

На правах рукописи

Каренина Радмила Алексеевна



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
КАЧЕСТВА РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ
ФИНИШНОЙ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКОЙ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Максаров Вячеслав Викторович

Официальные оппоненты:

Мнацаканян Виктория Умедовна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения, профессор;

Хрусталева Ирина Николаевна

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа машиностроения, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **19 июня 2025 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Добыча нефти и газа, особенно процесс бурения скважин, играет важную роль в развитии различных отраслей промышленности. Они имеют стратегическое значение для экономической стабильности и роста. Бурение необходимо не только для разведки и извлечения углеводородов, но и для добычи геотермальных и минеральных ресурсов, проведения экологического мониторинга и научных исследований недр.

Замковые соединения буровых труб считаются важнейшими элементами бурильной колонны, так как обеспечивают достижение необходимой глубины бурения. Универсальность, простота эксплуатации, надежность и высокая скорость монтажа делают их незаменимыми в процессе работы. Для изготовления соединительных резьбовых изделий между трубами применяют конструкционные легированные стали марок 40Х и 40ХН, отличающиеся высокой прочностью и устойчивостью.

Однако анализ результатов исследования характера разрушения бурильных труб в ходе их работы показывает, что недостаточные циклическая долговечность и прочность замковых резьбовых соединений (ЗРС) являются причиной более 55% отказов от общего количества отказов.

Поэтому одной из важнейших научно-технических проблем является необходимость совершенствования технологии финишной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, работающих в условиях высоких знакопеременных нагрузок от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического, агрессивного и абразивного воздействий.

Существует прямая зависимость между точностью обработки, шероховатостью поверхности и долговечностью изготовленных деталей. Увеличение количества станков с числовым программным управлением (ЧПУ), использование роботизированных систем и рост автоматизации способствуют получению высокоточных поверхностей. Однако финишная обработка резьбовых элементов сопровождается рядом значительных недостатков.

На сегодняшний день для завершающей обработки деталей применяются различные традиционные методы, включая шлифование, притирание и хонингование. Несмотря на широкое использование, такие технологии имеют определенные ограничения. Среди них можно выделить сложности в проектировании приспособлений с учетом разнообразия форм и размеров заготовок, ограниченные возможности современных инженерных материалов, а также недостаточную эффективность и точность.

В связи с вышесказанным, задача повышения показателей качества резьбовых поверхностей, несущей способности, снижения аварийности и увеличения срока службы резьбовых замковых соединений при высоких циклических нагрузках является актуальной, а внедрение метода финишной магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг имеет важную практическую значимость.

Степень разработанности темы исследования

Изучению условий эксплуатации резьбовых соединений при бурении скважин посвящены труды таких ученых, как Н.В. Якубовского, Н.Д. Щербюка, И.Я. Якушева и многих других. Ими отмечено влияние изнашивания на эксплуатационный ресурс замковых соединений, которое приводит к их разрушению. Изучению и решению актуальной задачи – повышения работоспособности резьбовых соединений труб, посвящены труды таких ученых как Г.М. Саркисова, А.Е. Сарояна, Д.Ю. Мочернюка. Проблемами изнашивания подвижных сопряжений и разработкой методов повышения срока службы оборудования занимались многие ученые. Среди отечественных ученых, следует выделить А.И. Барышникова, Л.А. Лачиняна.

Значительный вклад в развитие метода магнитно-абразивной обработки внесли ученые Ю.М. Барон, В.И. Жданович, Е.Г. Коновалов, В.С. Майборода, Л.К. Минин, С.П. Приходько, Ф.Ю. Сакулевич, Н.Я. Скворчевский, Н.С. Хомич, В.Н. Чачин, П.И. Ящерицын, Т. Shinmura.

Научные труды отечественных и зарубежных исследователей во многом способствовали развитию рассматриваемого направления в нефтегазовом машиностроении. Однако повышение качества

наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений в комплексе методом магнитно-абразивной обработки вышеупомянутыми исследователями не рассматривалось.

Распределение магнитного поля между полюсными наконечниками и резьбовой поверхностью замкового соединения остается недостаточно изученным. Взаимосвязь качества обработанной замковой резьбы с режимными факторами обработки ранее не была выявлена, а также ранее не публиковалась методика расчета и назначения параметров обработки.

Для решения данной технологической задачи необходимо проведение теоретических, экспериментальных исследований, основанных на комплексном подходе к обеспечению качественных характеристик резьбовых поверхностей, а также применение метода магнитно-абразивного полирования.

Объект исследования. Процесс магнитно-абразивной обработки наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, работающих в условиях высоких знакопеременных нагрузок от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействий.

Предмет исследования. Качественные параметры (шероховатость, твердость), контролируемые по среднему диаметру пятна контакта наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

Цель работы – технологическое обеспечение равномерного упрочнения поверхностного слоя и качества резьбовых поверхностей по среднему диаметру пятна контакта замковых резьбовых поверхностей буровых штанг.

Идея исследования заключается в технологическом обеспечении качества резьбовых поверхностей замкового соединения буровой штанги и осуществляется посредством технологии получения равнозначных параметров шероховатости и твердости по среднему диаметру пятна контакта замковых резьбовых поверхностей на основе финишной магнитно-абразивной обработки.

