0	258,0
	700	759,0	578,0	20,7	61,6	146,0	241,0
	720	747,0	567,0	24,2	64,1	150,0	223,0



а)



б)

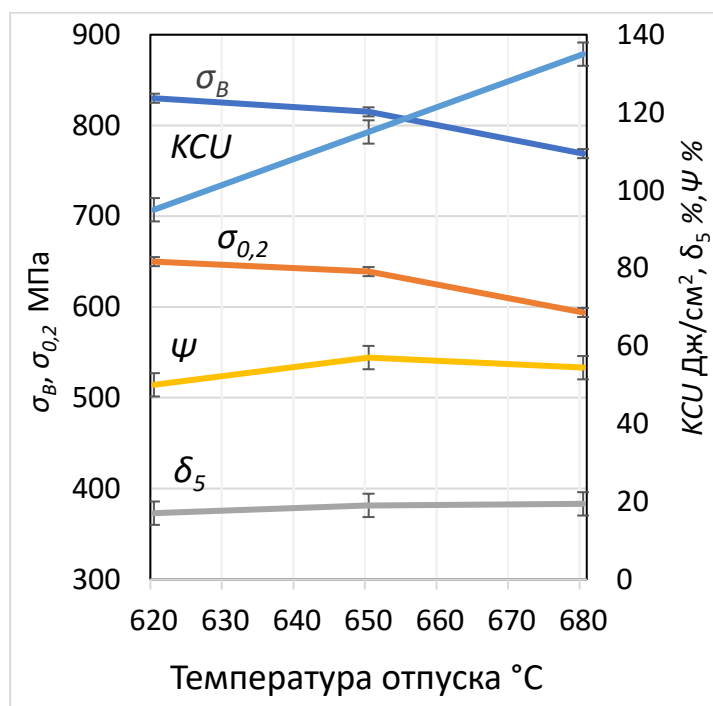
Рисунок 17 – Изменение свойств стали 20X13 после отпуска: а) – σ_B МПа, $\sigma_{0,2}$ МПа, δ_5 %, ψ %, KCU Дж/см²; б) – твёрдость HB

Исследования показали, что, свойства, полученные при температуре отпуска 660 °С не удовлетворяют требованиям установленным ГОСТ 18968 – 73. При температуре от 660 до 700 °С наблюдается резкое изменение механических свойств. Ударная вязкость возрастает с 74 до 146 Дж/см², предел прочности уменьшается с 836 до 759 МПа, предел текучести также уменьшается с 662 до 578 МПа. Из-за повышения температуры отпуска, также уменьшалась и твёрдость. Далее при достижении 700 °С изменение свойств происходит более медленно. Это свидетельствует о том, что структура стали полностью преобразовалась и приобрела структуру сорбита отпуска, показанного на рисунке 18 в. Всё это соответствует фундаментальным основам материаловедения. Исходя из этого следует, что отпуск при 700 °С обеспечил получение требуемых свойств, установленных соответствующим ГОСТ 18968 – 73, но значение твёрдости в 241 НВ находится на верхней границе требований, что делает данный режим неустойчивым, так как есть вероятность получения твёрдости выше установленной. Рекомендуемой температурой отпуска является 720 °С. Данная температура отпуска обеспечила получение требуемых свойств по всем характеристикам

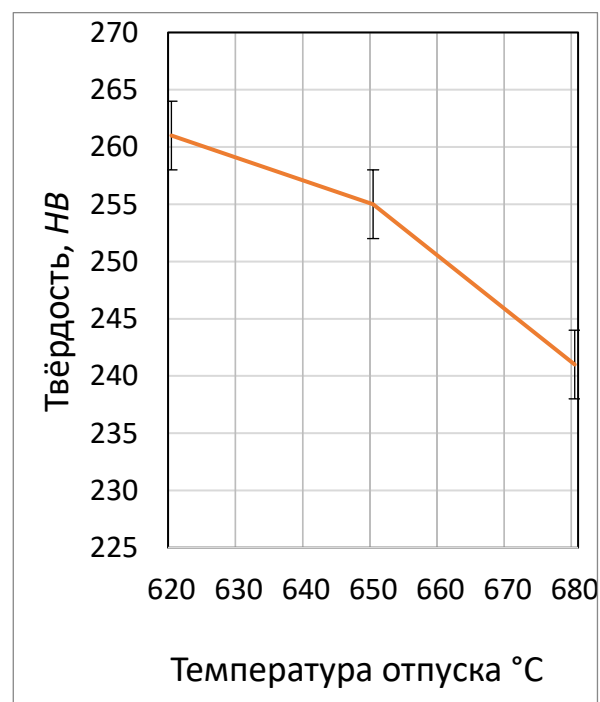
Проведено исследование влияния температуры отпуска на свойства стали 20X13. Результаты приведены в таблице 16 и на рисунке 19.

