

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Максаров В.В.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ	14
1.1 Особенности эксплуатации резьбовых соединений буровых штанг.....	14
1.2 Эксплуатационные свойства, определяющие состояние резьбовых соединений буровых штанг	16
1.2.1 Усталостная прочность резьбовых соединений буровых штанг	17
1.2.2 Износостойкость резьбовых соединений буровых штанг.....	18
1.3 Анализ влияния параметров качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства.....	18
1.3.1 Шероховатость поверхностей.....	19
1.3.2 Остаточные напряжения	20
1.3.2 Твердость.....	21
1.3.3 Наклеп.....	21
1.4 Конструкторско-технологические методы повышения качества резьбовых соединений буровых штанг	22
1.4.1 Конструктивные методы повышения качества резьбовых соединений буровых штанг.....	22
1.4.2 Технологические методы повышения качества резьбовых соединений буровых штанг	23
1.4.2.1 Изготовление резьбовых поверхностей буровых штанг резанием.....	24
1.4.2.2 Изготовление резьбовых поверхностей буровых штанг накатыванием	24
1.4.2.3 Финишные методы повышения качества поверхностей	25
1.5 Выводы по первой главе	26

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ	29
2.1 Сущность и особенности магнитно-абразивной обработки.....	29
2.2 Производство и эксплуатационные характеристики	31
магнитных абразивов.....	31
2.2.1 Спеченные магнитные абразивы	31
2.2.2 Магнитные абразивы на основе клея	33
2.2.3 Магнитные абразивы на основе плазмы	33
2.2.4 Несвязанные магнитные абразивы	34
2.2.5 Другие магнитные абразивы	35
2.3 Разработка способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей буровых штанг	36
2.3.1 Анализ способов магнитно-абразивной обработки наружных и внутренних поверхностей.....	36
2.3.2 Способ магнитно-абразивной обработки резьбовых	38
поверхностей буровых штанг	38
2.3.3 Моделирование магнитного поля в магнитно-абразивной среде.....	42
2.4 Устройство, осуществляющее магнитно-абразивную обработку резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг	49
2.5 Диапазоны рабочих движений при.....	54
магнитно-абразивной обработке	54
2.6 Выводы по второй главе.....	58
ГЛАВА 3 МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ	60
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований.....	61

3.2 Влияние режимных факторов магнитно-абразивной обработки на параметры качества наружных и внутренних резьбовых поверхностей буровых штанг	69
3.2.1 Шероховатость наружных и внутренних резьбовых поверхностей	69
3.2.2 Твердость наружных и внутренних резьбовых поверхностей	78
3.3 Выводы по третьей главе	84
ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ	86
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований	87
4.2 Оценка коррозионной стойкости резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг с различными режимами подготовки поверхностей	89
4.3 Практические рекомендации по технологическому обеспечению качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг	92
4.4 Выводы по четвертой главе	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	99
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технические характеристики станка, приборов	111
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на способ магнитно-абразивной обработки замкового соединения буровой штанги	113
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о промышленном внедрении результатов диссертации	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Технологическая карта изготовления образцов с наружной/внутренней резьбой	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Чертежи образцов	120

ВВЕДЕНИЕ

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 40X и 40XH, 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 [46].

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 исследуемого направления:

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. Технологическое обеспечение качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, 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:

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 (значение магнитной индукции) на коррозионную стойкость резьбовых поверхностей.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения 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, позволяя оценить их воздействие 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 факторы 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 замковых 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 «ИЗКАРТЭКС Имени П.Г. Коробкова» от 17.03.2025 г. (Приложение В).

Методология и методы исследований

Исследования были основаны на существующих данных в области магнитно-абразивной обработки, научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований и методиках математического моделирования. Экспериментальная часть исследования проведена на фрезерном станке с ЧПУ *Emco Concept Mill 250*, в камере соляного тумана *TDC 1200 PN*. Для обработки и интерпретации полученных результатов экспериментов использованы статистические методы анализа данных, лабораторное оборудование: прибор для измерений параметров контура и шероховатости поверхности *Waveline W920RC*, микроскоп инвертированный лабораторный *Leica DM ILM HC*, твердомер *Константа TV*.

Положения, выносимые на защиту:

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 «Нанозифика и наноматериалы 2022» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (г. Санкт-Петербург, 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 отечественной и зарубежной 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, выполнении 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 (пункты списка литературы № 15, 30 - 33, 70 - 75), 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 (пункт списка литературы № 44) (Приложение Б).

Структура диссертации

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ

1.1 Особенности эксплуатации резьбовых соединений буровых штанг

Россия обладает одним из крупнейших в мире природно-ресурсным потенциалом. В условиях развития рыночной экономики ключевым фактором эффективного функционирования и дальнейшего роста горнодобывающей отрасли является совершенствование технологии подземной добычи полезных ископаемых. В частности, более 12 % добытой в мире нефти приходится на Россию.

В настоящее время общепринятые понятия бурения, такие как сверхглубокое бурение, бурение с увеличенным радиусом действия, бурение скважин малого диаметра используют для добычи нефти, несколько десятилетий назад казались технологически невозможными [82]. В этой связи, предъявляются высокие требования к физическим и механическим свойствам компонентов бурильной колонны.

В конструкции буровых установок ключевую роль в обеспечении общей надежности играет резьбовое соединение бурильной трубы (рисунок 1.1). Широкая востребованность данного типа соединений объясняется их высокой надежностью, конструкционной простотой, удобством регулирования затяжки, а также возможностью многократного демонтажа и сборки без необходимости использования дополнительных соединительных элементов.

Во время бурения горной породы движение бурового долота относительно поверхности породы, а также вращение долота и ударные воздействия создают осевые и поперечные колебания буровой штанги (рисунок 1.2), в результате чего в последних возникают высокие циклические напряжения и напряжения при изгибе. В резьбовых соединениях вибрации приводят к возвратно-поступательному скольжению поверхностей резьбы, которое является причиной циклической деформации и износа трущихся поверхностей.



Рисунок 1.1 – Резьбовое соединение бурильных труб

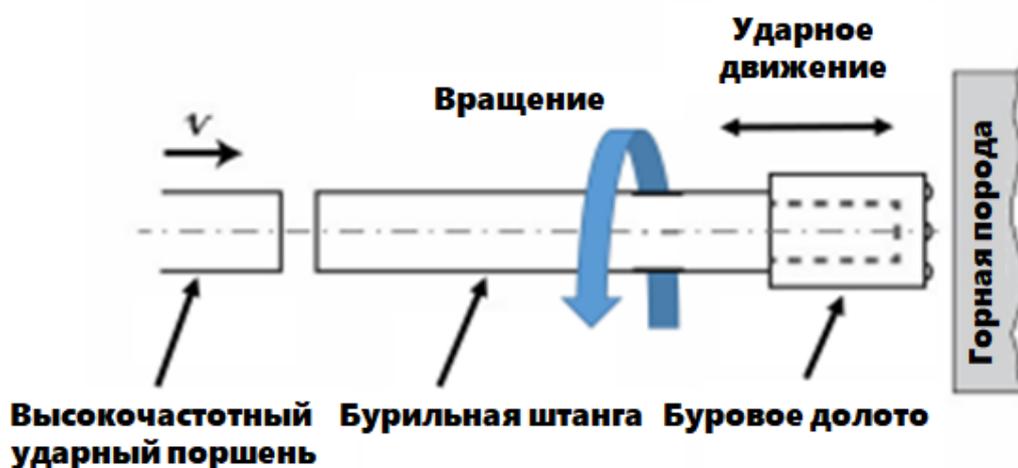


Рисунок 1.2 – Схема движения бурового инструмента относительно поверхности породы

Разрушение бурильного инструмента ввиду усталостного повреждения по телу и в резьбовых соединениях становится все более распространенным видом аварий при бурении. Согласно данным нефтепромысловой статистики, 90% всех случаев отказов узлов трения деталей бурильной трубы вызваны их изнашиванием и только 10% можно отнести к поломкам. В качестве наиболее типичных дефектов резьбовых соединений можно отметить износ наружной поверхности и повреждения резьбы. Согласно данным API (American Petroleum

Institute) изломы резьбовых соединений занимают 55% от общего числа аварий [46].

Циклические воздействия механических параметров в процессе бурения (осевая нагрузка; усилия, создающие изгибающий момент при вращении колонны и долота; трение о стенки скважины и обсадной колонны; осевые нагрузки, возникающие при затяжках и посадках бурильной колонны; инерционные силы при спуско-подъемных операциях) сопровождаются накоплением усталостного повреждения бурового инструмента в скважине при превышении предела выносливости в зонах концентрации напряжений [77]. Таким образом, основными факторами разрушения резьбы являются усталостное разрушение и снижение износостойкости.

1.2 Эксплуатационные свойства, определяющие состояние резьбовых соединений буровых штанг

Эксплуатационные свойства резьбовых соединений играют ключевую роль в обеспечении надежности буровой установки [77]. Для увеличения долговечности и работоспособности резьбовых соединений требуется соблюдение ряда технических требований:

- прочность витков резьбы и их высокая износостойкость;
- усталостная долговечность резьбы и ее стержневой части;
- высокая твердость поверхностного слоя при сохранении вязкой сердцевины витков;
- рациональная высота и геометрия микронеровностей поверхностного резьбового слоя;
- мелкодисперсная структура поверхностного слоя;
- радиусная форма основания резьбы;
- рациональное расположение волокон металла;
- наличие сжимающих остаточных напряжений во впадинах резьбы;
- ремонтпригодность и сохранность соединения в процессе эксплуатации;
- защита резьбы от коррозионного воздействия и водородной хрупкости [67].

1.2.1 Усталостная прочность резьбовых соединений буровых штанг

Усталостное разрушение резьбовых соединений является следствием воздействия многоцикловых переменных нагрузок, при которых амплитуда разрушительной нагрузки в 10 – 20 раз ниже, чем при статическом нагружении. Основной зоной повреждения является первая нитка резьбы ниппеля, сопрягаемая с муфтой замкового соединения [25]. Исследования показывают [25, 27], что около 50 % растягивающей нагрузки от момента свинчивания концентрируется на первом витке резьбы ниппеля. Это обусловлено поступлением бурового раствора по винтовому зазору замковой резьбы капиллярным проникновением по торцевым участкам в начальные витки ниппеля. Факторами коррозионно-усталостного разрушения могут выступать нарушения технологического процесса свинчивания при спуско-подъемных операциях, а также использование смазочных материалов с недостаточными эксплуатационными характеристиками [76].

Особенность усталостного разрушения – практически полное отсутствие пластических деформаций в зоне повреждения и отсутствие предшествующих признаков материала, даже у болтов, выполненных из сталей с высокой пластичностью [10]. Инициация усталостного разрушения связана с образованием микротрещин, которые на ранних стадиях сложно обнаружить стандартными методами неразрушающего контроля. По мере развития дефекта его рост ускоряется, что приводит к разрушению соединения за короткий период времени.

Усталостный излом характеризуется тремя визуально различимыми зонами [20]. В области зарождения трещины процесс распространения дефекта протекает медленно, а поверхность разрушения полированная и окисленная. В следующей зоне скорость роста трещины возрастает, что приводит к формированию мелкозернистой структуры излома. В последней зоне разрушения, соответствующей статическому разрушению, имеет выраженную крупнозернистую или волокнистую структуру. Размер и соотношение этих зон определяется уровнем переменных напряжений и силы предварительной затяжки [82].

1.2.2 Износостойкость резьбовых соединений буровых штанг

Износостойкость резьбовых соединений определяется такими ключевыми параметрами, как интенсивность изнашивания материала витков и скорости скольжения в контакте витков, допускаемые уровни контактных давлений и температур [77]. На предельно допустимые нагрузки влияют:

- механические и физико-химические свойства материала резьбы; его антифрикционные характеристики;
- выбранный метод обработки поверхности, включая механическую, химико-термическую обработку;
- шероховатость поверхности;
- качество и количество смазочного материала, его равномерное распределение в зоне контакта, своевременное удаление продуктов износа;
- температурный режим эксплуатации соединения.

Для увеличения срока службы необходимо увеличивать площадь контакта трущихся поверхностей, поскольку это позволяет снижать локальные нагрузки и уменьшать интенсивность износа. Несовпадение углов резьбовых профилей в момент начального сопряжения сокращает контактную зону, провоцируя рост местных касательных напряжений и температуры трения, что в свою очередь ускоряет процессы изнашивания [77].

1.3 Анализ влияния параметров качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства

Многолетний опыт эксплуатации машиностроительной продукции различного назначения свидетельствует о том, что, состояние поверхностного слоя оказывает значительное влияние на надежность и долговечность деталей, а значит и на работоспособность всей машины или механизма. Это обусловлено тем, что эксплуатационные характеристики деталей во многом зависят от качества их поверхности.

Для оценки состояния поверхностного слоя резьбы используется три ключевых группы параметров: показатели шероховатости; характеристики физико-

механических свойств материала и параметры, описывающие распределение остаточных напряжений [77].

1.3.1 Шероховатость поверхностей

Долговечность и износостойкость машин и механизмов во многом зависят от качества обработки поверхностей их деталей, особенно от уровня шероховатости. Чем выше неровности на поверхности, тем интенсивнее происходит процесс изнашивания, поскольку площадь контакта оказывается значительно меньше расчетной, и нагрузки концентрируются на вершинах микронеровностей [41]. Данный процесс не только ускоряет механический износ, но и создает очаги повышенного напряжения, которые могут превысить прочностные пределы материала, вызывая его разрушение [92]. Таким образом, обеспечение низкой шероховатости поверхности – это важнейший фактор, определяющий надежность и срок службы конструктивных элементов. Влияние шероховатости поверхности на эксплуатационные свойства деталей представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Влияние шероховатости на эксплуатационные свойства деталей

Эксплуатационное свойство деталей	Влияние шероховатости на эксплуатационное свойство деталей
Коррозионная стойкость	Коррозия развивается быстрее и интенсивнее на грубо обработанных поверхностях деталей в атмосферных условиях. На качественно обработанных поверхностях наблюдается значительно более высокая устойчивость к коррозии.
Контактная деформация	Контактная жесткость соединений деталей сильно зависит от шероховатости и волнистости поверхности. Снижение этих параметров увеличивает опорную площадь детали на 80-90%, что способствует улучшению жесткости контакта.
Трение и износ	Приработочный износ увеличивается в зависимости от формы и ориентации микронеровностей. Острове́ршинные неровности подвергаются износу быстрее, чем плосковершинные, что влияет на долговечность соединений.

Продолжение таблицы 1.1

Усталостная прочность (УП)	Неровности способствуют концентрации напряжений, что может привести к образованию усталостных трещин. Недостаточная УП ведет к быстрому разрушению, что вызывает поломки и сбои в работе машин или механизмов.
Стабильность неподвижных посадок	В процессе запрессовки деталей происходит выравнивание микронеровностей, что приводит к снижению фактического натяга. В результате, на более шероховатых поверхностях обнаруживается снижение прочности соединения.
Теплопроводность	Соединения теряют теплопроводность, что снижает эффективность теплообмена.
Герметичность соединений (ГС)	Уменьшение площади контакта сопрягаемых поверхностей приводит к снижению контактной жесткости соединения.