Задачи исследования.

Для достижения цели исследования необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести анализ и систематизацию теоретических и экспериментальных данных, представленных в научных источниках, с целью установления закономерностей влияния состояния поверхностного слоя замковой резьбы на эксплуатационные характеристики бурильной трубы.

2. Разработать способ магнитно-абразивной обработки замковых соединений буровых штанг, предусматривающий научное обоснование выбора рациональных схем обработки, траекторий рабочих движений и режимных факторов, обеспечивающих повышение качества обработанных резьбовых поверхностей.

3. Провести экспериментальные исследования с целью определения закономерности влияния режимных факторов магнитно-абразивной обработки на показатели шероховатости и твердости наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

4. Установить математические зависимости, описывающие взаимосвязь между режимными факторами магнитно-абразивной обработки и характеристиками шероховатости и твердости наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

5. Провести экспериментальные исследования для установления закономерностей влияния режимных факторов магнитно-абразивной обработки на коррозионную стойкость резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

6. Разработать практические рекомендации по выбору способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, а также по подбору значений режимных факторов обработки, обеспечивающих прогнозируемую шероховатость и твердость наружных и внутренних резьбовых поверхностей.

Научная новизна работы:

1. Установлены математические зависимости и закономерности влияния режимных факторов (значение магнитной индукции, частота вращения обрабатываемого образца и время обработки) предложенного способа обработки на шероховатость и твердость резьбовых поверхностей при обработке резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

2. Выявлены зависимости влияния режимных факторов магнитно-абразивной обработки (величина магнитной индукции) на коррозионную стойкость резьбовых поверхностей.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по пунктам 4 «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска» и 7 «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлены математические зависимости, описывающие влияние значения магнитной индукции, частоты вращения обрабатываемого образца и времени обработки при проведении магнитно-абразивной обработки наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, оценивающие степень воздействия режимных факторов обработки на показатели шероховатости и твердости поверхности.

2. Разработан способ магнитно-абразивной обработки замковых соединений буровых штанг (Патент на изобретение RU2797796C1), включающий обработку внутренних и наружных резьбовых поверхностей обрабатываемых деталей, совершающих в магнитно-абразивной массе одновременное вращательное, возвратно-поступательное и осцилляционное движения, при котором в результате обработки происходит получение равнозначного состояния наружного и внутреннего поверхностного слоя резьбы.

3. Определены рациональные режимные параметры магнитно-абразивной обработки наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, позволяющие обеспечить шероховатость по среднему диаметру пятна контакта резьбовых поверхностей до $R_a = 0,4...0,5$ мкм и сформировать твердость до 982...985 HV.

4. Установлено, что применение способа магнитно-абразивной обработки в качестве финишной операции по изготовлению резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг позволяет увеличить коррозионную стойкость резьбовых поверхностей зам-

ковых соединений в условиях, имитирующих агрессивную среду, в 5 раз.

5. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на промышленных предприятиях АО НПП «Пирамида» от 25.04.2024 г. и ООО «ИЗ-КАРТЭКС Имени П.Г. Коробкова» от 17.03.2025 г.

Методология и методы исследования. Проведение исследований базировалось на известных данных в области магнитно-абразивной обработки, научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований и методиках математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены на фрезерном станке с ЧПУ *Emco Concept Mill 250*, в камере соляного тумана *TDC 1200 PN*. При анализе результатов экспериментов применены статистические методы обработки данных, лабораторное оборудование: прибор для измерений параметров контура и шероховатости поверхности *Waveline W920RC*, микроскоп инвертированный лабораторный *Leica DM ILM HC*, твердомер *Константа TV*.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Применение способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, включающего в себя схемы обработки наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений, комбинацию рабочих движений, диапазоны режимных факторов и технологический инструмент, позволяет получить равномерное упрочнение поверхностного слоя и качество по среднему диаметру пятна контакта замковых резьбовых поверхностей до $R_a = 0,4...0,5$ мкм и твердость до 982...985 HV.

2. Использование полученных математических зависимостей, учитывающих влияние режимных факторов магнитно-абразивной обработки, позволяет прогнозировать параметры шероховатости и твердости по среднему диаметру пятна контакта резьбовых поверхностей при обработке наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

3. Разработанный способ технологической обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг методом магнитно-абразивной обработки, позволяет увеличить коррозионную

стойкость резьбовых поверхностей замковых соединений в условиях, имитирующих агрессивную среду, в 5 раз.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена необходимым объемом использованных методов математического планирования эксперимента; проведением лабораторных экспериментов на установке для магнитно-абразивной обработки, базируемой на фрезерном станке с ЧПУ *Emco Concept Mill 250*, в камере соляного тумана *TDC 1200 PN*, результатами промышленного опробования на производственных предприятиях АО НПП «Пирамида» и ООО «ИЗ-КАРТЭКС Имени П.Г. Коробкова», а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Всероссийская научная конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (г. Тула, 2022 г.); Международный симпозиум «Нанофизика и наноматериалы 2022» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (г. Кемерово, 2022 г.), XIV Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая» (г. Кемерово, 2023 г.), IV Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (г. Тула, 2023 г.), XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» г. Санкт-Петербург, 2023 г.), XVII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2024 г.).