Таблица 16 – Свойства после отпуска, шпильки диаметр 22 миллиметров

Параметры	Температура отпуска °C	Предел прочности σ_B МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ МПа	Относительное удлинение δ_5 %	Относительное сужение ψ %	Ударная вязкость KCU Дж/см ²	Твёрдость НВ
Значение	620	830,0	650,0	17,2	50,3	95,0	261,0
	650	815,0	639,0	19,1	57,1	115,0	255,0
	680	769,0	594,0	19,4	54,4	135,0	241,0



а)



б)

Рисунок 19 – Изменение свойств стали 20X13 после отпуска: а) – σ_B МПа, $\sigma_{0,2}$ МПа, δ_5 %, ψ %, KCU Дж/см²; б) – твердость НВ

Исследования показали, что при температуре отпуска 680 °C, образец не обеспечил получение значений предела прочности установленных ГОСТ 20700 – 75 – 769 МПа при необходимых 784 МПа. Исходя из этого проводить отпуск выше 680 °C не целесообразно. При этом температура отпуска 620 и

650 °С обеспечила получение требуемых свойств. По графикам, представленных на рисунке 19, наблюдается, что свойства изменяются относительно равномерно. Микроструктурные исследования, представленные на рисунке 20, показали, что при увеличении температуры происходит увеличения зерна сорбита отпуска и коагуляция карбидов.

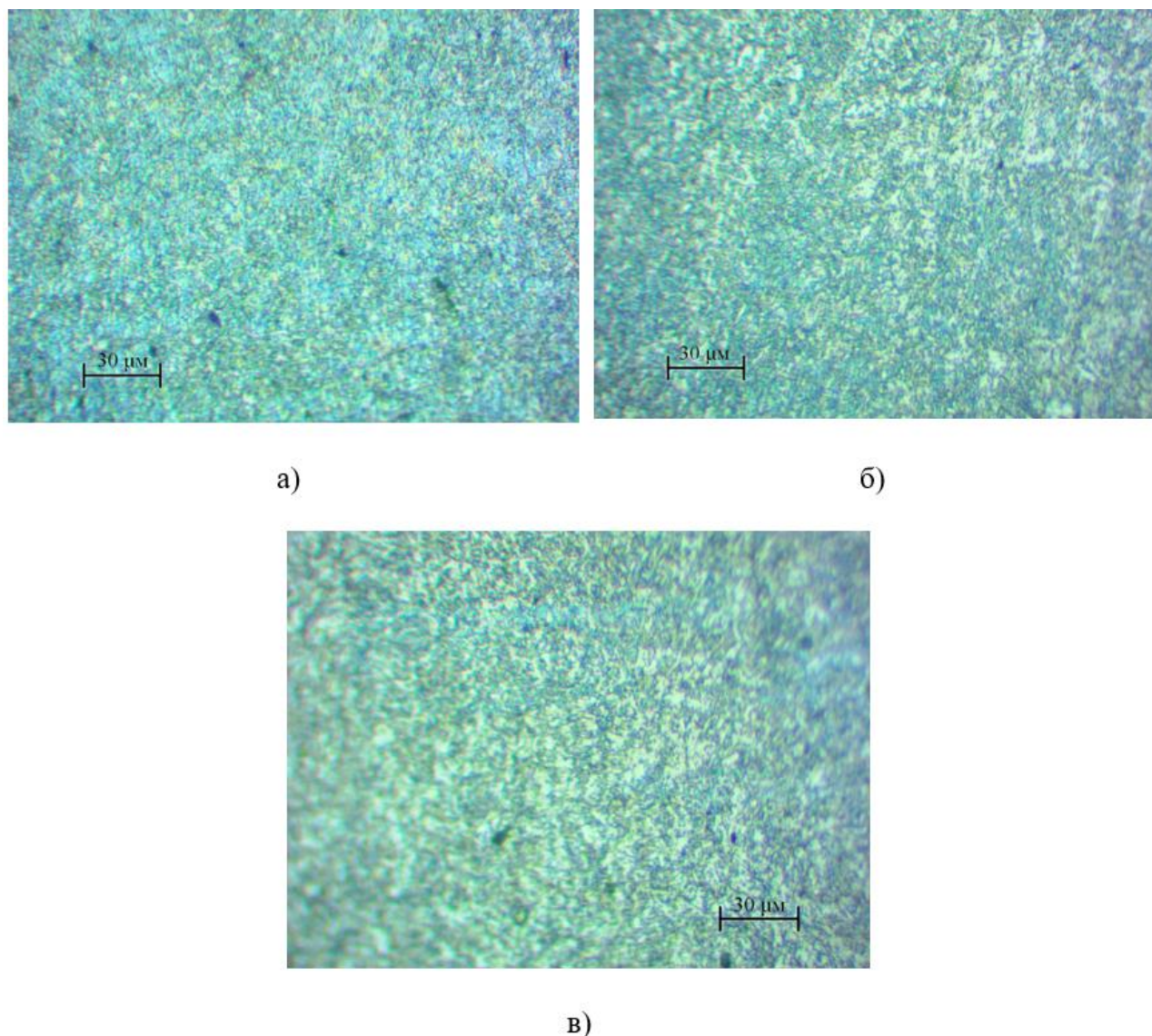


Рисунок 20 – Микроструктура стали 20X13 после отпуска при температуре:
а) – 620 °С; б) – 650 °С; в) – 680 °С

Исходя из проведённого исследования была выбрана рекомендуемая температура отпуска от 620 до 650 °С.