1.3.2 Остаточные напряжения

Механическая обработка при изготовлении резьбы, в частности при производстве бурильных труб, приводит к микроструктурным изменениям поверхностных слоев материалов. Поверхностные слои подвергаются деформационному упрочнению, вследствие чего возникают остаточные напряжения.

Остаточные напряжения играют ключевую роль в сопротивлении деталей усталости. При циклической нагрузке металлов на поверхности происходят пластические деформации слабых зерен, что ослабляет структуру материала и способствует быстрому разрушению.

Деформации являются результатом наличия внутренних напряжений, которые могут быть вызваны различными причинами. Например, неравномерный нагрев, кристаллизационные, структурные изменения металла и т.д. При нарезании конической резьбы толщина снимаемого слоя на разных участках не постоянна ввиду геометрии инструмента, температуры в зоне контакта [84] и силы резания. Кроме того, среда для образования стружки из снимаемого слоя также различна.

Напряжения, возникающие при выполнении финишных операций, оказывают существенное влияние, как на эксплуатационные характеристики

деталей, так и на показатели качества их поверхности. Получение, а в некоторых случаях и эксплуатация такой поверхности, неизбежно связаны с возникновением в них остаточных напряжений, которые оказывают решающее влияние на прочность поверхностного слоя.

1.3.2 Твердость

В результате трения между поверхностями сопрягаемых деталей происходит механическое внедрение и молекулярное взаимодействие, включая притяжение и схватывание. Данные процессы развиваются одновременно, и их степень проявления зависит от конкретных условий изнашивания.

Для уменьшения износа деталей важно минимизировать внедрение контактных поверхностей, предотвращая их схватывание. Повышение твердости в ходе механической обработки способствует снижению этих явлений, что в результате увеличивает износостойкость поверхностей деталей.

При изготовлении деталей с замковой резьбой используют заготовки круглого сечения, которые подвергают улучшению. После операции улучшения заявленная твердость заготовок составляет 32...36 HRC.

1.3.3 Наклеп

Образование наклепа значительно улучшает эксплуатационные характеристики сопрягаемых деталей при умеренных нагрузках и давлениях. Однако, при высоких скоростях скольжения и больших давлениях влияние наклепа на износостойкость становится менее заметным, и в некоторых случаях он даже может оказывать отрицательное воздействие.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что наклеп уменьшает пластическую деформацию поверхностного слоя в основном за счет снижения его пластической составляющей.

Увеличение числа дефектов в кристаллической решетке позволяет искусственно регулировать прочность стали [55]. Также наклеп увеличивает энергетический уровень металла, что повышает его электрохимическую неоднородность, снижает электродный потенциал и способствует улучшению

сопротивления коррозии [55].

На сопротивление усталости деталей машин и механизмов упрочнение поверхностного слоя оказывает значительное влияние. Наклепанный слой препятствует образованию новых усталостных трещин и замедляет развитие существующих. Трещины в таких деталях чаще всего появляются под поверхностным слоем и начинают развиваться только при более высоких напряжениях и большем числе циклов нагрузки, чем в деталях без наклепа. Таким образом, наклеп снижает интенсивность воздействия различных геометрических и структурных концентраторов напряжений, что в свою очередь увеличивает сопротивление усталости [48].

1.4 Конструкторско-технологические методы повышения качества резьбовых соединений буровых штанг

Существуют конструктивные и технологические мероприятия, направленные на повышение сопротивления усталости, которые должны обеспечивать уменьшение концентрации напряжений и повысить сопротивление усталости [77].

1.4.1 Конструктивные методы повышения качества резьбовых соединений буровых штанг

К основным показателям качества резьбовых соединений относят:

- статическую и усталостную прочность;
- износостойкость;
- стопорящие свойства и их долговечность.

Для обеспечения вышеуказанных характеристик на сегодняшний день применяют различные конструкторские способы, среди которых можно выделить следующие:

- разработка конструкции узла, которая минимизирует износ поверхностей трения, обеспечивая при этом высокую надежность с минимальными материальными затратами на изготовление;
- определение рациональной шероховатости контактных поверхностей, установление допусков на зазоры и микрогеометрию деталей;

- система подачи смазки к узлам трения и проектирование устройств, обеспечивающих защиту поверхностей трения от воздействия на них абразивных частиц.

Для улучшения усталостных характеристик соединительной резьбы можно изменить профиль резьбы, чтобы уменьшить концентрацию напряжений у корней резьбы. Кроме того, могут быть изменены конусность резьбы, шаг или допуск на задействованной резьбе для распределения нагрузки, увеличение радиуса закругления впадин резьбы, введение зарезьбовых канавок и наружных проточек уменьшенной жесткости.

Поскольку вышеуказанные изменения обычно приводят к усложненным формам резьбы, требующим точных допусков, локальные изменения резьбы могут рассматриваться как менее надежные способы влияния на усталостное поведение соединения. Указанное явление связано с тем, что износ или локальные повреждения в процессе эксплуатации могут негативно повлиять на установленные жесткие допуски и, следовательно, понизить усталостные свойства.

Повышенные требования к изделию в свою очередь приводят, как правило, к повышению себестоимости, размеров и массы соединения. В некоторых случаях конструктивными методами решить задачу повышения качества невозможно [66].

1.4.2 Технологические методы повышения качества резьбовых соединений буровых штанг

Качество резьбовых соединений буровых штанг в значительной мере определяется точностью их соединения и состоянием поверхностных слоев сопрягаемых резьбовых деталей, включая отклонения формы, параметры шероховатости, физико-механические характеристики, формируемыми на этапах изготовления и сборки резьбы. Данные параметры зависят как от свойств исходного материала, так и от ряда технологических факторов, таких как методы и схема формообразования, конструктивные особенности инструмента, а также режимы обработки.

В связи с этим возникает потребность в разработке технологий, обеспечивающих стабильность качественных показателей поверхностных слоев витков резьбы буровых штанг в зависимости от их функционального назначения. Современные проблемы улучшения качества резьбовых соединений обостряются из-за отсутствия научно-обоснованных методик для расчета эксплуатационных характеристик, нормирования параметров качества рабочих поверхностей резьбы и оптимизации методов обработки и сборки.

Следовательно, исследования, направленные на совершенствование технологического процесса изготовления и сборки резьбовых соединений с акцентом на рациональные способы обработки становятся крайне важными [20].

К технологическим мероприятиям относятся:

- выбор режимов механической обработки;
- выбор методов термической обработки (объемная или поверхностная закалка с последующим отпуском) и термомеханической обработки;
- выбор методов термодиффузионного насыщения (цинкование, азотирование, алитирование и др);
- применение поверхностного пластического деформирования;
- выбор защитных покрытий;
- правильный монтаж и регулировка трущихся узлов;
- рациональный ремонт изношенных деталей.

1.4.2.1 Изготовление резьбовых поверхностей буровых штанг резанием

Формирование наружной и внутренней замковой резьбы производится на специальных универсальных станках или станках с ЧПУ способом нарезания резьбонарезными сменными твердосплавными пластинами или резьбовыми гребенками.

1.4.2.2 Изготовление резьбовых поверхностей буровых штанг накатыванием

При накатывании профильный твердый ролик выдавливает в теле трубы канавку, приподнимая металл выступа. Способ отличается высокой производительностью. Нить резьбы становится прочной за счет образующегося на

поверхности наклепа. Для накатки при изготовлении малых партий деталей, профильный ролик может устанавливаться на токарный станок.

1.4.2.3 Финишные методы повышения качества поверхностей

Финишная обработка – это, как правило, заключительная производственная операция, в результате которой улучшается качество поверхности и целостность обрабатываемых деталей. К традиционным операциям финишной обработки можно отнести хонингование, притирку и шлифование. В этих операциях используется жесткий инструмент для обработки, на заготовку действуют значительные нормальные напряжения, которые могут вызывать мелкие трещины на окончательно обработанных поверхностях. Таким образом, снижается прочность и точность обрабатываемых деталей.

Технологию микро/нано финишных процессов можно разделить на два вида. Первый – это традиционные методы, а второй – передовые методы как показано на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Вид микро/нано финишных процессов

Также с целью повышения надёжности резьбовых соединений применяют азотирование, карбонитрацию, полимерные материалы, лазерное упрочнение,

электромеханическую обработку, износостойкие покрытия и поверхностно-пластическую обкатку роликом [13].

Однако высокая трудоемкость и чувствительность к технологическим параметрам традиционных методов являются одними из ключевых факторов, инициирующих поиск альтернативных и передовых методов финишной обработки. Кроме того, традиционные методы предварительно настраиваются с учетом конкретных характеристик деталей и требуют пересмотра технологического процесса в случае изменения требований к конструкции. Именно здесь на первый план выходят нетрадиционные способы финишной обработки, такие как магнитно-абразивная обработка (МАО), предназначенная для окончательной обработки поверхностей детали и основанная на воздействии магнитного поля на ферромагнитные частицы путем удаления тонких микро- или наноразмерных слоев.

1.5 Выводы по первой главе

Анализ современного состояния вопроса повышения качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг позволил сделать следующие выводы:

1. В современном горном машиностроении подземный способ добычи полезных ископаемых является широко применяемым. В конструкции бурильных агрегатов резьбовые соединения буровых штанг являются одними из важнейших элементов, определяющих надежность буровой установки в целом.

2. Несмотря на повсеместное использование резьбовых соединений при проектировании буровых установок, существует ряд проблем, связанных со сложными динамическими условиями их эксплуатации. В таких условиях работы, подвергаясь переменным нагрузкам, резьбовые соединения часто теряют прочность из-за воздействия множества факторов, которые приводят впоследствии к усталостным разрушениям.

3. Применение основных методов обработки резьбовых поверхностей буровых штанг весьма ограничено по причине наличия в них существенных недостатков. Именно поэтому появляется необходимость поиска других более

эффективных способов финишной обработки изделий, основанных, как правило, на применении абразивных методов.

На основании сформулированных выводов ставится цель и задачи исследования.

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

Идея исследования. Технологическое обеспечение качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, 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:

1. Осуществить 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.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ

2.1 Сущность и особенности магнитно-абразивной обработки

Магнитно-абразивная обработка представляет собой технологический процесс, сочетающий характеристики механических и электрофизических способов обработки. В отличие от традиционных способов шлифования, в методе МАО используется абразивный порошок, обладающий ферромагнитными свойствами. Это ключевое отличие позволяет частицам порошка формировать динамически изменяющуюся структуру под воздействием магнитного поля, создавая «магнитную щетку». Магнитное поле, являясь фундаментальным фактором процесса, формирует направленные силовые линии, которые упорядочивают движение абразивных частиц. В результате обеспечивается не только высокоточная обработка поверхности, но и возможность воздействия на сложные геометрические формы и труднодоступные участки деталей. Кроме того, за счет управляемого магнитного взаимодействия обеспечивается равномерность съема материала и минимизация механических напряжений, что делает метод МАО особенно перспективным для финишной обработки.

На основании обзора литературы [1-9, 19, 51, 52, 69, 79] приведены параметры (таблица 2.1), влияющие на изменение шероховатости поверхности и скорости удаления материала. Также обсуждается диапазон практически используемых величин и доминирующее влияние этих параметров. Плотность магнитного потока и зазор при обработке являются наиболее важными параметрами, за которыми следуют размер зерна и время цикла, используемое для достижения желаемой шероховатости поверхности.

Таблица 2.1 – Параметры МАО, оказывающие влияние на процесс обработки

Параметр	Описание параметра	Доминирующий эффект	Диапазон
Рабочий зазор	Зазор между поверхностью заготовки и магнитным наконечником	Увеличение зазора уменьшает магнитное поле	1 мм – 2 мм
Скорость подачи	Поступательное движение вдоль магнитных наконечников	Оказывает наибольшее влияние на шероховатость при обработке деталей из алюминиевых сплавов	20 – 250 мм/мин
Скорость вращения	Скорость вращения заготовки, установленной в шпиндель фрезерного станка, на котором базируется установка для МАО	Значения F_x , F_y и F_z увеличиваются до оптимального значения, а затем уменьшаются из-за увеличения центробежной силы, что приводит к разрыву абразивных цепочек	50 – 600 об/мин
Магнитная индукция	Напряженность силовых линий магнитного поля в рабочем зазоре	Увеличение напряженности магнитного потока увеличивает силу воздействия на магнитно-абразивный порошок	0,2 – 2,2 Тл
Соотношение размеров	Соотношение размеров частиц железа и абразивных частиц	Соотношение размеров определяет силу разрыва среды, которая, в свою очередь, ограничивает скорость вращения во избежание разделения	–

Продолжение таблицы 2.1

Уменьшение шероховатости	Особенности текстуры поверхности, возникающие в процессе производства	Эти значения характерны для конкретного материала и изменяются при изменении твердости материала	2 – 7 раз
Время обработки	Интервал времени, в течение которого происходит обработка	–	2 – 20 мин

2.2 Производство и эксплуатационные характеристики магнитных абразивов

Порошок в магнитно-абразивной обработке представляет собой смесь ферромагнитных и абразивных составляющих (рисунок 2.1). Для получения магнитных абразивов используются следующие различные методы:

- спекание;
- адгезивная основа;
- плазменная основа (плавление порошка/плазменное напыление);
- смешивание (слабое склеивание/разъединение)
- другие.

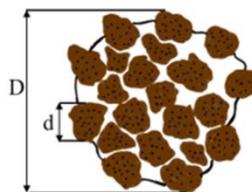


Рисунок 2.1 - Магнитная абразивная частица, где (D) диаметр частицы, (d) диаметр абразивной частицы

2.2.1 Спеченные магнитные абразивы

По технологии спекания магнитные абразивы получают в условиях высокой температуры и давления в инертной среде. Твердая масса железа и абразивных материалов, образующаяся в процессе спекания, измельчается до нужного размера.

Исследователь Шинмура [98 - 101] изучал влияние различных параметров обработки, таких как частота и амплитуда вибрации, плотность магнитного потока, зазор между полюсами и время обработки на чистовые характеристики при использовании спеченных магнитных абразивов. Согласно его исследованиям, вибрация и плотность магнитного потока оказывают значительное воздействие на эффективность чистовой обработки, диаметр частиц железа – на удаление материала и на чистоту поверхности. Влияние диаметра абразивных частиц на удаление материала было сравнительно небольшим, в то время как воздействие на шероховатость поверхности было значительным.

Ванг и Ху [104] разработали установку для внутренней отделки труб. Используются три вида магнитных абразивов, перечисленных в таблице 2.2. Было исследовано влияние различных параметров, таких как скорость подачи, абразивный материал и размер частиц, на шероховатость поверхности и скорость удаления материала.