В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на Междисциплинарном экспертном совете ученых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II в 2025 г. Способ финишной магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг опробован в производственном процессе промышленных предприятий.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; разработке способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, установлении математических зависимостей влияния режимных факторов магнитно-абразивной обработки на шероховатость и твердость резьбовых поверхностей, проведении экспериментальных исследований по обработке резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг способом магнитно-абразивной обработки, подготовке рекомендаций по назначению режимных факторов магнитно-абразивной обработки с целью технологического обеспечения качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 121 страницу машинописного текста, 31 рисунок, 17 таблиц, список литературы из 108 наименований и 5 приложений на 13 страницах.

Благодарности. Автор выражает благодарность декану механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, доктору технических наук, профессору Максарову Вячеславу Викторовичу за наставничество и помощь, оказанную при работе над диссертацией, а также коллективу кафедры машиностроения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, идея работы, научная ценность и задачи исследования.

В первой главе представлен аналитический обзор по вопросу эксплуатации резьбовых соединений буровых штанг, выявлены основные дефекты и причины их преждевременного выхода из строя, а также рассмотрены современные методы технологического повышения качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

На основе проведенного анализа обоснован выбор объекта и предмета исследования, сформирована цель и поставлены задачи.

Во второй главе представлены теоретические и экспериментальные исследования по разработке способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, обеспечивающего формирование твердости поверхностей в заданном диапазоне значений и способствующего снижению шероховатости по среднему диаметру пятна контакта резьбовых поверхностей.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе на основании разработанного технологического способа финишной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг способом магнитно-абразивного воздействия проведены экспериментальные исследования по влиянию режимных факторов процесса на формирование качественных характеристик резьбы (шероховатость и твердость). Проведен анализ эффективности магнитно-абразивной обработки.

В четвертой главе проведен теоретический анализ влияния условий бурения на коррозионную стойкость поверхностей, описаны экспериментальные исследования влияния применяемого способа финишной магнитно-абразивной обработки на коррозионную стойкость резьбовых поверхностей замковых соединений.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, включающего в себя схемы обработки наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений, комбинацию рабочих движений, диапазоны режимных факторов и технологический инструмент, позволяет получить равномерное упрочнение поверхностного слоя и качество по среднему диаметру пятна контакта замковых резьбовых поверхностей до $R_a = 0,4 \dots 0,5$ мкм и твердость до 982...985 HV.

В результате теоретических и экспериментальных исследований по технологическому обеспечению качества резьбы, разработан способ магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, который заключался в обработке внутренних и наружных резьбовых поверхностей изделия, при совершении изделиями одновременного вращательного, возвратно-поступательного и осцилляционного движений в магнитно-абразивной массе, сформированной двумя полюсными наконечниками (рисунок 1).

На основании исследований выявлено, что установка полюсных наконечников параллельно углу наклона резьбы и задание возвратно-поступательного, осцилляционного и вращательного движений заготовке позволяет производить равномерную магнитно-абразивную обработку резьбовому профилю. Установка полюсных наконечников параллельно оси заготовки, и размещение во внутреннюю область обработки конусного наконечника, со смещением относительно собственной оси и оси заготовки, задание возвратно-поступательного и вращательного движений заготовке позволяет производить бездефектную магнитно-абразивную обработку по резьбовому профилю.

Разработанный способ реализован на установке для магнитно-абразивной обработки на базе фрезерного станка с ЧПУ *Emco Concept Mill 250* (рисунок 2).

Рассматривая предлагаемый способ, стоит отметить, что эффект скольжения абразивных частиц о поверхность обрабатываемого материала гарантирует бездефектность обработки. Скольжение частиц обеспечивает микрорезание и формирует качество обработан-

ной поверхности, сглаживая микронеровности и исключая микроудар абразивных частиц о поверхность.

Предложенный способ позволяет увеличить твердость поверхностей до 982...985 HV за счет обеспечения равномерного упрочнения поверхностного слоя (рисунок 3) и качество резьбовых поверхностей по среднему диаметру пятна контакта замковых резьбовых поверхностей до $R_a = 0,4 \dots 0,5$ мкм (при этом шероховатость до обработки составляла $R_a = 2,5$ мкм, твердость до обработки варьировалась в диапазоне 320 ... 350 HV).

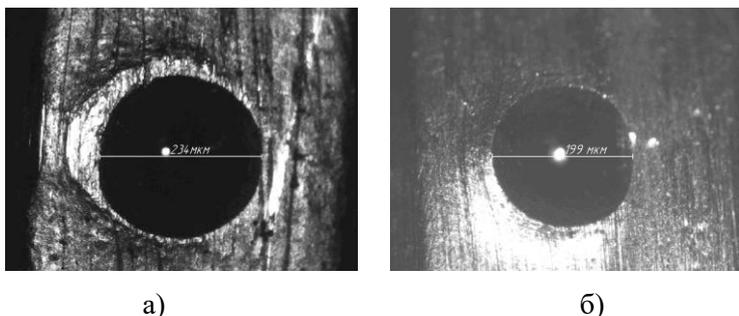


Рисунок 3 – Снимок наружной резьбовой поверхности с отпечатком твердомера *Константа ТУ* (увеличение $\times 5$), где а) до магнитно-абразивной обработки; б) после магнитно-абразивной обработки

2. Использование полученных математических зависимостей, учитывающих влияние режимных факторов магнитно-абразивной обработки, позволяет прогнозировать параметры шероховатости и твердости по среднему диаметру пятна контакта резьбовых поверхностей при обработке наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг.