Исследовались также свойства заготовок для изготовления шпинделей диаметром 75 и 120 миллиметров по СТ ЦКБА 010 – 2004 [46], термическая обработ-

ка которой проводится по режимам СТ ЦКБА 016 – 2005. Требования СТ ЦКБА 010 – 2004 к механическим свойствам приведены в таблице 17.

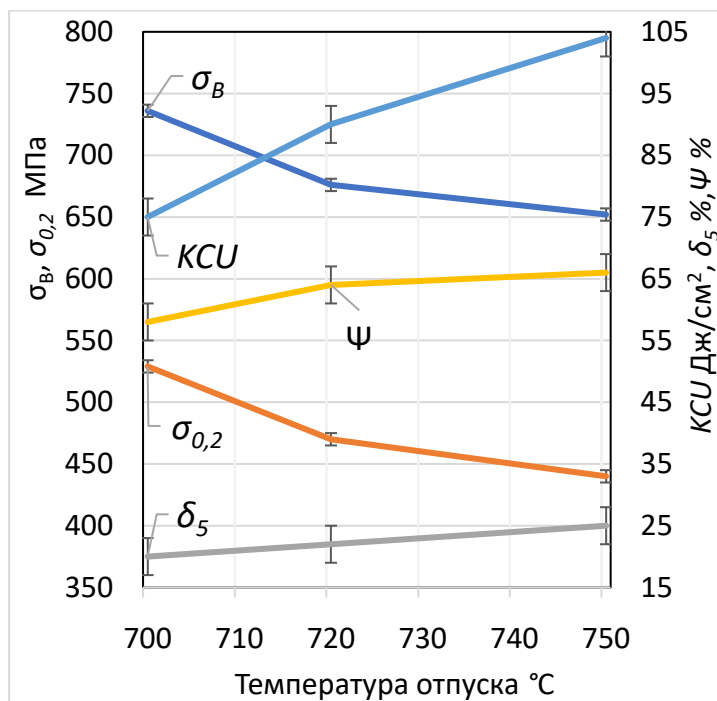
Таблица 17 – Требуемые свойства для шпинделей

Параметры	Температура отпуска °C	Предел прочности σ_B МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ МПа	Относительное удлинение δ_5 %	Относительное сужение ψ %	Ударная вязкость KCU Дж/см ²	Твёрдость HB
		Не менее					
Значения	700...750	647,0	441,0	15,0	50,0	75,0	197...248

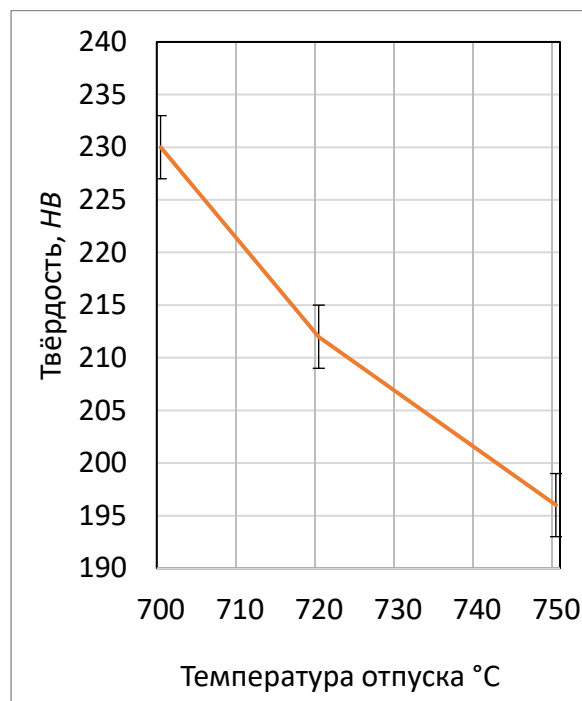
Было проведено исследование влияния температуры отпуска на свойства стали 20X13 для заготовок диаметром 75 и 120 миллиметров. Результаты исследований приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Свойства после отпуска, шпинделя диаметр 75 и 120 мм

Параметры	Диаметр мм	Температура отпуска °C	Предел прочности σ_B МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ МПа	Относительное удлинение δ_5 %	Относительное сужение ψ %	Ударная вязкость KCU Дж/см ²	Твёрдость HB
Значение	75	700	736,0	529,0	20,2	58,4	75,0	230,0
		720	676,0	470,0	22,0	64,1	90,0	212,0
		750	652,0	442,0	25,1	66,2	104,0	196,0
	120	700	783,0	619,0	21,3	58,0	39,0	235,0
		720	693,0	483,0	21,0	55,3	48,0	212,0
		735	675,0	483,0	25,2	60,0	88,0	207,0