Таблица 2.2 – Различные виды магнитных абразивов

Номер порошка	Вид порошка	Массовая доля абразива	Способ изготовления
A_1	TiC/Fe	20	Магнитный абразив спекается после укладки на поддоны
A_2		35	Магнитный абразив укладывается на поддоны после спекания
A_3		7	Магнитный абразив изготавливается методом термической обработки на месте

Выявлено, что существует рациональный размер частиц магнитного абразива 30-50% для TiC/Fe , обеспечивающий максимальную скорость удаления материала. Аналогичным образом, существует рациональный объем магнитного абразива, который обеспечивает максимальную скорость удаления материала. При магнитной обработке без использования СОЖ скорость удаления материала увеличивается только на начальном этапе. Однако после того, как поверхность достигает требуемых значений шероховатости, увеличение скорости удаления материала постепенно замедляется.

Карбид титана TiC представляет собой перспективный материал, обладающий уникальным сочетанием свойств, включая высокую твердость, термическую и химическую стабильность, температуропроводность и сравнительно низкую плотность. Благодаря этим характеристикам материал широко используется в качестве упрочняющей фазы в сверхпрочных и износостойких сплавах, а также служит основой для создания высокоэффективных инструментальных материалов, керамики и металл-керамических композитов.

2.2.2 Магнитные абразивы на основе клея

Фейгин и др. [83] приготовили магнитные абразивы, смешав железный порошок, Al_2O_3 и клей в качестве адгезива. В результате проведенного исследования было определено, что этот метод был простым по сравнению с другими методами получения магнитных абразивов. Скорость удаления материала была выше по сравнению с магнитными абразивами, полученными другими способами.

Кремен и др. [94] также разработали магнитные абразивы, используя клей для связывания магнитного компонента (железного порошка) с абразивным компонентом (алмазным порошком). Все три компонента были тщательно перемешаны, высушены и измельчены на мелкие частицы нужного размера для обработки. Затем, используя этот склеенный магнитный абразивный порошок и поддерживая плотность магнитного потока $B = 0,4$ Тл, время обработки - 5 мин, а в качестве охлаждающей жидкости использовали раствор борной кислоты (4 %), исследовали влияние размера зерен порошка на шероховатость поверхности и скорость удаления материала. Полученный максимальный процент снижения шероховатости поверхности составлял 45 %.

2.2.3 Магнитные абразивы на основе плазмы

Ямагучи и Ханда [106] разработали сферический магнитный абразив на основе железа, изготовленный методом плазменного напыления. Сначала они изучили возможность применения плазменного напыления, которое позволило придать существующему магнитному абразиву сферическую форму и предложили

условия, необходимые для получения сферического магнитного абразива. Во-вторых, они разработали новый сферический магнитный абразив, состоящий из отдельных частиц: абразивных зерен Al_2O_3 и частиц железа в соотношении 1:12, которые удерживают абразив только на внешней поверхности.

Ханда и др. [86] изготовили мелкие сферические магнитные абразивы на основе железа диаметром менее 10 мкм, изготовленные методом плазменного напыления. Для исследования было использовано карбонильное железо и частицы алмаза. Алмазные частицы термически диффундировали в железный порошок во время плазменного напыления (рисунок 2.2). После прохождения порошковых смесей через плазменное пламя порошковые смеси быстро охлаждались и затем восстанавливались в резервуаре для сбора порошка.

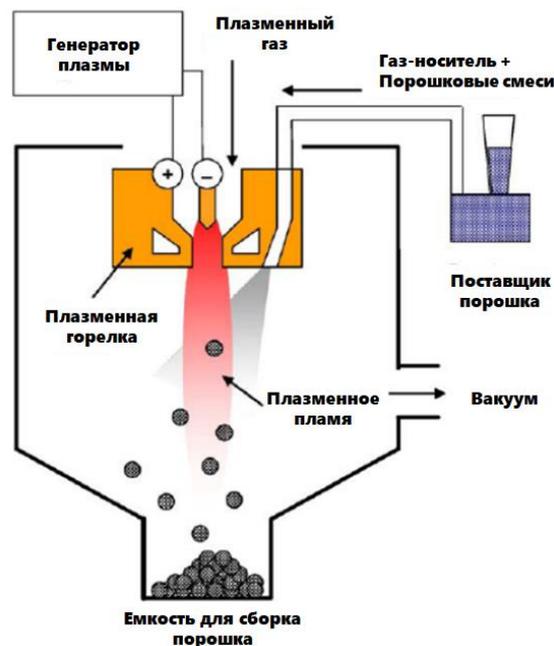


Рисунок 2.2 - Принципиальная схема системы плазменного напыления [86]

2.2.4 Несвязанные магнитные абразивы

Несвязанные магнитные абразивы изготавливаются путем механического смешивания частиц железа и абразивных материалов. Частицы железа однородно смешиваются с абразивными материалами в необходимом соотношении и удерживаются магнитным полем в зоне финишной обработки.

Эти частицы соединяются друг с другом вдоль силовых линий магнитного поля благодаря диполь–дипольному взаимодействию и образуют гибкую магнитно-абразивную щетку, которая прижимается к поверхности обрабатываемой детали и создает давление, достаточное для чистовой обработки. Такое давление приводит к образованию микротрещин на поверхности заготовки. Тангенциальное усилие, создаваемое вращением электромагнита и щеткой, является основной составляющей силы резания, ответственной за образование микротрещин.

Фокс и соавторы [85] использовали несвязанный магнитный абразив для финишной обработки керамических валиков и заявили о значительном улучшении качества поверхности (на 95%). Шинмура и Ямагучи [99] приготовили магнитные абразивы смешанного типа, смешав частицы железа различного размера и спеченные магнитные абразивы. Исследователи обнаружили, что магнитная сила магнитных абразивов смешанного типа равна среднему значению между магнитными абразивами и частицами железа. Величина магнитной силы увеличивается с увеличением процентного содержания частиц железа в смеси, но количество режущих кромок в процентном соотношении уменьшается.

2.2.5 Другие магнитные абразивы

Существует категория магнитных абразивов, основанная на использовании гелей.

Ванг и Ли [103] разработали магнитно-абразивную обработку на основе геля. Они приготовили смесь из силиконового геля, абразива SiC и стальной крошки. Смесь была использована для финишной обработки цилиндрического стержня. Исходная шероховатость поверхности составляла 0,677 мкм и снижена до 0,038 мкм за 30 минут чистовой обработки. Величина удаляемого материала лишь незначительно снизилась после обработки 15 заготовок при использовании той же абразивной среды.

Исследование показало, что повторное использование магнитно-абразивной среды возможно, а эффективность обработки достаточно стабильна.

Для достижения высокой производительности абразивной обработки необходимо учитывать соотношение твердости абразивного материала и

обрабатываемого объекта. Рациональным условием является превышение твердости абразива над твердостью обрабатываемого материала в 2,5 раза, что обеспечивает максимальную эффективность съема материала при корректном подборе режимных факторов. Соблюдение данного соотношения минимизирует износ абразива и повышает стабильность процесса обработки, что подтверждается экспериментальными исследованиями [7] (2.1).

$$H_a/H_m > 2,5, \quad (2.1)$$

где H_a – твердость абразива, HV ; H_m – твердость обрабатываемого материала, HV .

В качестве инструмента для магнитно-абразивной обработки изделий из конструкционной легированной стали 40Х был выбран материал на основе сплава карбида титана и железа ($TiC+Fe$).

Твердость зерен порошка ($TiC+Fe$) по Викерсу составляет 974 HV [6], твердость стали 40Х после закалки составляет 297 HV [13]. Превышение твердости абразива над твердостью обрабатываемого материала больше 2,5 является ключевым фактором, определяющим эффективность и рациональность его применения (2.2):

$$\frac{976}{297} = 3,3 > 2,5. \quad (2.2)$$

2.3 Разработка способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей буровых штанг

2.3.1 Анализ способов магнитно-абразивной обработки наружных и внутренних поверхностей

В области MAO как внутренних, так и наружных поверхностей существует множество технических решений, каждое из которых обладает определенными преимуществами и недостатками.

Известен способ магнитно-абразивной обработки цилиндрических отверстий (Авторское свидетельство СССР SU 1255403 А1, опубл. 07.09.1986г.) [1], при котором обработка осуществляется в магнитном поле, создаваемом системой полюсных наконечников: наружные наконечники имеют одноименную полярность, а внутренний – противоположную. Внутренний

наконечник устанавливают во внутренней области детали, формируя рабочие зазоры, которые заполняют ферро-абразивным порошком. Полюсные наконечники приводят во взаимное вращательное движение, обеспечивая активное воздействие порошка на внутреннюю поверхность детали [44].

Основным недостатком данного способа является то, что обработка, происходящая в два этапа, причем первый наладочный этап осуществляется при неравных рабочих зазорах, увеличивает время обработки и, следовательно, влияет на себестоимость финишной обработки.

Известен способ обработки внутренней поверхности волноводов сложной формы и любой длины (патент RU 2534656, опубл. 10.12.2014 г.) [42]. Способ заключается в распределении абразивного материала по внутренней поверхности волновода, с возможным добавлением жидкости, после чего вдоль волновода перемещается рабочий орган с постоянными магнитами. В результате воздействия магнитного поля осуществляется обработка внутренней поверхности волновода [44].

Недостатком данного способа магнитно-абразивной обработки является использование абразивного материала без магнитных частиц, что существенно снижает производительность обработки. Отсутствие ферромагнитных свойств у частиц порошка приводит к неэффективному перемешиванию, вследствие чего значительная их часть остается неиспользованной. Это снижает эффективность формирования абразивной щетки и негативно влияет на равномерность обработки [44].

Известен способ магнитно-абразивной обработки (Авторское свидетельство SU 1585124, опубл. 15.08.1990) [2], в котором заготовка подвергается обработке между двумя парами С-образных магнитных систем, которым придается переменное осциллирующее движение [44].

Недостатком данного способа магнитно-абразивной обработки является возникновение пересечений магнитных полей, обусловленных конфигурацией пар магнитных полюсов. Это приводит к неравномерному распределению

силовых линий в рабочей зоне, что снижает стабильность процесса обработки и приводит к варьированию качества формируемой поверхности [44].

Известен способ магнитно-абразивной обработки [3], при котором полюсной наконечник изготовлен с определенной конусностью для обработки деталей с коническими отверстиями.

Основным недостатком данного способа является необходимость смены полюсных наконечников для обработки деталей с другой конусностью, что увеличивает затраты времени на обработку деталей.

Известен способ магнитно-абразивной обработки поверхностей цилиндрических отверстий деталей из высоколегированных композитов (патент UA 94657C2, опубл. 25.05.2011 г.) [43], который включает размещение рабочего инструмента в цилиндрическом отверстии с образованием рабочего зазора между поверхностями инструмента и отверстия, создания в рабочем зазоре магнитного поля, размещение в рабочем зазоре ферро-магнитного абразивного порошка и вращения рабочего инструмента вокруг своей оси, при этом рабочий инструмент дополнительно перемещают по круговой траектории, а траектория оси рабочего инструмента смещена на расстояние от поверхности отверстия, что составляет сумму величин рабочего зазора и радиуса рабочего инструмента.

Недостатком данного способа является ограниченность в выборе обработки отверстий другого типа, например, конических.

2.3.2 Способ магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг

Известно, что соблюдение постоянного рабочего зазора позволяет обеспечить равномерное распределение магнитно-абразивной массы и магнитной индукции при магнитно-абразивной обработке, и как следствие, равномерного съема материала с обрабатываемой поверхности [52]. Согласно законам электромагнетизма, наибольшая плотность магнитного потока наблюдается в тех участках поверхности магнитных полюсов, где расстояние между противоположными полюсами магнита минимально [52]. Это обусловлено тем, что

в таких зонах силовые линии магнитного поля концентрируются, создавая наибольшую интенсивность магнитного взаимодействия. В процессе МАО, при вращении заготовки по часовой стрелке, силы трения, возникающие между поверхностью детали и частицами абразивного порошка, способствуют их перемещению в зоны с максимальной плотностью магнитного потока.

При совершении магнитными полюсами и заготовкой, вращательного движения, режущим частицам магнитно-абразивного порошка сообщаются круговое движение и осцилляция, исключающие совпадение траектории режущих частиц по следам предшествующей обработки и увеличивающие интенсивность обработки [5].

С учетом особенностей рабочих движений магнитно-абразивной обработки, а также на основании проведенного анализа существующих способов МАО внутренних и наружных поверхностей, был разработан способ обработки наружной и внутренней резьбовых поверхностей. Данный способ позволяет снизить шероховатость, увеличить площадь контакта витков резьбового соединения, устранить дефектный слой, возникший в ходе предшествующих операций и сформировать новый, упрочненный поверхностный слой. В результате повышается усталостная прочность и износостойкость резьбового соединения, что значительно улучшает его эксплуатационные характеристики.

Процесс обработки наружной резьбовой поверхности реализуется следующим образом (рисунок 2.3). Заготовка 1 фиксируется в шпинделе станка, например, вертикально-фрезерного, обеспечивая зазор 7 между полюсными наконечниками 3. На установке закреплены электромагнитные катушки 4. Магнитно-абразивный порошок 2 помещают в рабочее пространство, который при этом под действием сил магнитного поля удерживается и прижимается к обрабатываемой поверхности, копируя ее. Далее заготовку 1 приводят во вращательное 9 и возвратно-поступательное движение 8.

Для повышения эффективности процесса обработки была смещена ось полюсных наконечников 3 на угол 5, соответствующий конусу резьбы 6 заготовки 1. Данное решение позволяет обеспечить равномерное распределение магнитно-

абразивного порошка по всей поверхности резьбы ввиду сохранения постоянного рабочего зазора 7.