На основании разработанного способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг проведены экспериментальные исследования по влиянию режимных факторов на формирование качественных характеристик поверхностей: твердости и шероховатости резьбовых поверхностей.

В ходе исследования установлено, что применение разработанной схемы магнитно-абразивной обработки позволяет обеспечить

шероховатость по среднему диаметру пятна контакта резьбовых поверхностей $R_a = 0,4 \dots 0,5$ мкм, твердость до 982...985 HV.

На основании полученных данных (рисунок 4), а также статистического анализа результатов экспериментов установлено, что на шероховатость резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг наибольшее влияние оказывает время обработки t , второстепенную позицию занимают частота вращения образца n и величина магнитной индукции B ; на твердость наибольшее влияние оказывает магнитная индукция B , второстепенную позицию занимают частота вращения образца n и время обработки t .

По результатам проведения экспериментальных исследований выполнена статистическая обработка полученных данных, которая позволила получить математические зависимости, учитывающие варьируемые режимные факторы магнитно-абразивной обработки и позволяющие прогнозировать значения шероховатости и твердости при обработке резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг:

1. Шероховатость R_a , мкм наружных резьбовых поверхностей (1), внутренних резьбовых поверхностей (2):

$$R_a = 1,47 \cdot B^{0,58} \cdot t^{-0,63} \cdot n^{0,59}; \quad (1)$$

$$R_a = 107 \cdot B^{0,62} \cdot t^{-1,11} \cdot n^{0,44}. \quad (2)$$

2. Твердость, HV наружных резьбовых поверхностей (3), внутренних резьбовых поверхностей (4):

$$HV = 110 \cdot B^{0,68} \cdot t^{0,11} \cdot n^{0,25}; \quad (3)$$

$$HV = 81 \cdot B^{0,68} \cdot t^{0,21} \cdot n^{0,19}. \quad (4)$$

Таким образом, полученные результаты являются основой для подготовки финишной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг предложенным способом магнитно-абразивной обработки.

3. Разработанный способ технологической обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг методом магнитно-абразивной обработки, позволяет увеличить коррозионную стойкость резьбовых поверхностей замковых соединений в условиях, имитирующих агрессивную среду, в 5 раз.

На основании разработанного технологического способа обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг методом финишной магнитно-абразивной проведены исследования по выявлению следов коррозии после испытаний образцов в камере соляного тумана *TDC 1200 PN*.

В ходе испытаний, в соответствии с ГОСТ Р 9.905-2007, 5% раствор *NaCl* распыляли в течение суток на образцы с наружной резьбой из стали 40X со средней скоростью от 1,0 - 2,0 мл/ч при температуре (35 ± 2) °C и влажности 95%. Оценивалась степень коррозионного поражения резьбовой поверхности образцов.

Обнаружено, что результатом МАО явилось уменьшение степени коррозионного поражения образцов с 99 % (рисунок 5, г) до 18 % (рисунок 5, б), что объясняется снижением шероховатости поверхности (рисунок 6) и, как следствие, площади поверхности, контактирующей с агрессивной средой.

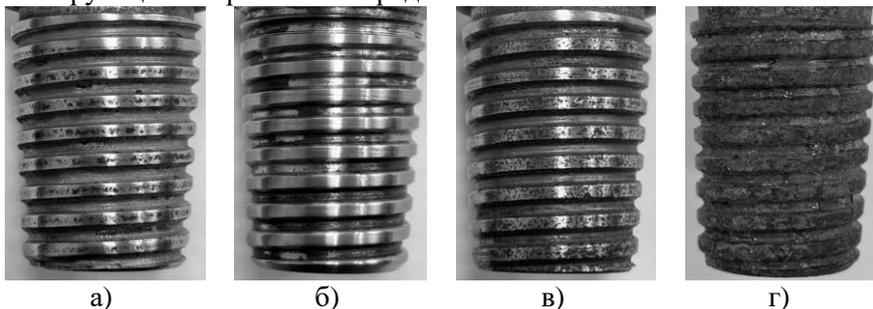


Рисунок 5 – Результаты коррозионных испытаний в камере соляного тумана образцов с наружной резьбой из стали 40X, обработанных магнитно-абразивной обработкой при различном значении магнитной индукции, где а) 0,6 Тл, б) 0,8 Тл, в) 1,0 Тл, г) без МАО

Таким образом, анализ результатов эксперимента и графической зависимости свидетельствует о том, что МАО повышает коррозионную стойкость резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг в условиях, имитирующих агрессивную среду, в 5 раз.