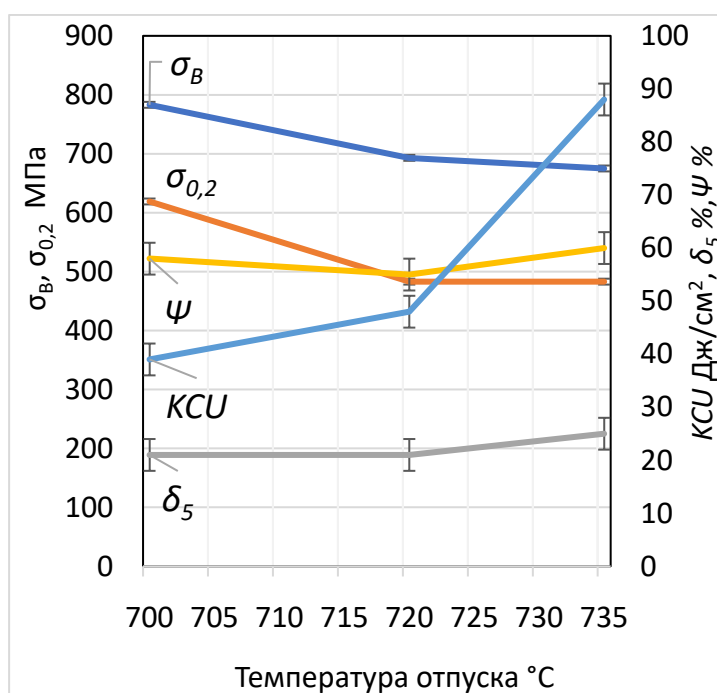


а)

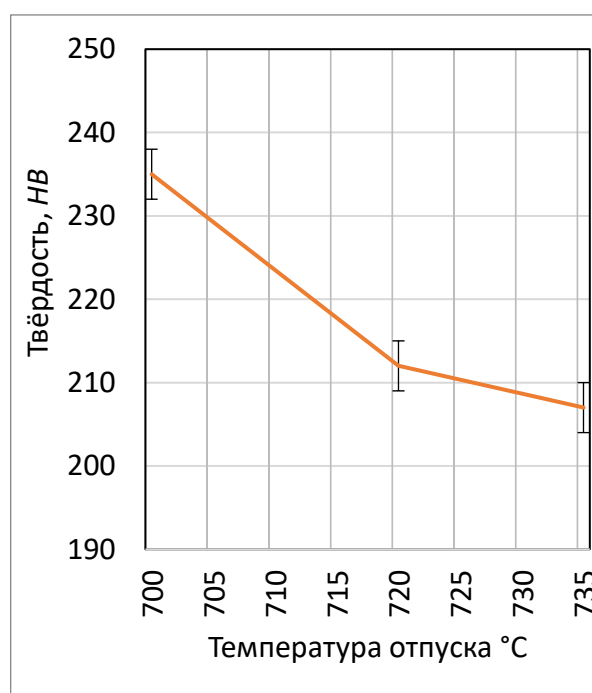


б)

Рисунок 21 – Изменение свойств стали 20X13 диаметром 75 миллиметров после отпуска: а) – σ_B МПа, $\sigma_{0,2}$ МПа, δ_5 %, Ψ %, KCU Дж/см²; б) – твёрдость HВ



а)



б)

Рисунок 22 – Изменение свойств стали 20X13 диаметром 120 миллиметров после отпуска: а) – σ_B МПа, $\sigma_{0,2}$ МПа, δ_5 %, Ψ %, KCU Дж/см²; б) – твёрдость HВ

Исследования показали, что отпуск при температуре 700 °С для диаметра 75 миллиметров, способствует получению требуемых свойств. Ударная вязкость 75 Дж/см² находится на нижней границе, требуемой стандартом, это значит, что существует вероятность получения свойств ниже указанных. Из этого следует, что проводить отпуска рекомендуется при температуре выше 700 °С. Отпуск при температуре 720 °С обеспечил получение требуемых свойств, при этом наблюдается уменьшение предела прочности σ_B с 736 до 676 МПа, предела текучести $\sigma_{0,2}$ с 529 до 470 МПа и повышение ударной вязкости с 75 до 90 Дж/см². Далее изменение предела прочности и предела текучести протекает замедленно, а ударная вязкость возрастает. Это свидетельствует о том, что структура стали приобретает структуру сорбита отпуска. Отпуск при температуре 750 °С не обеспечил получение свойств по твёрдости – 196 НВ при требуемых 197 НВ. Микроструктура стали представлена на рисунке 23.