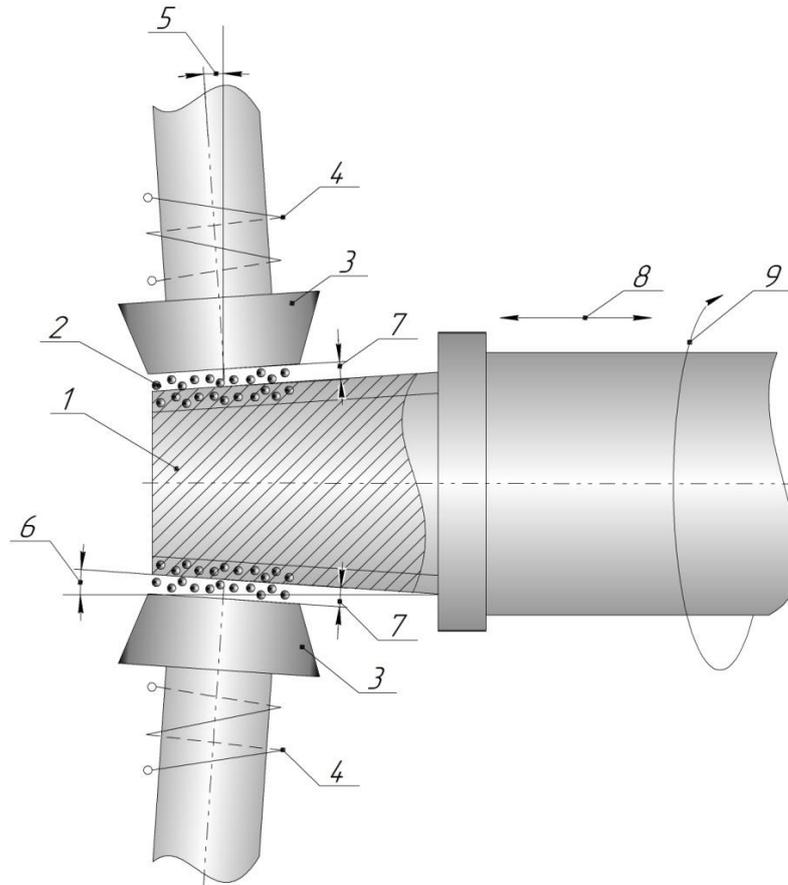


Рисунок 2.3 – Схема магнитно-абразивной обработки наружной резьбовой поверхности по предлагаемому способу, где: 1 – заготовка, 2 – магнитно-абразивный порошок, 3 – полюсные наконечники, 4 – электромагнитные катушки, 5 – угол наклона оси полюсных наконечников α , град, 6 – конус резьбы заготовки, град, 7 – величина зазора между полюсными наконечниками и заготовкой, мм, 8 – возвратно-поступательное движение заготовки; 9 – вращательное движение заготовки

Процесс обработки внутренней резьбовой поверхности реализуется следующим образом (рисунок 2.4). Заготовка 1 фиксируется в шпинделе станка, например, вертикально-фрезерного, обеспечивая зазор 7 между полюсными наконечниками 3. На установке закреплены электромагнитные катушки 4. Во внутреннее пространство заготовки 1 вводится конусный наконечник 8, который установлен со смещением относительно оси заготовки 10, при этом наконечник изготовлен со смещением относительно собственной оси 11. Магнитно-абразивный

порошок 2 помещают в рабочее пространство между внутренней поверхностью заготовки 1 и конусным наконечником 8, инструмент при этом под действием сил магнитного поля удерживается и прижимается к обрабатываемой внутренней поверхности, копируя ее.

Далее заготовку 1 приводят во вращательное 14 и возвратно-поступательное движение 13.

Дополнительным фактором, повышающим результативность обработки, является соответствие конуса наконечника 6 конусу резьбы 5 заготовки 1.

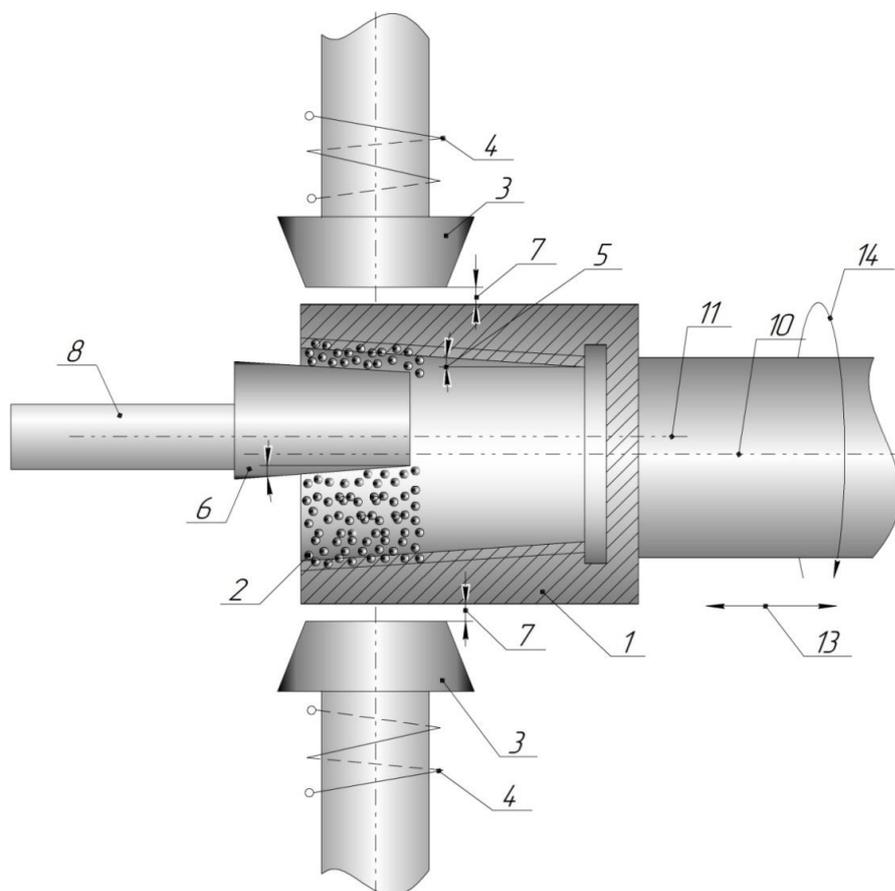


Рисунок 2.4 – Схема магнитно-абразивной обработки внутренней резьбовой поверхности по предлагаемому способу, где: – 1 – заготовка, 2 – магнитно-абразивный порошок, 3 – полюсные наконечники, 4 – электромагнитные катушки, 5 – конус резьбы заготовки, град, 6 – конус наконечника, град, 7 – величина зазора между полюсными наконечниками и заготовкой, мм, 8 – конусный наконечник, 9 – величина эксцентриситета, мм, 10 – ось заготовки, 11 – ось конусного наконечника, 12 – ось эксцентриситета, 13 – возвратно-поступательное движение заготовки; 14 – вращательное движение заготовки

2.3.3 Моделирование магнитного поля в магнитно-абразивной среде

Магнитные наконечники являются важным узлом установки для магнитно-абразивной обработки и играют решающую роль в повышении качества обрабатываемых поверхностей. Множество параметров, непосредственно связанных с полюсами, таких как скорость вращения, размер, геометрия и т.д., существенно влияют на результаты процесса. По этой причине для изучения влияния формы полюсных наконечников на процесс MAO были проведены исследования.

В качестве программной среды для исследования характеристик магнитного поля был использован *ANSYS Maxwell*, позволяющий проводить комплексное моделирование электромагнитных процессов в трехмерных системах.

В процессе моделирования процесса распределения магнитного поля получены следующие данные: визуализация магнитного поля в рабочем пространстве магнитно-абразивного устройства в зависимости от конфигурации рабочей поверхности полюсного наконечника, а также графическое представление изменения составляющей магнитной индукции в зависимости от положения в межполюсном пространстве вдоль заданного контура (рисунок 2.5).

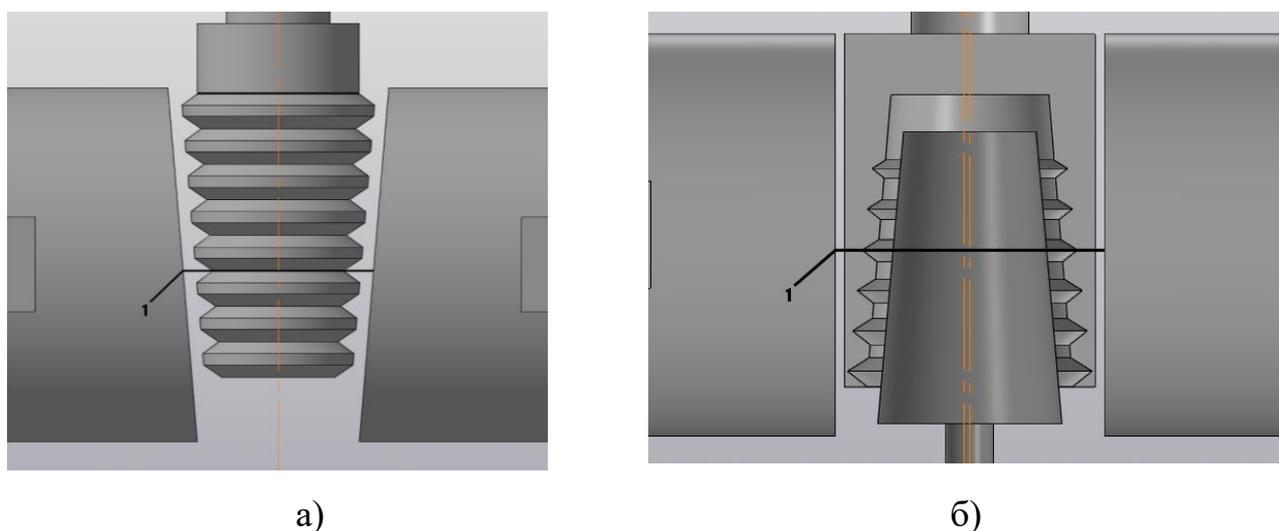
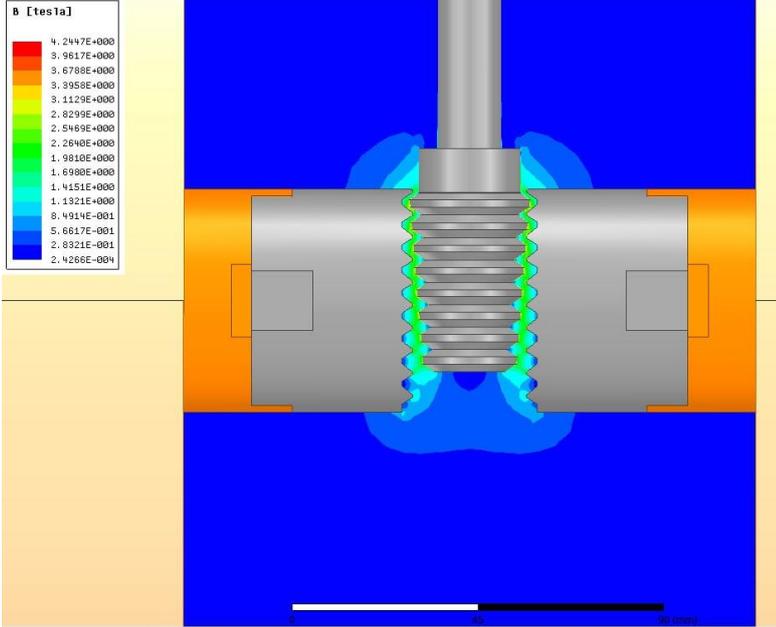


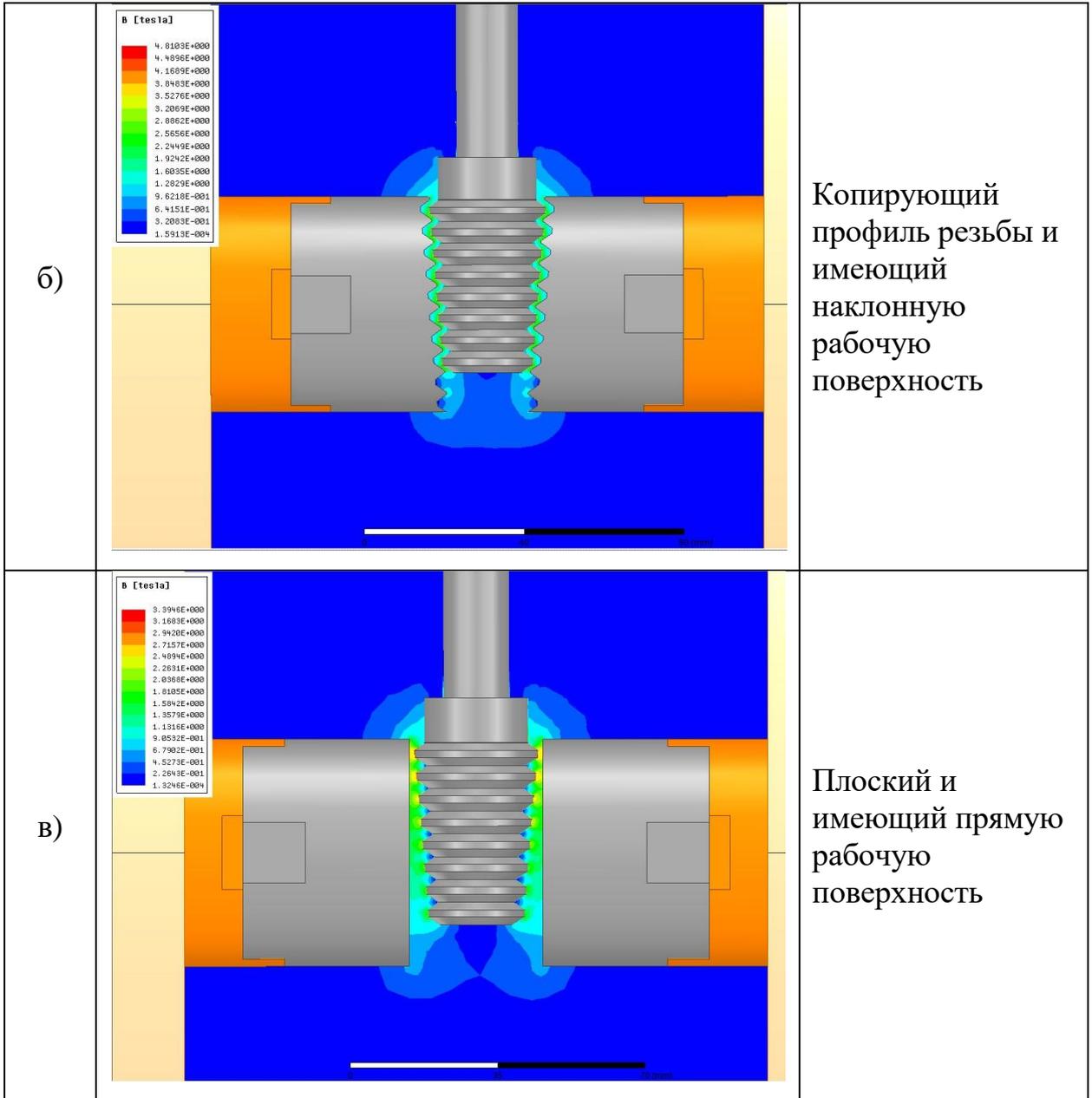
Рисунок 2.5 –Межполюсное пространство устройства, где: 1 – контур для построения графика магнитной индукции для а) наружной резьбовой поверхности, б) внутренней резьбовой поверхности

Проведено моделирование распределения магнитного поля при магнитных наконечниках, рабочая поверхность которых копирует профиль обрабатываемой резьбы (таблица 2.3, а, б). По результатам моделирования определено, что согласно таблице 2.3, (а) распределение магнитной индукции в межполюсном зазоре B неравномерно, для варианта из исполнения таблицы 2.3 (б) – равномерно. Однако выбор такого типа магнитных наконечников (таблица 2.3, б) ввиду высокой трудоемкости изготовления профиля может привести к удорожанию процесса MAO.