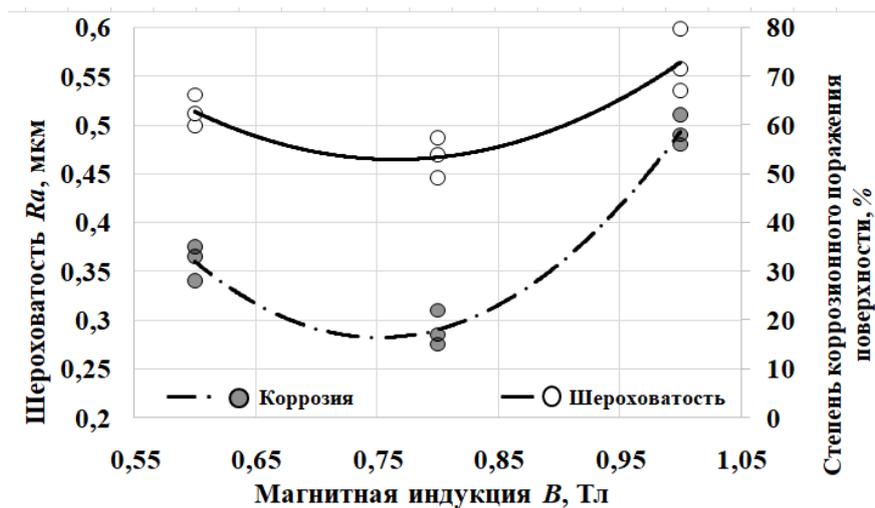


Рисунок 6 – Графическое представление зависимости степени коррозионного поражения и шероховатости резьбовой поверхности от величины магнитной индукции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. В ходе проведенного анализа особенностей финишной обработки резьбовых поверхностей, а также оценки текущего состояния и перспективных направлений улучшения технологического процесса обеспечения качества резьбовых поверхностей буровых штанг с применением способа магнитно-абразивной обработки, выявлены основные закономерности магнитно-абразивной обработки, определены основные режимные факторы процесса, включая магнитную индукцию B , время обработки t , частоту вращения заготовки n . Экспериментально установлено, что на эксплуатационную долговечность замкового резьбового соединения значительное влияние оказывает качество обработки резьбовых поверхностей ниппеля и муфты, так как в условиях воздействия высоких циклических нагрузок и агрессивных сред происходит их ускоренное разрушение.

2. Разработан способ магнитно-абразивной обработки замковых соединений буровых штанг (Патент на изобретение RU2797796C1), включающий обработку внутренних и наружных резьбовых поверхностей обрабатываемых деталей, совершающих в магнитно-абразивной массе одновременное вращательное, возвратно-поступательное и осцилляционное движения, при котором в результате обработки происходит получение равнозначного состояния наружного и внутреннего поверхностного слоя резьбы.

3. В ходе экспериментов выявлены диапазоны варьируемых режимных факторов обработки, а также установлены значения статических параметров. Порошок на основе сплава карбида титана и железа ($TiC+Fe$) с фракцией $\Delta = 160 - 400$ мкм выбран в качестве магнитно-абразивного инструмента. Для экспериментальных исследований выбран диапазон магнитной индукции $B = 0,8 - 1,0$ Тл, частоты вращения заготовки $n = 100 - 450$ мин⁻¹, времени обработки $t = 360 - 600$ с. В результате проведенных экспериментов выявлены закономерности влияния режимных факторов МАО на значения шероховатости и твердости обработанных резьбовых поверхностей. Установлено, что предлагаемый способ позволяет уменьшить шероховатость резьбовых поверхностей до $R_a = 0,4 \dots 0,5$ мкм, увеличить твердость до $982 \dots 985$ HV.

4. Получены математические зависимости, описывающие зависимости шероховатости и твердости обработанных резьбовых поверхностей от режимных факторов магнитно-абразивной обработки. Установлено, что сочетание режимных факторов магнитно-абразивной обработки влияет на качество обработанных резьбовых поверхностей. При различных комбинациях параметров обработки наблюдается положительная тенденция изменения шероховатости поверхности по параметру R_a и твердости HV, что подтверждает эффективность выбранного метода обработки для улучшения эксплуатационных характеристик резьбовых поверхностей.

5. Экспериментально установлено, что магнитно-абразивная обработка позволяет повысить коррозионную стойкость резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг в условиях, имитирующих агрессивную среду, в 5 раз.

6. Сформулированы практические рекомендации по применению способа МАО резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг с диапазонами режимных факторов $B = 0,8 - 1,0$ Тл; время обработки $t = 360 - 600$ с; частота вращения заготовки $n = 100 - 450$ мин⁻¹.

7. Результаты проведенных исследований прошли промышленную апробацию на производственных предприятиях АО НПП «Пирамида» и ООО «ИЗ-КАРТЭКС Имени П.Г. Коробкова».

8. Перспективное развитие технологии финишной магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг связано с совершенствованием методов моделирования обработки. Одним из приоритетных направлений дальнейших исследований является создание методов предварительного моделирования, направленных на подбор режимных факторов, анализ физических характеристик частиц порошкового материала (состава, формы и размера частиц) и их влияния на качество поверхности, а также изучение конструктивных особенностей оборудования для обработки (геометрия полюсных наконечников и их влияние на распределение магнитной индукции в рабочем пространстве устройства. Кроме того, перспективным направлением является разработка универсальных технологий и оборудования, позволяющих обрабатывать поверхности различной конфигурации с высокой точностью.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Максаров, В. В. Технологическое обеспечение качества кромок плоских изделий посредством магнитно-абразивной обработки / В.В. Максаров, И.А. Филипенко, **Р.А. Щеглова**, И.А. Бригаднов // Металлообработка. – 2021. – № 3 (117). – С. 47-55.