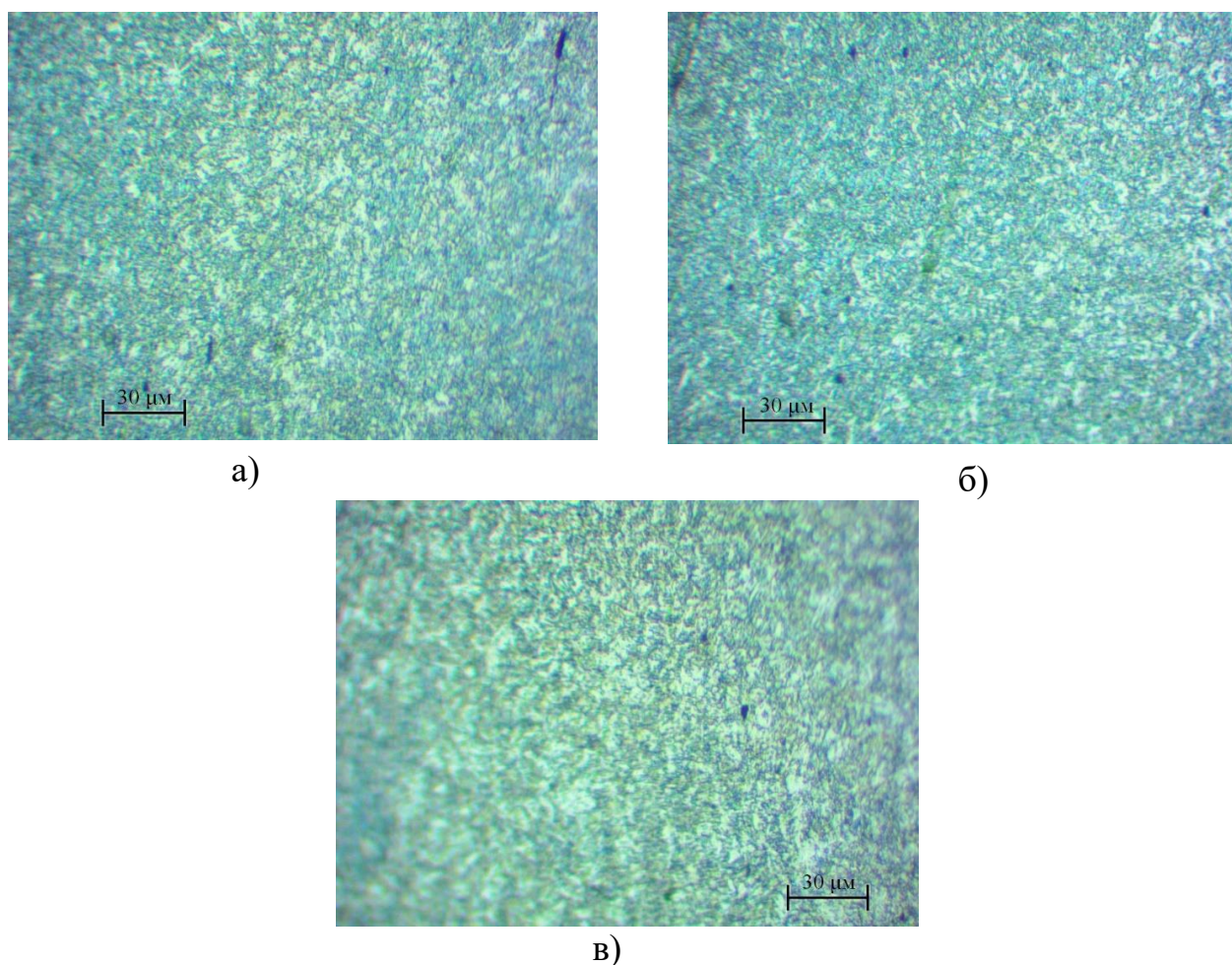


Рисунок 23 – Микроструктура стали 20X13 после отпуска при температуре:

а) – 700 °С; б) – 720 °С; в) – 750 °С

Также исследование показало, что для заготовок диаметром 120 миллиметров, по сравнению с исследованиями свойств заготовок 75 миллиметров, наблюдается резкое уменьшение ударной вязкости. Это свидетельствует о том, что в стали 20Х13 возникло явление отпускной хрупкости второго рода, возникшей с замедлением скорости охлаждения в объеме образца с большим сечением. Однако увеличение температуры нагрева способствует увеличению скорости охлаждения и позволяет добиться требуемых свойств.

На основании проведенных исследований влияния режимов термической обработки на механические свойства стали 20Х13 разработана технологическая карта термической обработки, приведённая в приложении Б.

Заключение

Был проведен обзор и анализ нормотехнической документации, регламентирующей применение крепёжных изделий в арматуростроении. Проведено патентное исследование, которое показало, что ведутся активные разработки способов повышения ресурса работы стальных крепёжных изделий, крепёжных изделий, используемых в атомной энергетической промышленности, крепёжных изделий из высокопрочных легированных сталей, изделий применяемых в арматуростроении, а также изделий, применяемых для изготовления высоконагруженного резьбового крепежа в области использования теплового и атомного оборудования и сосудов давления и другого оборудования. Большое внимание уделяется термической обработке, как способу повышения свойств материалов.