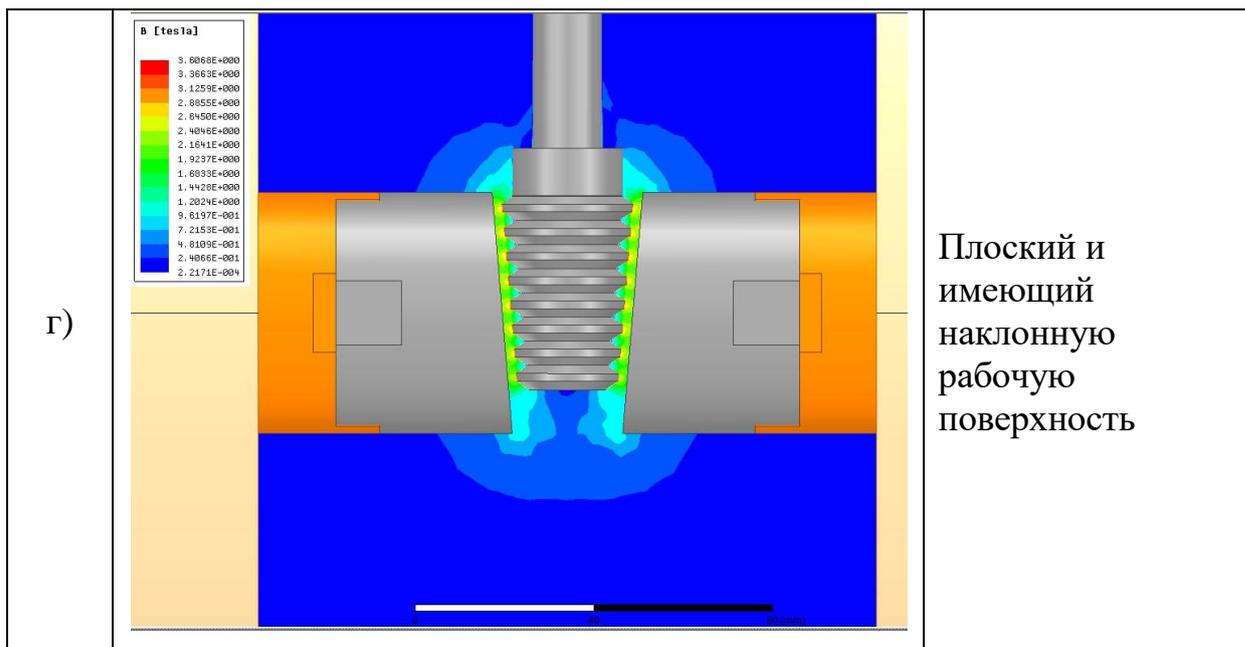
Таблица 2.3 – Картина магнитного поля при обработке образца с наружной резьбой

№ п/п	Моделирование распределения магнитного поля	Тип полюсного наконечника
а)		Копирующий профиль резьбы и имеющий прямую рабочую поверхность

Продолжение таблицы 2.3



Продолжение таблицы 2.3



В ходе моделирования распределения магнитного поля была получена визуализация магнитного поля в рабочем зазоре магнитно-абразивного устройства в зависимости от конфигурации рабочей поверхности полюсного наконечника.

Полученные данные позволяют сделать следующий вывод: использование в устройстве для MAO полюсного наконечника, имеющего плоскую наклонную рабочую поверхность, при котором обеспечивается соблюдение постоянного рабочего зазора, положительно влияет на равномерное распределение магнитной индукции (таблица 2.3, г).

Получено графическое представление (рисунок 2.6) изменения составляющей магнитной индукции B вдоль заданного контура межполюсного пространства для устройства, полюсные наконечники которого имеют плоскую наклонную поверхность (таблица 2.3, г).

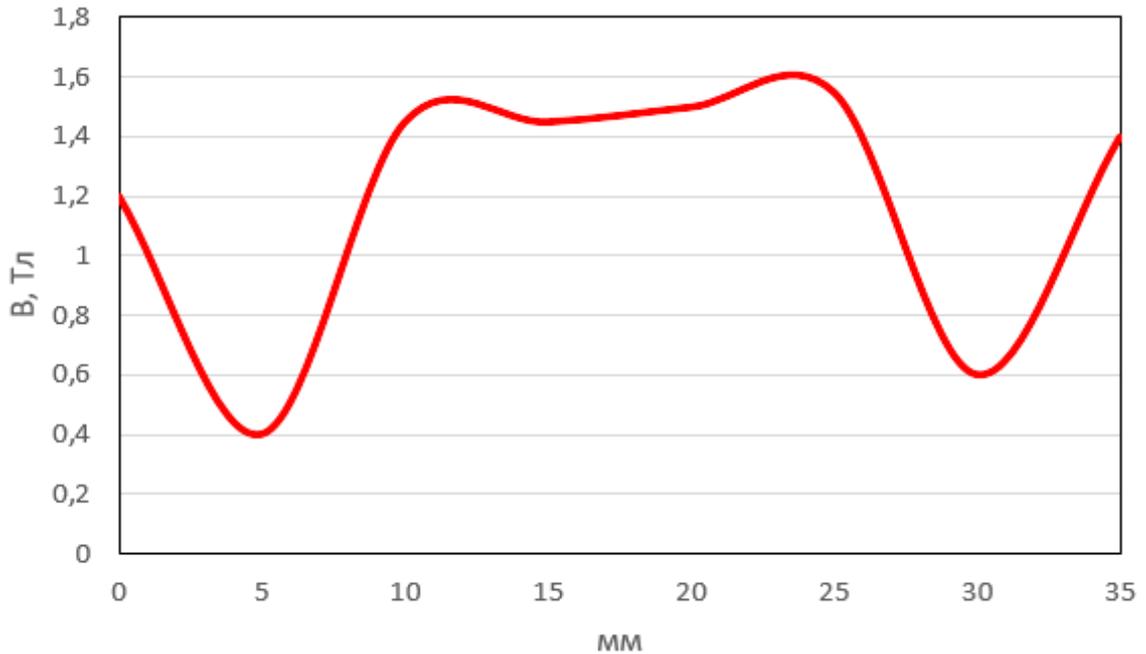
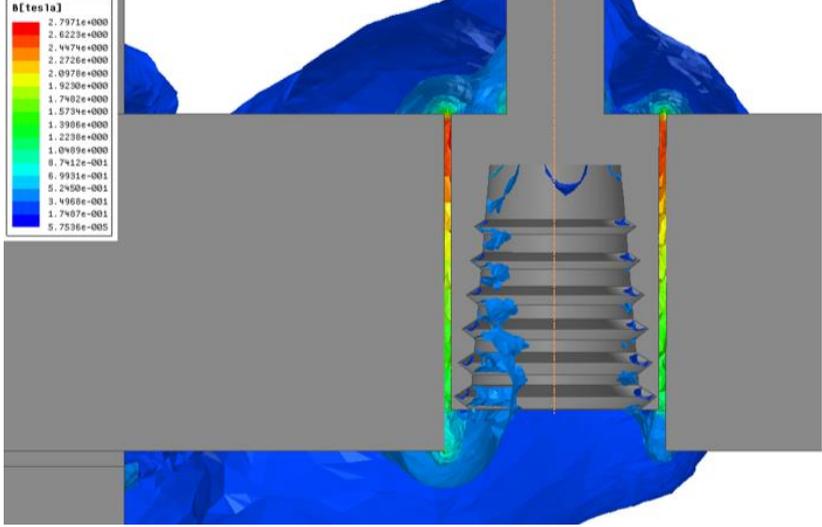
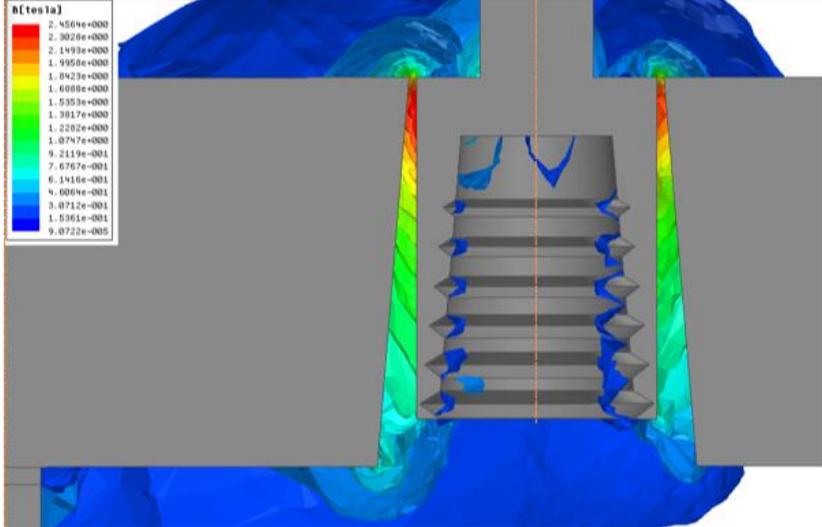


Рисунок 2.6 – График распределения магнитной индукции вдоль контура межполюсного пространства при обработке наружной резьбовой поверхности

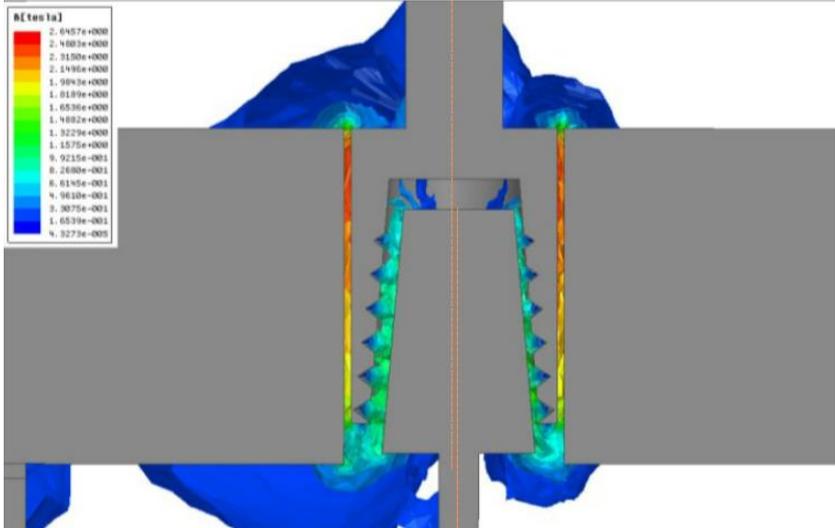
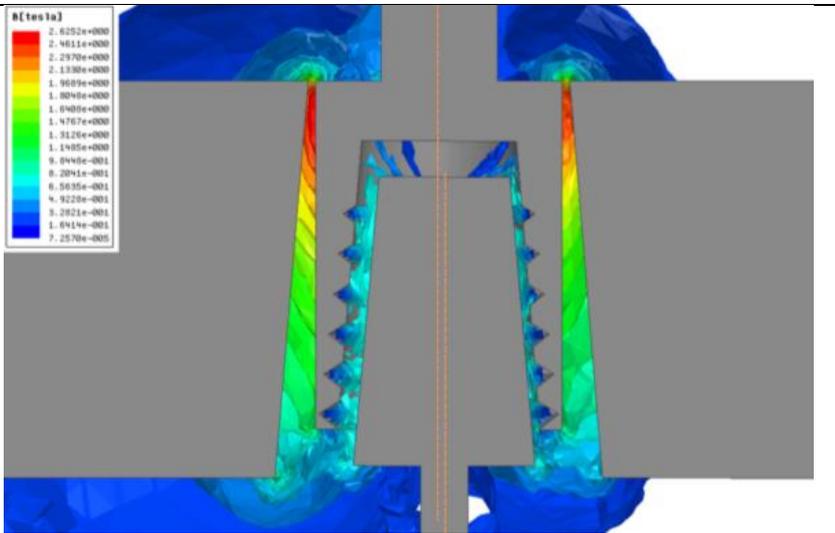
Согласно графику (рисунок 2.6), магнитная индукция распределяется с разбросом значений в диапазоне 10 – 25 мм межполюсного пространства и принимает значение 1,5 – 1,6 Тл и резко падает до 0,4 Тл – 0,6 Тл в точках 5 мм и 30 мм, соответствующих расположению впадины резьбы. Таким образом, для обеспечения обработки наружной резьбы необходимо подобрать определенные режимные факторы магнитно-абразивной обработки.

По полученным результатам моделирования распределения магнитного поля для образца с наружной резьбовой поверхностью, было принято решение для анализа образца с внутренней резьбовой поверхностью использовать только прямые и наклонные плоские полюсные наконечники.

Таблица 2.4 – Картина магнитного поля при обработке образца с внутренней резьбой

№ п/п	Моделирование распределения магнитного поля	Тип полюсного наконечника
а)		С прямой рабочей поверхностью
б)		С наклонной рабочей поверхностью

Продолжение таблицы 2.4

в)		С прямой рабочей поверхностью и установленным конусным наконечником
г)		С наклонной рабочей поверхностью и установленным конусным наконечником

Выявлено, что во внутренней области обрабатываемого образца отсутствует магнитное поле (таблица 2.4 а, б), следовательно, произвести магнитно-абразивную обработку внутренней резьбы невозможно.

В этой связи было принято решение во внутреннее пространство образца установить конусный наконечник со смещением относительно собственной оси и оси заготовки (таблица 2.4, в, г).

По полученной картине распределения магнитного поля, принято решение для проведения эксперимента по влиянию магнитно-абразивной обработки на внутреннюю резьбовую поверхность использовать плоские прямые полюсные наконечники, обеспечивая постоянный рабочий зазор между заготовкой и полюсами (таблица 2.4, в).

Получено графическое представление (рисунок 2.7) изменения составляющей магнитной индукции B вдоль заданного контура межполюсного пространства для устройства, полюсные наконечники которого имеют прямую рабочую поверхность (таблица 2.4, в).

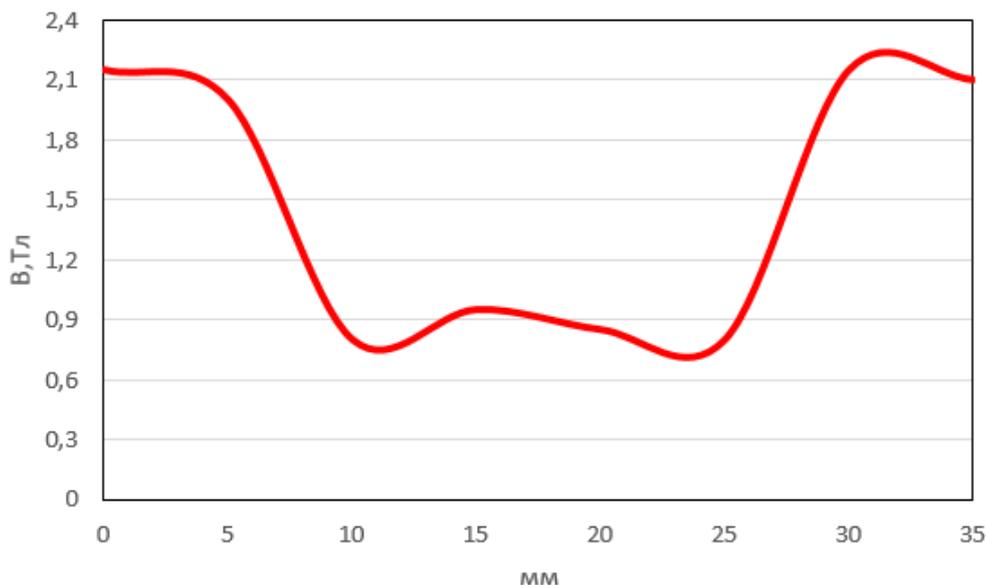


Рисунок 2.7 – График распределения магнитной индукции вдоль контура межполюсного пространства при обработке внутренней резьбовой поверхности

Согласно графику, магнитная индукция распределяется с разбросом значений в диапазоне 10 – 25 мм межполюсного пространства и принимает значение 0,85 – 0,95 Тл и резко падает до 0,75 Тл – 0,80 Тл в точках 5 мм и 30 мм, соответствующих расположению впадины резьбы. Таким образом, для обеспечения обработки внутренней резьбы необходимо подобрать определенные режимные факторы магнитно-абразивной обработки с учетом помещенного во внутреннее пространство конусного наконечника.