2. Максаров, В. В. Влияние угла наклона полюсных наконечников при магнитно-абразивном полировании на качество резьбовой поверхности замкового соединения буровой штанги / В.В. Максаров, А.И. Кексин, **Р.А. Щеглова**, И.А. Бригаднов, И.П. Никифоров // Металлообработка. – 2022. – № 5- 6. – С. 41–47.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Максаров, В. В. Применение композиционных порошков в процессе магнитно-абразивной обработки метчиков для повышения качества резьбы в изделиях из коррозионно-стойких сталей / В.В. Максаров, Ю. Ольгт, А.И. Кексин, **Р.А. Щеглова** // *Черные металлы*. – 2022 (2). – С. 49 – 55.

4. Максаров, В.В. Совершенствование технологии финишной абразивной обработки в магнитном поле резьбовой поверхности замкового соединения из конструкционной легированной стали для бурильных труб / В.В. Максаров, **Р.А. Каренина**, М.С. Синюков // *Черные металлы*. – 2024 (9). – С. 65–70.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Щеглова, Р.А.** Метод повышения долговечности высоконагруженного замкового соединения буровой штанги / Р. А. Щеглова, М.А. Дли // III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении», Тула, 6-8 апреля 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С.163-166.

6. **Щеглова, Р.А.** Формирование микрогеометрии наружной резьбовой поверхности буровой штанги при магнитно-абразивной обработке /Р.А. Щеглова, В.П. Захарова, М.А. Дли//, Сборник научных трудов «Нанозифика и наноматериалы» Санкт-Петербург, 23-24 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С.354-360.

7. **Щеглова, Р.А.** Повышение надежности замкового соединения буровой штанги путем магнитно-абразивной обработки наружной резьбовой поверхности / В.П. Захарова, Р.А. Щеглова//, Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» Кемерово, 30 ноября-1 декабря 2022 года. – С.742-745.

8. **Щеглова, Р.А.** Повышение надежности замкового соединения буровой штанги путем магнитно-абразивной обработки наружной резьбовой поверхности /Р.А. Щеглова//, Сборник матери-

алов XIV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «РОССИЯ МОЛОДАЯ» Кемерово, 18-21 апреля 2023 года.

9. **Щеглова, Р.А.** Метод повышения усталостной прочности высоконагруженного замкового соединения буровой штанги /Р.А. Щеглова//, Сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» Тула, 18-20 апреля 2023 года. – С.164-166.

10. **Щеглова, Р.А.** Особенности технологического обеспечения надежности замковых резьб / Р. А. Щеглова // XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования». Тезисы докладов, 21-27 мая 2023 года – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – №2. –С.83-85.

11. **Каренина, Р.А.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств замковых резьбовых соединений путем финишной магнитно-абразивной обработки /Р.А. Каренина // XVII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения». Тезисы докладов, 25-29 ноября 2024 года – Томск: Томский политехнический университет, 2024. –С.196-197.

Патент:

12. Патент: 2797796. Российская Федерация, МПК В24В 31/00 (2006.01). Способ магнитно-абразивной обработки замкового соединения буровой штанги. Заявка №2022128603: заявл. 03.11.2022; опубл. 08.06.2023/ Максаров В.В., Кексин А.И., **Щеглова Р.А.**, заявитель СПГУ. – 14 с. :ил.