Были рассмотрены основные виды и способы термической обработки сталей и выявлены отличительные особенности термообработки, легированной и не легированной стали.

Обоснован выбор исследуемого материала стали 20Х13 и его структурные особенности при термической обработке. Были рассмотрены и проанализированы стандарты по термообработке исследуемой стали.

Проведены исследования зависимости свойств от режимов закалки и отпуска. Выявлены рекомендуемый режимы термической обработки стали 20Х13 для шайб, шпилек и шпинделей. Термическая обработка заготовок для шайб диаметром 22 миллиметра проводится по ГОСТ 18968-78, которая включает в себя закалку при 1050 °С, выдержку от 1 до 1,5 минуты на 1 миллиметр толщины, но не менее 20 минут, с охлаждением в масле, и отпуск при 720 °С, выдержку от 3 до 3,5 минуты на 1 миллиметр толщины, но не менее 2 часов, с охлаждением на воздухе. Термическая обработка заготовок для шпилек диаметром 22 миллиметра проводится по ГОСТ 20700 – 75, которая включает в себя закалку при 1050 °С, выдержку от 1 до 1,5 минуты на 1 миллиметр толщины, но не менее 20 минут, с охлаждением в масле, и отпуск от 620 до 650 °С, выдержку от 3 до 3,5 минуты на 1 миллиметр толщины, но не менее 2 часов с охлаждением на воздухе. Термическая обработка заготовок для шпинделей диаметром 75 миллиметра проводится

по СТ ЦКБА 016 – 2005, которая включает в себя закалку при 1050 °С, выдержку от 1 до 1,5 минуты на 1 миллиметр толщины, но не менее 20 минут, с охлаждением в масле, и отпуск при 720 °С, выдержку от 3 до 3,5 минуты на 1 миллиметр толщины, но не менее 2 часов, с охлаждением на воздухе. Исходя из исследований была разработана карта технологического процесса термической обработки, приведённая в приложении Б.

Список используемых источников

1 Лахтин, Ю.М. Материаловедение [Текст]: учеб. для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Высш. образование. – 2006. – 528 с.

2 Изделия крепёжные. Термины и определения [Электронный ресурс]: ГОСТ 27017 – 86. – Введ. 1988-01-01. – Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 49 с.: [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

3 Кушнер, В.С. Материаловедение [Текст]: учеб. для студентов вузов / под редакцией Кушнера В.С. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 232 с.

4 Гелин, Ф.Д. Металлические материалы [Текст]: справочник / Ф.Д. Гелин, А.С. Чаус. – Мн.: Высшая школа, 1987. – 368 с.

5 Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Электронный ресурс]: НП-089 – 15. – Введ. 2016-02-23. – 71 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

6 Болты, шпильки, гайки и шайбы для фланцевых и анкерных соединений, пробки и хомуты с температурой среды от 0 до 650 °С [Электронный ресурс]: ГОСТ 20700 – 75. – Введ. 1975-03-28. – Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1975. – 23 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

7 Болты, шпильки, гайки, и шайбы для фланцевых соединений атомных энергетических установок [Электронный ресурс]: ГОСТ 23304 – 78. – Введ. 1978-10-23. – Госстандарт СССР, 1978. – 31 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

8 Арматура трубопроводная [Электронный ресурс]: ГОСТ 33260 – 2015. – Введ. 2015-05-26. – Росстандарт, 2015. – 72 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

9 Крепежные изделия для разъемных соединений атомных энергетических установок. Технические условия [Электронный ресурс]: ГОСТ Р 54786 – 2011. – Введ. 2011-12-13. – Федеральное агентство по техниче-

скому регулированию и метрологии, 2011 – 35 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

10 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей [Электронный ресурс]: ГОСТ 1050 – 2013. – Введ. 2014–10–28. – Росстандарт, 2013. – 36 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

11 Арматура трубопроводная. Шпильки, болты, гайки и шайбы для трубопроводной арматуры. Технические требования [Электронный ресурс]: СТ ЦКБА 012 – 2005. – Введ. 2005–08–10. – АО НПФ ЦКБА, 2005. – 44 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

12 Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия [Электронный ресурс]: ГОСТ 4543 – 2016. – Введ. 2017–10–01. – Росстандарт, 2017. – 53 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

13 Металлопродукция из сталей нержавеющей и сплавов на железоникелевой основе коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных [Электронный ресурс]: ГОСТ 5949 – 2018. – Введ. 2018–09–20. – Росстандарт, 2018. – 35 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

14 Прутки и полосы из коррозионностойкой и жаропрочной стали для лопаток паровых турбин [Электронный ресурс]: ГОСТ 18968 – 73. – Введ. 1974–01–01. – Госстандарт, 1973 – 8 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