2.4 Устройство, осуществляющее магнитно-абразивную обработку резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг

Приспособление, предназначенное для магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, представлено на рисунке 2.8. Устройство разработано на базе фрезерного станка с числовым программным управлением (ЧПУ) *Emco Concept Mill 250* и представляет собой

магнитопровод постоянного сечения, изготовленный из электротехнической стали 10895 ГОСТ 11036-75.

Конструктивная схема устройства включает в себя две стойки 1, на которых закреплены электромагнитные катушки 2 и сменные полюсные наконечники 3. Данные элементы обеспечивают формирование магнитного поля, необходимого для удержания и равномерного распределения магнитно-абразивного порошка. Для обеспечения надежного крепления конструкции, стойки устанавливаются на плите 4, под которой проложен резиновый лист на рабочем столе станка с ЧПУ. Рабочее пространство магнитно-абразивной установки настраивается посредством стержней магнитопровода, совершаемых внутри корпуса возвратно-поступательные движения на сближение и удаление друг к другу при помощи регулировочных винтов. С целью уменьшения нагрузок на корпуса, располагающиеся внутри электромагнитных катушек, предусмотрены регулируемые полиамидные опоры 5, которые позволяют перераспределить нагрузку с корпуса на основание.

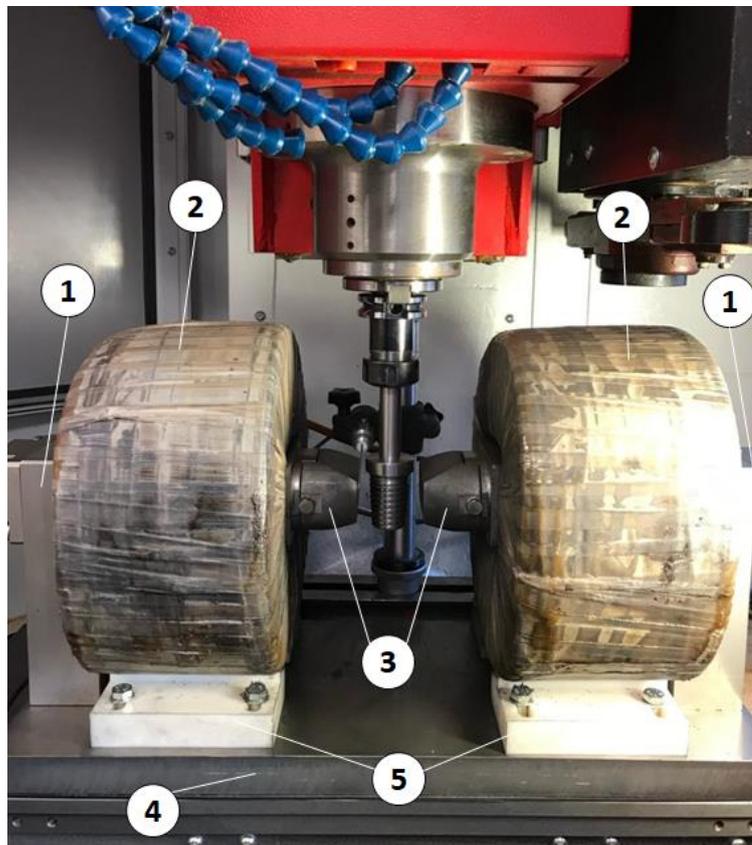


Рисунок 2.8 – Устройство, осуществляющее магнитно-абразивную обработку резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг

Для проведения эксперимента по магнитно-абразивной обработке наружной резьбовой поверхности изготовлены сменные полюсные наконечники с наклонной поверхностью, повторяющей конус наружной резьбы (рисунок 2.9).

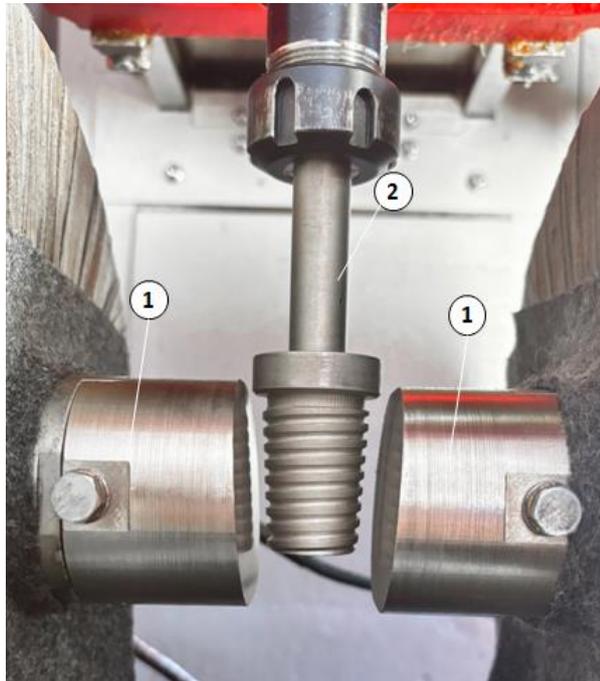


Рисунок 2.9 – Устройство для МАО наружных резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, где: 1 – сменные полюсные наконечники, 2 – обрабатываемый образец

Для проведения эксперимента по магнитно-абразивной обработке внутренней резьбовой поверхности были изготовлены сменные полюсные наконечники с ровной поверхностью и дополнительный конусный наконечник, копирующий конус внутренней резьбы (рисунок 2.10).

На первом этапе эксперимента была разработана ЧПУ-программа, задающая траекторию движения обрабатываемого образца в рабочем пространстве, а также его скоростные параметры.

В процессе обработки образец выполняет осциллирующее, вращательное и возвратно-поступательное движение (в зависимости от конфигурации образца) вдоль магнитных наконечников.

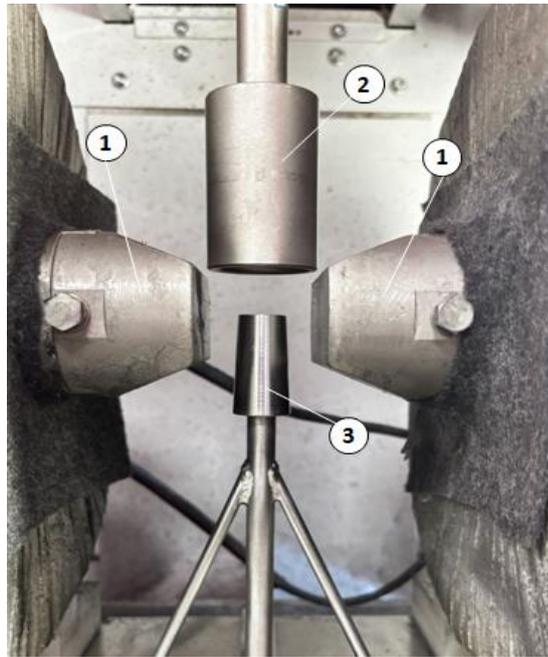
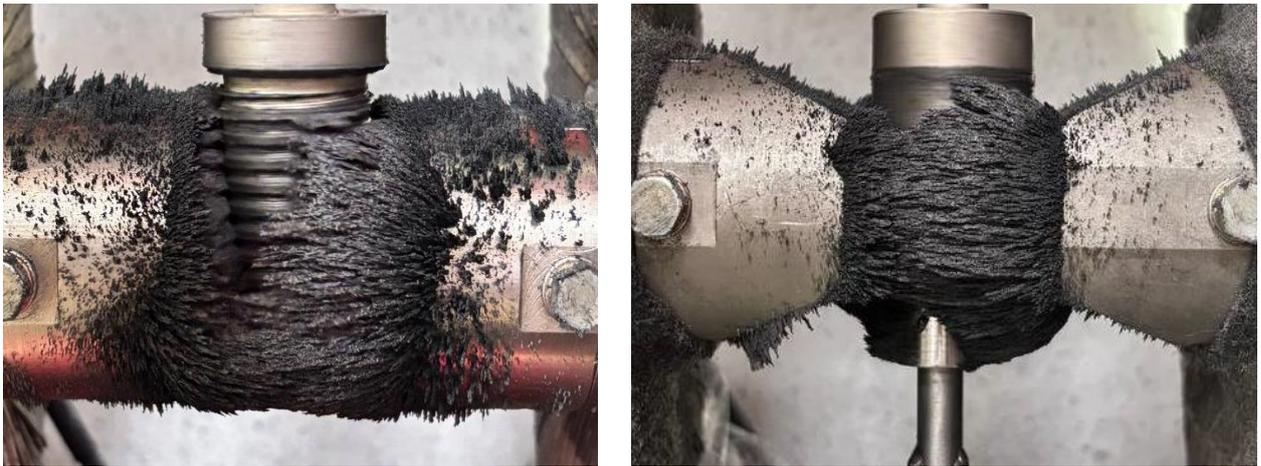


Рисунок 2.10 – Устройство для MAO внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, где: 1 – сменные полюсные наконечники, 2 – обрабатываемый образец, 3 – дополнительный конусный наконечник

Фиксация образца осуществляется с помощью цанговой оправки шпинделя вертикально-фрезерного станка, что гарантирует его надежное удержание и предотвращает смещения в процессе обработки.

Рабочий зазор между полюсными наконечниками и образцом установлен в диапазоне 1,5 – 2 мм.

Перед началом эксперимента проводится тестовый запуск ЧПУ-программы с целью проверки корректности всех заложенных алгоритмов перемещения. После подтверждения работоспособности системы, в рабочий зазор подается магнитная поле с индукцией $B = 0,1$ Тл, а также распределяется магнитно-абразивный порошок на основе сплава карбида титана и железа ($TiC+Fe$). Следующим этапом образец опускается в рабочий зазор, запускается управляющая программа, выполняется процесс магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг (рисунок 2.11).



а)

б)

Рисунок 2.11 – Процесс магнитно-абразивной обработки, где: а) наружной резьбовой поверхности; б) внутренней резьбовой поверхности

Схемы магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, осуществляемые на устройстве для MAO (рисунок 2.8), показаны на рисунках 2.12 и 2.13.

Между полюсными наконечниками, в рабочей зоне L , фиксируют обрабатываемые заготовки, при этом обеспечивают рабочий зазор δ_1 , который заполняют магнитно-абразивным инструментом.

Для обработки внутренней резьбовой поверхности дополнительно размещается конусный наконечник, обеспечивая рабочий зазор δ_2 . Обрабатываемым заготовкам, в соответствии со схемами, задаются вращательное движение n , возвратно-поступательное S и осцилляционное A . Отсутствие возвратно-поступательного движения S для заготовки с внутренней резьбой объясняется невозможностью попадания магнитно-абразивного материала во внутреннюю область заготовки ввиду конфигурации детали.

Время обработки определяется на основе заданных требований к параметрам качества резьбовых поверхностей.

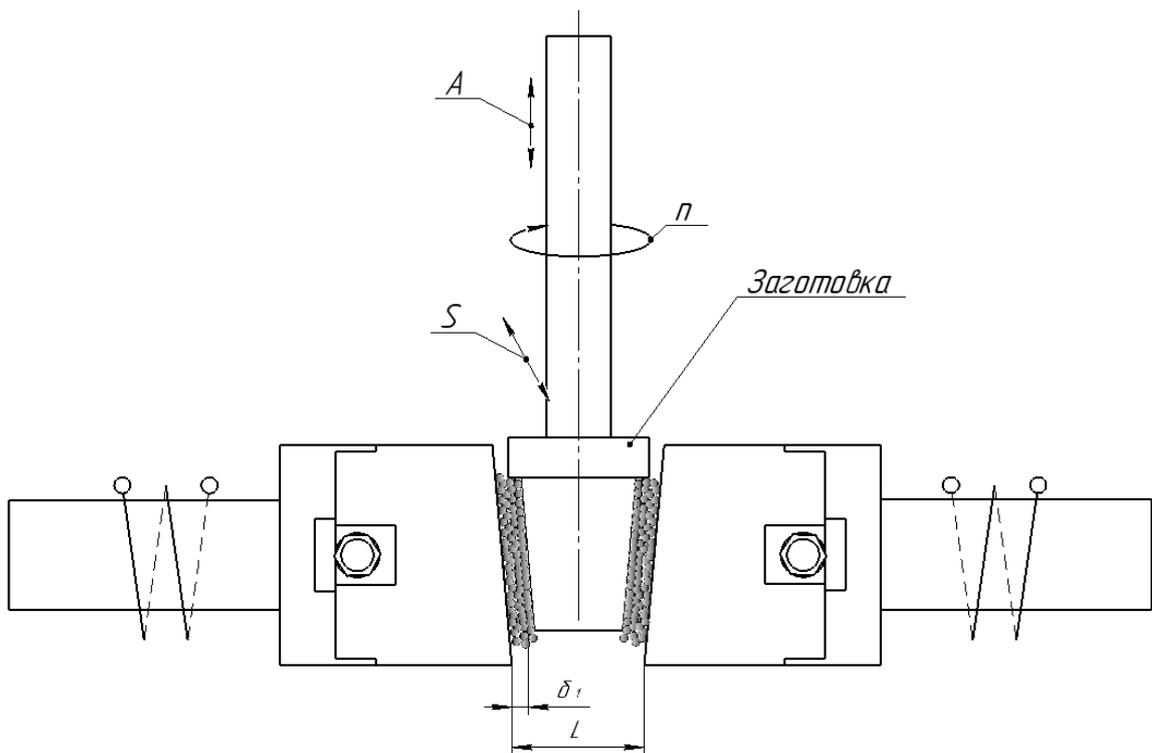


Рисунок 2.12 – Схема обработки наружных резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг посредством магнитно-абразивной обработки