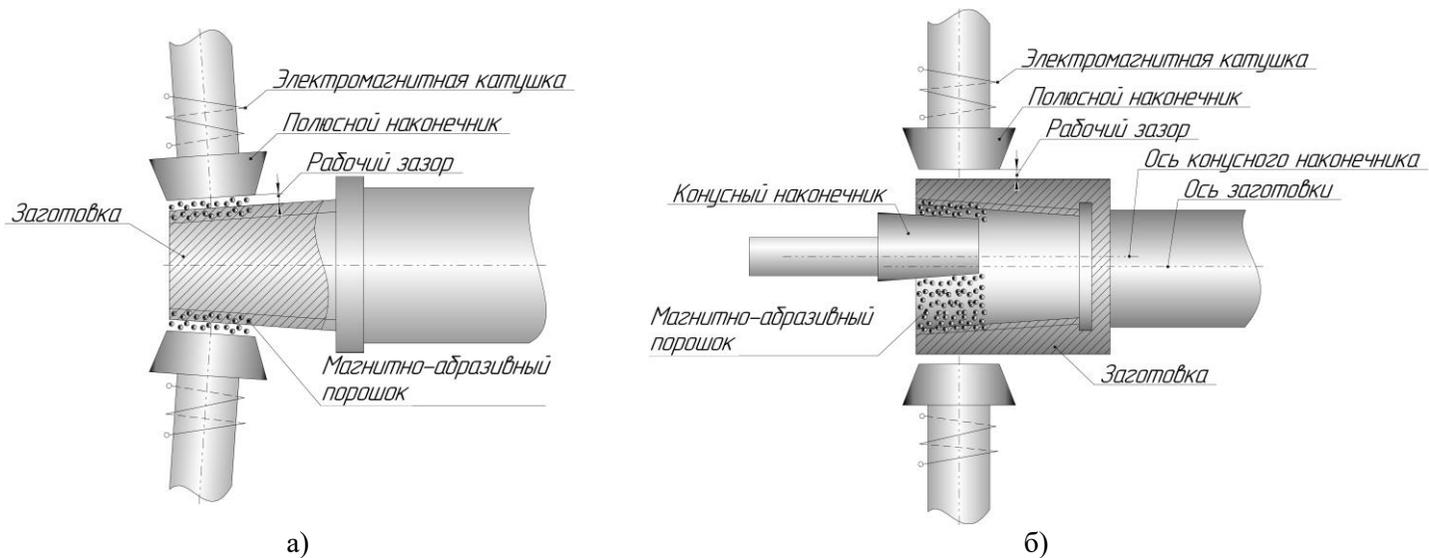


Рисунок 1 – Схема магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей (а – наружных, б – внутренних)

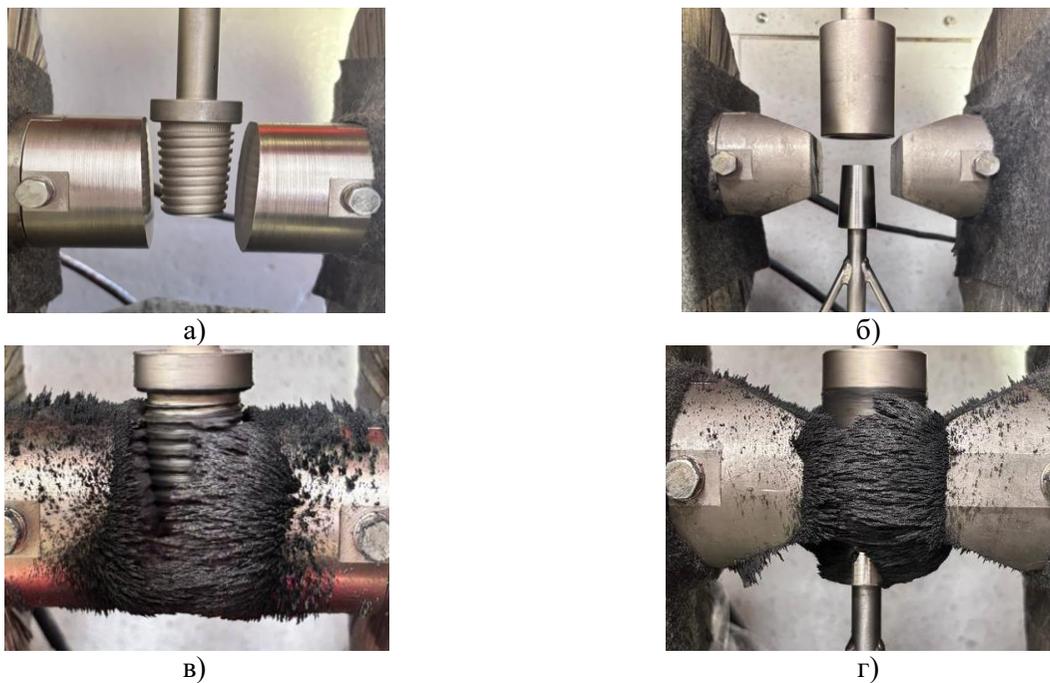
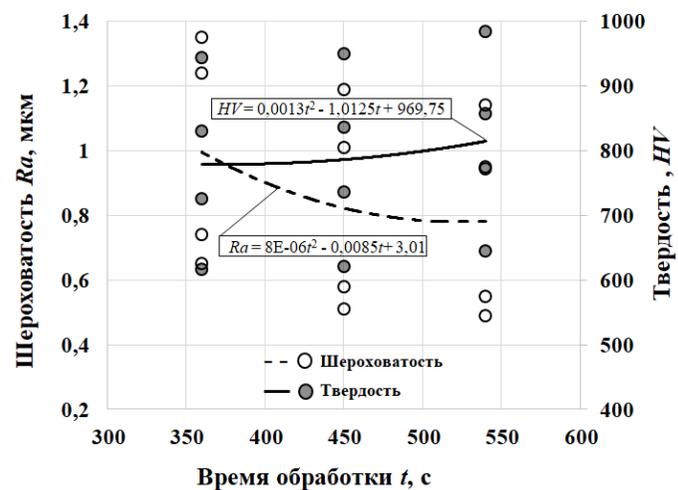
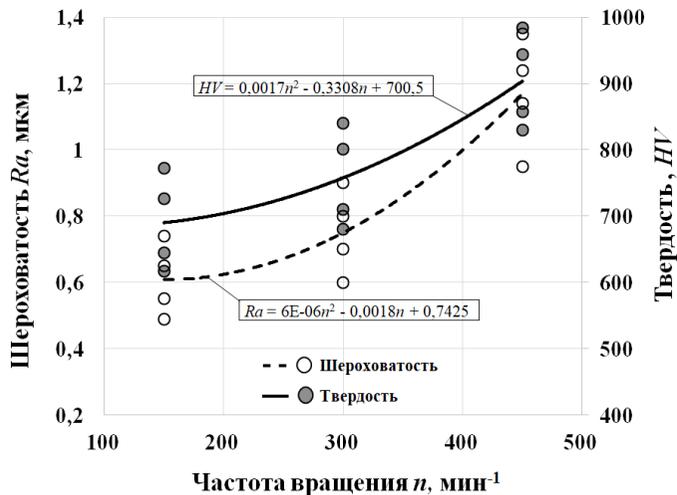