15 Поковки из коррозионностойких сталей и сплавов [Электронный ресурс]: ГОСТ 25054 – 81. – Введ. 1983–01–01. – Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 16 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

16 Термическая обработка деталей, заготовок и сварных сборок из высоколегированных сталей, коррозионностойких и жаропрочных сплавов [Электронный ресурс]: СТ ЦКБА 016 – 2005. – Введ. 2005–02–07. – Утверждён ЗАО НПФ ЦКБА, 2005. – 34 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

17 Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности» [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022)

18 Способ повышения технологического ресурса и стойкости стержневой и трубчатой арматуры [Электронный ресурс]: пат. 2573304 Рос. Федерация: МПК C21D 8/08/ Нежданов К.К., Расторгуев С.И., Нежданов А.К.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУАС. – № 2014109309/02; заявл. 2014.03.11; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2. – 11 с: ил. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022).

19 Способ получения упрочненных заготовок крепежных изделий из нержавеющей аустенитной стали [Электронный ресурс]: пат. 2749815 Рос. Федерация: МПК C21D 8/00, C21D 1/02, C21D 9/00/ Панов Д.О., Наумов С.В., Перцев А.С., Кудрявцев Е.А., Симонов Ю.Н., Салищев Г.А.; заявитель и патентообладатель НИУ «БелГУ». – № 2020136558; заявл. 06.11.2020; опубл. 17.06.2021, Бюл. № 17. – 12 с: ил. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022).

20 Способ термомеханической обработки жаропрочной стали мартенситного класса [Электронный ресурс]: пат. 2688017 Рос. Федерация: МПК C21D 6/00, C21D 8/00, C22C 38/54/ Кайбышев Р.О., Дудова Н.Р., Дудко В.А., Федосеева А.Э., Мишнев Р.В., Ткачев Е.С.; заявитель и патентообладатель НИУ «БелГУ». – № 2018126676 заявл. 19.07.2018; опубл. 17.05.2019 Бюл. № 14. – 8 с: ил. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022).

21 Способ термической обработки высокопрочной коррозионностойкой стали мартенситного класса [Электронный ресурс]: пат. 2388833 Рос. Федерация: МПК C21D 6/02/ Оленин М.И., Бережко Б.И., Горынин В.И., Павлов В.Н.; Заявитель и патентообладатель ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». – № 2009118984/02; заявл. 19.05.2009; опубл. 10.05.2010 Бюл. № 13. – 5 с: ил. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022).

22 Способ термической обработки заготовки из нержавеющей хромистой стали [Электронный ресурс]: пат. 2591901 Рос. Федерация: МПК C21D 6/00, C21D 1/78, C21D 1/25/ Лисицын А.В., Маранц Б.Д., Плесовских А.В.; заяви-

тель и патентообладатель Открытое акционерное общество «ТВЭЛ». – № 2014150597/02; заявл. 12.12.2014; опубл. 20.07.2016 Бюл. № 20. – 8 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022).

23 Способ термообработки изделий из стали типа 20Х13 [Электронный ресурс]: пат. 94026838 Рос. Федерация: МПК C21D 6/00/ Сандомирский М.М., Титова Т.И., Калашникова Т.С.; заявитель Акционерное общество открытого типа «Ижорские заводы». – № 94026838/02; заявл. 27.06.1996. – 3 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022).

24 Способ термической обработки для получения деталей с повышенной размерной точностью [Электронный ресурс]: пат. 2734208 Рос. Федерация: МПК C21D 1/78/ Оленин М.И., Горынин В.И., Бережко Б.И., Романов О.Н.; заявитель и патентообладатель ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». – № 2020105506; заявл. 05.02.2020; опубл. 13.10.2020 Бюл. № 29. – 4 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022).

25 Способ поверхностной термообработки изделий из нержавеющей хромистых сталей [Электронный ресурс]: пат. 2691022 Рос. Федерация: МПК C21D 6/00, C21D 1/42/ Дьячков В.Н., Зайнулин Д.Р.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью производственное коммерческое объединение «Термическая обработка металлов». – № 2018111157; заявл. 28.03.2018; опубл. 07.06.2019 Бюл. № 16. – 4 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения 17.03.2022).

26 Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов [Текст]: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – 1986. – 480 с.

27 Блантер, М.Е. Металловедение и термическая обработка [Текст]: учебника для вузов. – М.: Машгиз. – 1963. – 416 с.

28 Фиргер, И.В. Термическая обработка сплавов [Текст]: справочник. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 1982. – 304 с, ил.

29 Зуев, В.М. Термическая обработка металлов [Текст]: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа. – 1986. – 288 с.

30 Остапенко, Н.Н. Технология металлов [Текст]: 2-е издание, переработанное и дополненное / Н.Н. Остапенко, Н.Н. Кропивницкий. – М.: Высшая школа. – 1970. – 344 с.