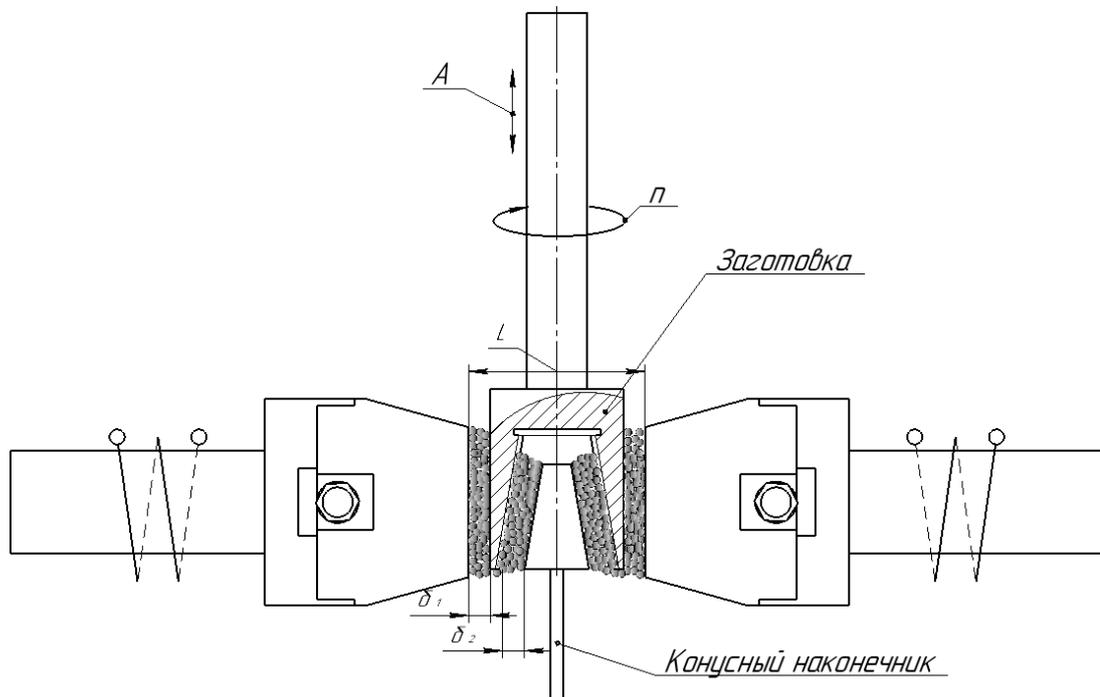


Рисунок 2.13 – Схема обработки внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг посредством магнитно-абразивной обработки

2.5 Диапазоны рабочих движений при магнитно-абразивной обработке

Исследования влияния магнитно-абразивной обработки на качество резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг невозможно без

предварительного определения рациональных диапазонов частоты вращения заготовки, магнитной индукции и времени обработки. Опытным путем был проведен подбор рациональных значений данных факторов, после чего визуально оценивали обработанные поверхности на наличие дефектов на поверхностях.

Исследования осуществляли на заранее изготовленных образцах с наружной и внутренней резьбовой поверхностью из стали 40Х в соответствии с чертежами (Приложение Д). Устройство для магнитно-абразивного полирования показано на рисунке 2.8.

Для обработки наружной резьбовой поверхности были установлены следующие режимные факторы:

- магнитная индукция $B = 0,5 - 1,2$ Тл;
- время обработки $t = 300 - 660$ с,
- рабочий зазор $\delta = 1,5$ мм с каждой стороны.

Для обработки внутренней резьбовой поверхности были установлены следующие режимные факторы:

- магнитная индукция $B = 0,5 - 1,2$ Тл;
- время обработки $t = 300 - 660$ с;
- рабочий зазор $\delta_1 = 1,5$ мм с каждой стороны;
- рабочий зазор $\delta_2 = 1,5$ мм.

В ходе эксперимента варьировали частоту вращения, магнитную индукцию и время обработки, остальные факторы были неизменны. В качестве инструмента использовали порошок на основе сплава карбида титана и железа ($TiC+Fe$) фракцией 160 – 400 мкм в количестве 200 г.

Изначально диапазон частоты вращения образца варьировался $n = 50 - 600$ мин⁻¹. Для установления максимальных крайних значений проводили эксперимент с частотой вращения 600 мин⁻¹. В результате установления максимального значения частоты вращения было обнаружено, что удержание магнитно-абразивного инструмента снижается и происходит выталкивание порошка из зоны обработки, после чего он оседает на нерабочих поверхностях полюсных наконечников. По результатам проведенных экспериментальных исследований принято решение

установить значение частоты вращения заготовки – не более 500 мин^{-1} , а именно: рекомендованный для дальнейших исследований в 3 главе диапазон значений частоты вращения заготовок составляет $n = 100 - 450 \text{ мин}^{-1}$, при этом при обработке внутренней резьбовой поверхности следует установить значение частоты вращения меньше, чем при обработке наружной резьбовой поверхности, ввиду сложности удержания магнитно-абразивного инструмента внутри обрабатываемого образца при высоких значениях частоты вращения.

Исследования показали, что при магнитной индукции 0,5 Тл интенсивность съема дефектного поверхностного слоя с резьбовой поверхности оказывается недостаточной. Однако чрезмерное увеличение магнитной индукции до 1,2 Тл приводит к механическим деформациям заготовок, что вызывает потерю точности формы, ухудшение качества поверхности и снижение точности обработки. На основании проведенных исследований установлено, что рациональным диапазоном магнитной индукции для обработки резьбовых поверхностей, применяемый для дальнейших исследований в 3 главе, составляет $B = 0,8 - 1,0 \text{ Тл}$.

При оценке влияния времени обработки на шероховатость резьбовой поверхности установлено, что основное удаление микронеровностей происходит после 300 с обработки. Принимать время обработки более 700 с не целесообразно, так как повышение времени обработки приводит к снижению интенсивности съема материала.

Таким образом, установлено, что рациональным диапазоном времени обработки резьбовых поверхностей составляет $t = 360 - 600 \text{ с}$, при этом при обработке внутренней резьбовой поверхности следует установить значение времени обработки больше, чем при обработке наружной резьбовой поверхности, ввиду сложности доступа магнитно-абразивного порошка во внутреннее пространство внутренней резьбовой поверхности.

При помощи оптического контроля и измерения твердости резьбовой поверхности, была проведена оценка эффективности применения способа магнитно-абразивной обработки.

Фотографии оптического контроля резьбовых поверхностей замковых соединений, полученные при помощи микроскопа *Leica DM ILM HC*, представлены на рисунках 2.14 и 2.15, результаты твердости, полученные при помощи твердомера *Константа ТУ* – на рисунке 2.16.

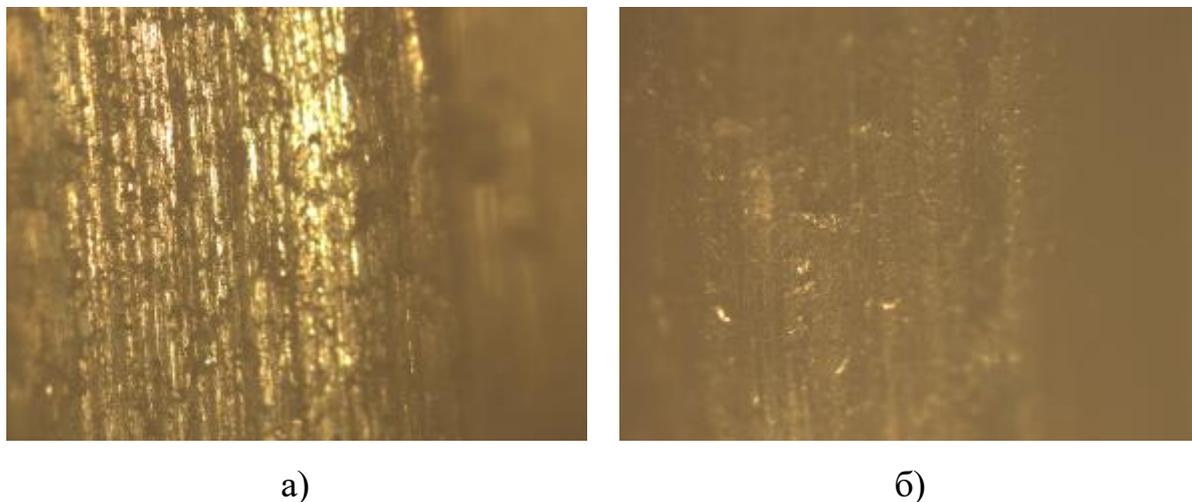


Рисунок 2.14 – Фотографии наружных резьбовых поверхностей замкового соединения, где: а) резьбовая поверхность до MAO; б) резьбовая поверхность после MAO

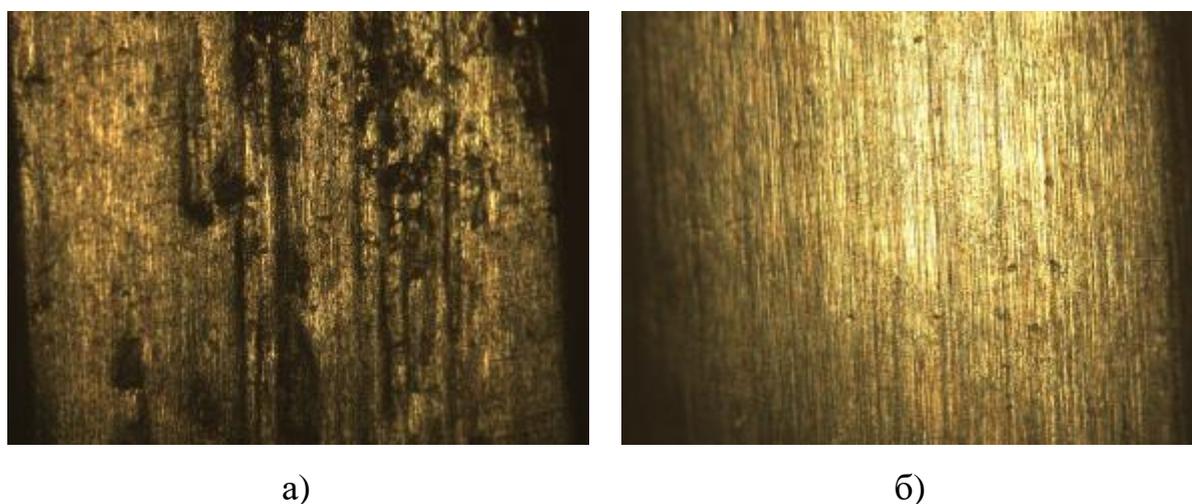


Рисунок 2.15 – Фотографии внутренних резьбовых поверхностей замкового соединения, где: а) резьбовая поверхность до MAO; б) резьбовая поверхность после MAO

Из полученных фотографий резьбовых поверхностей видно, что поверхность становится заметно лучше, наблюдается заметное сглаживание поверхности, частичное удаление следов предыдущей технологической операции, формирующей

заготовку. Также заметно наблюдается снижение количества царапин и других дефектов поверхности резьбы.

Твердость до магнитно-абразивного воздействия на резьбовую поверхность варьировалась в диапазоне 320 ... 350 *HV* (рисунок 2.16, а). После применение магнитно-абразивной обработки результаты твердости на резьбовой поверхности варьировались в диапазоне 980 ... 990 *HV* (рисунок 2.16, б).

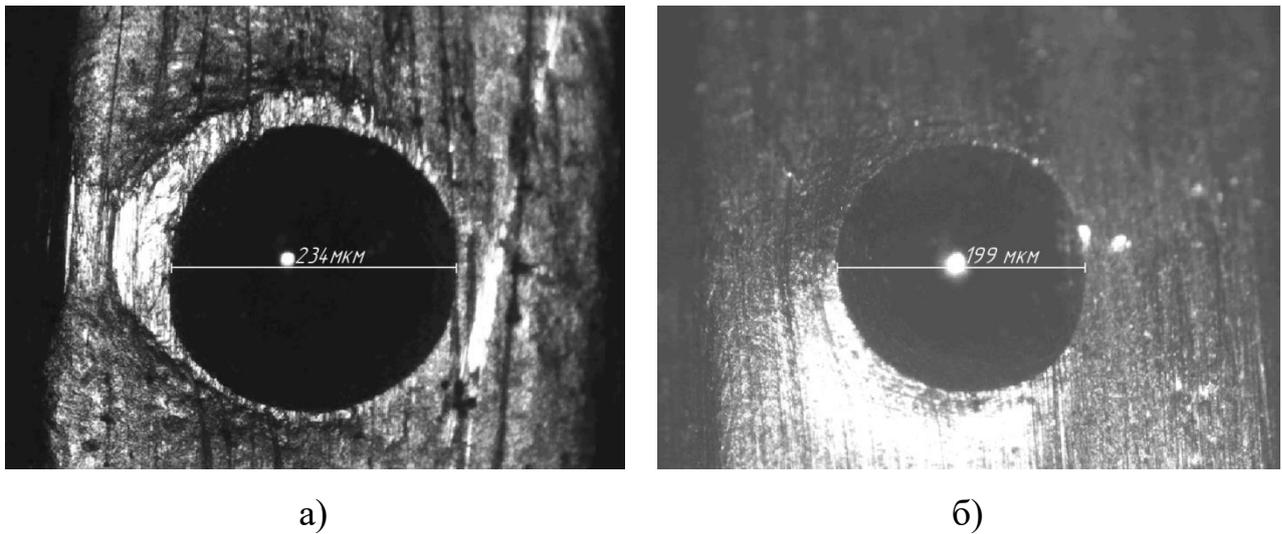


Рисунок 2.16 – Фотографии резьбовых поверхностей замкового соединения, где: а) наружная резьбовая поверхность до МАО; б) наружная резьбовая поверхность после МАО

В результате анализа полученных результатов измерения твердости резьбовой поверхности, обработанной согласно предложенному способу МАО, можно сделать вывод о повышении твердости поверхности.

2.6 Выводы по второй главе

В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Предложен способ МАО замковых соединений буровых штанг, включающий определенное сочетание вращательного, осцилляционного и возвратно-поступательного движений, позволяющий обеспечить снижение шероховатости и увеличение площади контакта витков резьбового соединения, удаление дефектного слоя, образованного на предшествовавшей операции, и формирования нового – упрочненного, и, как следствие, повышение усталостной прочности и износостойкости резьбового соединения.

2. В результате серии предварительных экспериментальных исследований определены диапазоны варьируемых режимных факторов обработки, а также установлены значения статических факторов. В качестве магнитно-абразивного материала выбран порошок на основе сплава карбида титана и железа ($TiC+Fe$), фракция $\Delta = 160 - 400$ мкм.

3. Принят диапазон магнитной индукции B для экспериментальных исследований от 0,8 Тл до 1,0 Тл, диапазон времени обработки от 360 с до 600 с, диапазон частоты вращения заготовки в соответствии с режимами работы фрезерного станка с ЧПУ $n = 100 - 450$ мин⁻¹.