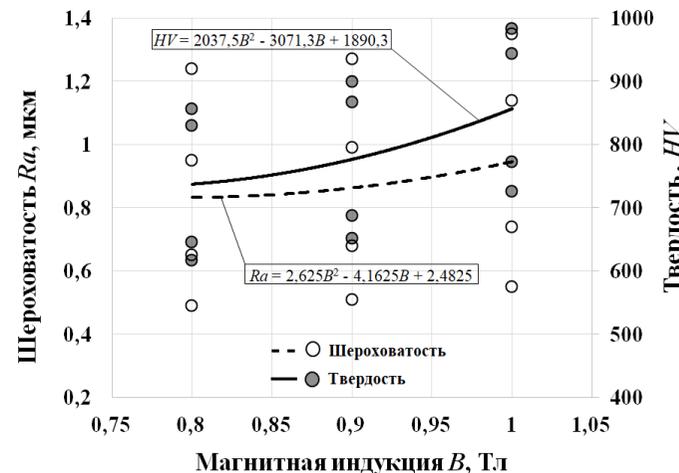
Рисунок 2 – Подготовка полюсных наконечников и магнитно-абразивная обработка, где: а, в) наружной резьбовой поверхности; б, г) внутренней резьбовой поверхности



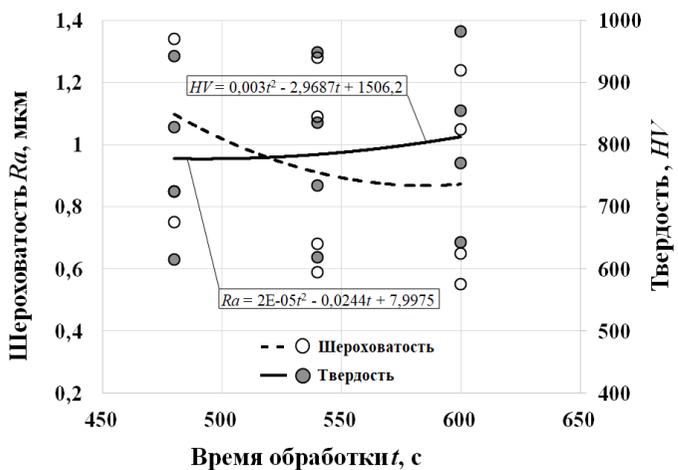
а)



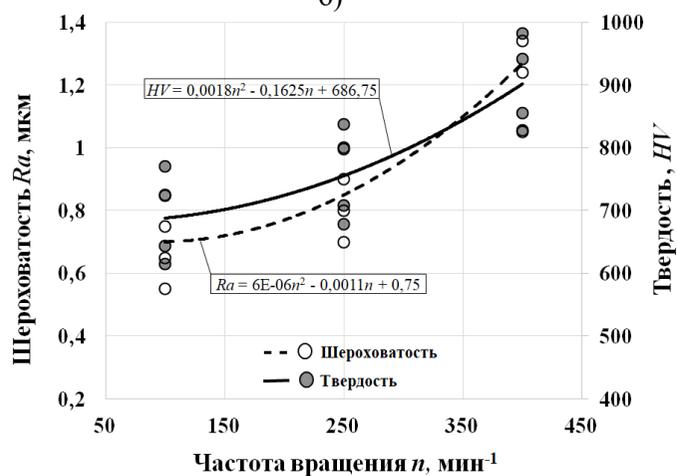
б)



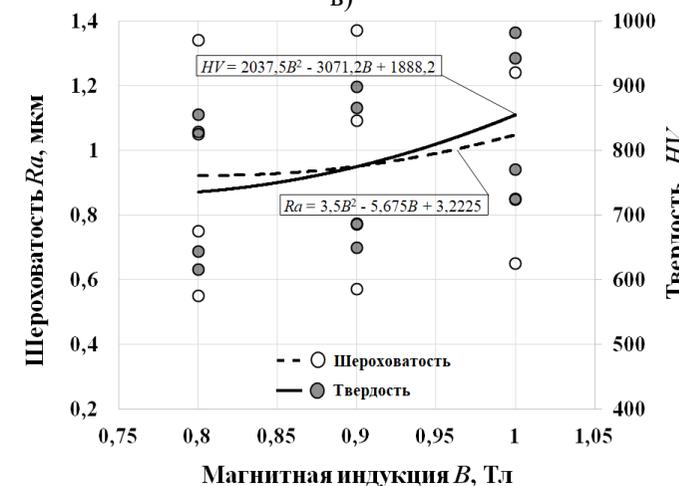
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4 – Графическая зависимость влияния режимных факторов МАО на наружную резьбовую поверхность (а, б, в) и внутреннюю резьбовую поверхность (г, д, е)