31 Никифоров, В.М. Технология металлов и конструирование материалы [Текст]: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа. – 2015. – 382 с.: ил

32 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки [Электронный ресурс]: ГОСТ 5632 – 2014. – Введ. 2014–10–24. – Росстандарт, 2014. – 54 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

33 Теплухин, Г.Н. Металловедение и термическая обработка [Текст]: учеб. пособие / Г.Н. Теплухин, А.В Гропянов. – СПбГТУ РП. – 2011. – 169 с.

34 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского [Электронный ресурс]: ГОСТ 5640 – 2020. Введ. 2021–10–01. – Росстандарт, 2020. – 24 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

35 Беккерт, М. Металлографическое травление [Текст]: справочник / М. Беккерт, Х. Клемм, Лейпциг, 1976: пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.

36 Металлы. Методы испытаний на растяжение [Электронный ресурс]: ГОСТ 1497 – 84. – Введ. 1986–01–01. – Госстандарт СССР, 1984. – 24 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

37 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования [Электронный ресурс]: ГОСТ 28840 – 90. – Введ. 1993–01–01. – Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 8 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

38 Штангенциркули. Технические условия [Электронный ресурс]: ГОСТ 166 – 89. – Введ. 1991–01–01. – Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. – 11 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

39 Микрометры. Технические условия [Электронный ресурс]: ГОСТ 6507 – 90. – Введ. 1991–01–01. – Госстандарт СССР, 1990. – 12 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

40 Линейки измерительные металлические. Технические условия [Электронный ресурс]: ГОСТ 427 – 75. – Введ. 1977-01-01. – Госстандарт СССР, 1975. – 7 с. (дата обращения 14.03.2022)

41 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу [Электронный ресурс]: ГОСТ 2999 – 75. – Введ. 1976–07–01. – Госстандарт СССР, 1975. – 31 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

42 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. [Электронный ресурс]: ГОСТ 9012 – 59. – Введ. 1960–01–01. – Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1959. – 40 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

43 Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. [Электронный ресурс]: ГОСТ 9013 – 59. – Введ. 1969–01–01. – Госстандарт СССР, 1959. – 8 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

44 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Электронный ресурс]: ГОСТ 9454 – 78. – Введ. 1979–01–01. – Госстандарт СССР, 1978. – 11 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

45 Копры маятниковые. Технические условия [Электронный ресурс]: ГОСТ 10708 – 82. – Введ. 1983–07–01. – Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 8 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

46 Арматура трубопроводная. Поковки, штамповки и заготовки из проката. Технические требования [Электронный ресурс]: СТ ЦКБА 010 – 2004. – Введ. 28.12.2004. – АО НПФ ЦКБА, 2004. – 55 с. [сайт]. URL: <https://normacs.net/> (дата обращения 14.03.2022).

Приложение А

Таблица А 1 – Основные режимы термической обработки и свойства стали 20Х13

Нормативные доку- менты	Изделеие	Термическая обработка				Диаметр заготов- ки; мм	КП	$\sigma_{0,2}$ Н/мм ²	σ_B ; Н/мм ²	НВ	$\delta 5$, %,	ψ , %	KCU , Дж/см ²
		Закалка °С	Среда охла- ждения	Отпуск °С	Среда охла- ждения								
ГОСТ 5949 – 2018	горячекатаные и кованные заго- товки	1000...1050	Воздух или масло	660...770	Вода, масло или воздух	до 60	—	—	650	126...150	16	55	78
		1000...1050	Воздух или масло	600...700	Воздух или масло		—	—	830	155...197	10	50	59
ГОСТ 23304 – 78 (горячекатаные и кованные заготов- ки)	Болты, шпильки	1000...1050	Воздух или масло	650...720	Воздух или масло	до 200	90	882...1078	980	277...352	11	35	59
							55	539...686	686	187...269	15	50	59
							60	588...735	784	229...285	15	45	59
							55	539...686	686	187...269	15	50	59
	Гайки, шайбы						60	588...735	784	217...269	15	45	59
		ГОСТ 25054 – 81	поковки	1000...1050	Воздух или масло	660...770	Воздух	—	—	411	647	197...248	16
СТ ЦКБА 016 – 2005	кованные и ка- танные заготов- ки	1000...1050	Масло	600...670	Воздух	до 60	—	686	882	269...310	10	40	40
				—			539	784	235...269	12	45	60	
				650...700		до 300	—	441	647	197...248	15	50	75
											13	45	50
						700...770							
ГОСТ 20700 – 75	Болты, шпильки	1000...1050	Воздух или масло	650...720	Воздух или масло	—	60	588...735	784	229...285	15	45	59
							55	539...686	686	217...269		50	
	Гайки					—	60	—	—	187...217	—	—	—
ГОСТ 18968 – 73	горячекатаные и кованные заго- товки	1000...1050	Воздух или масло	660...770	Воздух	до 60	—	490...655	670	207...241	18	50	69

Приложение Б

Приложение В