ГЛАВА 3 МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ

Технология магнитно-абразивной обработки характеризуется значительными преимуществами, позволяя минимизировать критические нагрузки и температуры в зоне микрорезания. Это обеспечивается благодаря высокой гибкости абразивных частиц, которые не зафиксированы жестко в связке, что позволяет значительно снизить износ магнитно-абразивного порошка. Как результат, контактная температура снижается, так как устраняется трение между затупившейся связкой и обрабатываемой поверхностью, что ведет к улучшению эффективности процесса. Кроме того, MAO способствует повышению точности геометрических параметров и формы обработанных поверхностей, снижению их шероховатости и значительному увеличению физико-механических свойств поверхностного слоя материала. Данный процесс напрямую влияет на эксплуатационные свойства изделия, обеспечивая его долговечность и износостойкость.

Развитие и дальнейшее применение технологии MAO требует решения ряда важных задач:

- обеспечение качества резьбовой поверхности замковых соединений путем уменьшения шероховатости;
- очистка резьбовых поверхностей от остаточных загрязнений и заусенцев, образованных предшествующей обработкой.

Достижение требуемого качества (показателей шероховатости, твердости) при рациональных режимных факторах процесса MAO должно основываться на понимании ключевых закономерностей изменения значений варьируемых факторов в зависимости от условий обработки. Исходя из этого, основной задачей данной главы является:

- установление зависимостей влияния режимных факторов процесса MAO на шероховатость, твердость наружной и внутренней резьбовой поверхности буровой штанги.

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования магнитно-абразивного воздействия на резьбовые поверхности буровых штанг осуществляли в лаборатории станков с ЧПУ Санкт-Петербургского горного университета. На кафедре машиностроения исследования производили на специально разработанной и изготовленной установке. Для реализации процесса MAO устройство (рисунок 2.8) базировали на фрезерном станке с ЧПУ, обеспечивающим выполнение всех необходимых рабочих движений.

В качестве образцов для обработки использовали детали из конструкционной легированной стали 40X (технологическая карта изготовления и чертежи образцов представлены в Приложениях Г, Д). Магнитно-абразивный порошок, состоящий из сплава карбида титана и железа ($TiC+Fe$), был выбран в качестве инструмента. Химический состав стали марки 40X представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав стали 40X

Марка стали	Содержание элементов, %							
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
40X	0,38	0,25	0,61	0,84	0,21	0,21	0,025	0,025

Приняты следующие варьируемые режимные факторы процесса MAO:

- для наружной резьбовой поверхности: частота вращения $n = 150...450 \text{ мин}^{-1}$; магнитная индукция $B = 0,8...1,0 \text{ Тл}$; время обработки $t = 360...540 \text{ с}$;
- для внутренней резьбовой поверхности: частота вращения $n = 100...400 \text{ мин}^{-1}$; магнитная индукция $B = 0,8...1,0 \text{ Тл}$; время обработки $t = 480...600 \text{ с}$.

Контроль шероховатости резьбовых поверхностей проводили при помощи прибора для измерений параметров контура и шероховатости поверхности *Waveline W920RC* (рисунок 3.1).

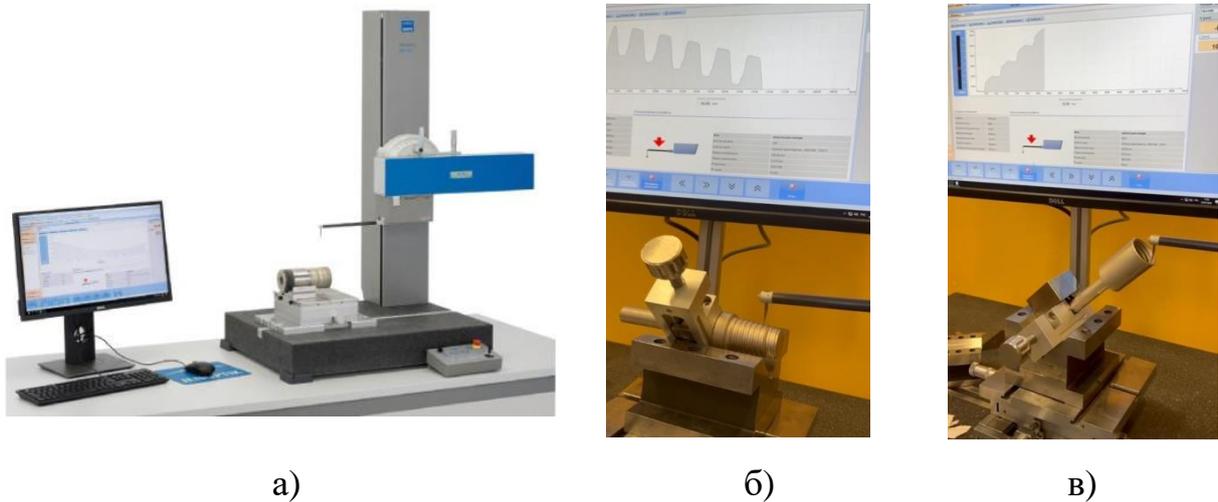


Рисунок 3.1– Измерение параметров контура и шероховатости поверхности, где а) прибор *Waveline W920RC*; б) процесс измерения наружной резьбовой поверхности; в) процесс измерения внутренней резьбовой поверхности.

Измерительный микроскоп *Leica DM ILM HC* (рисунок 3.2) служил для визуального контроля резьбовых поверхностей образца.



Рисунок 3.2 – Микроскоп *Leica DM ILM HC*

Измерение твердости проводили при помощи твердомера *Константа ТУ* (рисунок 3.3) с нагрузкой $P = 50$ Н.



а)



б)



в)

Рисунок 3.3 – Измерение твердости резьбовой поверхности, где а) твердомер *Константа TV*; б) процесс измерения наружной резьбовой поверхности; в) процесс измерения внутренней резьбовой поверхности

Для проведения исследования было применено планирование эксперимента, которое позволяет назначить критерии формирования линейной и степенной математической модели технологических процессов, а также оценить ее соответствие адекватности.

Данный метод был выбран в связи с многофакторностью эксперимента (при значении факторов > 2). В ходе исследования применен алгоритм двухуровневого планирования, когда принятые значения режимных параметров задаются максимальным (по верхнему уровню) и минимальным (по нижнему уровню). Промежуточные значения параметров в эксперименте учитывали, однако при построении модели не были использованы. Число повторений каждого опыта составляло – 3.

Изменяемыми параметрами режимных факторов обработки являлись:

- магнитная индукция B , Тл;
- время обработки t , с,

- частота вращения образца n , мин^{-1} .

Измеряемыми параметрами в опытах являлись:

- шероховатость Ra , мкм;

- твердость, HV , наружных и внутренних резьбовых поверхностей изделий.

Процесс магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей можно описать с помощью математической модели, представленной уравнениями [17]

(3.1) – (3.2):

$$Ra = C_1 \cdot B^{\alpha_1} \cdot t^{\alpha_2} \cdot n^{\alpha_3} \quad (3.1)$$

$$HV = C_2 \cdot B^{\beta_1} \cdot t^{\beta_2} \cdot n^{\beta_3}, \quad (3.2)$$

где $C_1, C_2, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$, – параметры исследуемых моделей.

С помощью операции логарифмирования преобразовали уравнения (3.1) – (3.2) к линейному виду (3.3) – (3.4):

$$\ln Ra = \ln C_1 + \alpha_1 \ln B + \alpha_2 \ln t + \alpha_3 \ln n, \quad (3.3)$$

$$\ln HV = \ln C_2 + \beta_1 \ln B + \beta_2 \ln t + \beta_3 \ln n, \quad (3.4)$$

Примем $\ln Ra = y_{Ra}$, $\ln HV = y_{Hv}$, $\ln C_1 = b_0$, $\ln C_2 = k_0$, $\alpha_1 = b_1$, $\beta_1 = k_1$, $\alpha_2 = b_2$, $\beta_2 = k_2$, $\alpha_3 = b_3$, $\beta_3 = k_3$, $\ln B = x_1$, $\ln t = x_2$, $\ln n = x_3$, следовательно, уравнения 3.3 – 3.4 будут следующими (3.5 – 3.6):

$$y_{Ra} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (3.5)$$

$$y_{Hv} = k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \quad (3.6)$$

Для решения уравнений 3.5 – 3.6 с использованием метода наименьших квадратов необходимо определить коэффициенты $b_0, k_0 \dots b_3, k_3$. При этом варьируемые факторы $x_1 \dots x_3$ принимают кодированные значения.

Уравнения преобразования применяли для выполнения кодирования переменных (3.7) – (3.9):

$$x_1 = \frac{2 \cdot (\ln B - \ln B_{max})}{\ln B_{max} - \ln B_{min}} + 1, \quad (3.7)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot (\ln t - \ln t_{max})}{\ln t_{max} - \ln t_{min}} + 1, \quad (3.8)$$

$$x_3 = \frac{2 \cdot (\ln n - \ln n_{max})}{\ln n_{max} - \ln n_{min}} + 1, \quad (3.9)$$

Для наружной резьбовой поверхности кодированные значения факторов, рассчитанные по уравнениям (3.7) – (3.9) выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned}x_1 &= 8,96 \cdot \ln B + 1, \\x_2 &= 4,93 \cdot \ln t - 30,03, \\x_3 &= 1,82 \cdot \ln n - 10,12.\end{aligned}$$

Для внутренней резьбовой поверхности кодированные значения факторов, рассчитанные по уравнениям (3.7) – (3.9) выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned}x_1 &= 8,96 \cdot \ln B + 1, \\x_2 &= 8,96 \cdot \ln t - 56,33, \\x_3 &= 1,44 \cdot \ln n - 7,64.\end{aligned}$$

Выполняется полнофакторный эксперимент 2^3 , предназначенный для вычисления коэффициентов уравнений (3.5) – (3.6). Результаты эксперимента представлены в виде матрицы планирования в таблицах 3.2 и 3.3, соответствующих обработке наружной и внутренней резьбы.

Таблица 3.2 – Матрица полнофакторного эксперимента по магнитно-абразивной обработке наружных резьбовых поверхностей

№ опыта	№ образца	Натуральные значения факторов			Кодовые значения факторов			
		B , Тл	t , с	n , мин ⁻¹	x_0	x_1	x_2	x_3
1	1, 11, 17	1,0	540	450	+1	+1	+1	+1
2	6, 16, 22	0,8	540	450	+1	-1	+1	+1
3	2, 10, 18	1,0	360	450	+1	+1	-1	+1
4	5, 15, 23	0,8	360	450	+1	-1	-1	+1
5	3, 12, 19	1,0	540	150	+1	+1	+1	-1
6	4, 13, 20	0,8	540	150	+1	-1	+1	-1
7	7, 9, 24	1,0	360	150	+1	+1	-1	-1
8	8, 14, 21	0,8	360	150	+1	-1	-1	-1

Таблица 3.3 – Матрица полнофакторного эксперимента по магнитно-абразивной обработке внутренних резьбовых поверхностей

№ опыта	№ образца	Натуральные значения факторов			Кодовые значения факторов			
		V , Гл	t , с	n , мин ⁻¹	x_0	x_1	x_2	x_3
1	1, 11, 17	1,0	600	400	+1	+1	+1	+1
2	6, 16, 22	0,8	600	400	+1	-1	+1	+1
3	2, 10, 18	1,0	480	400	+1	+1	-1	+1
4	5, 15, 23	0,8	480	400	+1	-1	-1	+1
5	3, 12, 19	1,0	600	100	+1	+1	+1	-1
6	4, 13, 20	0,8	600	100	+1	-1	+1	-1
7	7, 9, 24	1,0	480	100	+1	+1	-1	-1
8	8, 14, 21	0,8	480	100	+1	-1	-1	-1

Фактор $x_0 = +1$ приводится для коэффициента b_0 . (таблицы 3.2, 3.3).

По итогам проведенных опытов формировали таблицу с полученными значениями, которые обрабатывают в следующем порядке:

1. Для каждой строки матрицы планирования вычисляли среднее арифметическое значение \bar{y}_j выходного параметра, используя результаты n параллельных опытов ($n=3$) (3.10):

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju} \quad (3.10)$$

где y_{ju} – значение выходного параметра в u – ом параллельном опыте j – й строки матрицы; u – номер параллельного опыта; n – количество параллельных опытов.

2. В каждой строке матрицы планирования вычисляли построчную дисперсию S_j^2 по результатам n параллельных опытов с целью оценки отклонений значений экспериментов выходного параметра от его среднего значения (3.11):

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2 \quad (3.11)$$

3. При наличии дублирующих опытов проводили проверку гипотезы об однородности дисперсий с использованием G – критерия Кохрена [17]. Данный критерий определяется как отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий (3.12):

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}. \quad (3.12)$$

Полученное значение критерия (расчетное) сравнивали с табличным $G_{\text{табл}}$ [17], определяемым уровне значимости 5% значению сравниваемых дисперсий $N = 8$, а также числу степеней свободы $f = n - 1$ ($f = 2$).

При $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ дисперсии считают однородными, и исследуемые значения подчиняются нормальному закону.

4. По ниже представленному выражению определяли дисперсию воспроизводимости эксперимента (3.13):

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_j^2, \quad (3.13)$$

где N – количество строк матрицы планирования.

5. Устанавливали коэффициенты уравнений регрессии (3.5) – (3.6), применяя метод наименьших квадратов [40], по формулам (3.14) – (3.17):

$$b_0, k_0 = \frac{1}{N} \sum_1^N y_j, \quad (3.14)$$

$$b_1, k_1 = \frac{1}{N} \sum_1^N y_j \cdot x_1, \quad (3.15)$$

$$b_2, k_2 = \frac{1}{N} \sum_1^N y_j \cdot x_2, \quad (3.16)$$

$$b_3, k_3 = \frac{1}{N} \sum_1^N y_j \cdot x_3, \quad (3.17)$$

где x_i – кодированное значение фактора (из уравнений 3.7 – 3.9); y_j – логарифм рассчитанного значения выходного параметра в j – ом опыте эксперимента из $N = 8$ опытов.

Для определения уравнения регрессии подставляли установленные коэффициенты в формулы (3.5) – (3.6).

6. Дисперсию коэффициентов регрессии устанавливали с целью получения статистической оценки значимости коэффициентов (3.18):

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{nN}. \quad (3.18)$$

7. Определяли значение доверительного интервала коэффициента регрессии (3.19):

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha; f_1} S_{b_i}, \quad (3.19)$$

где $t_{\alpha; f_1}$ – величина критерия Стьюдента, зависящая от числа степеней свободы f_1 при определении дисперсии S_y^2 и от уровня значимости α (установлено 5%); при одинаковом дублировании опытов $f_1 = N(n-1)$; S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка в установке коэффициента регрессии.

8. Для оценки значимости коэффициентов регрессии каждый коэффициент сравнивали с доверительным интервалом. Если величина доверительного интервала не больше коэффициента, то он считается значимым и остается в модели.

9. Для проверки соответствия математической модели экспериментальным данным вычисляли дисперсию адекватности [17] (3.20):

$$S_{ад}^2 = \frac{n}{N - k} \sum_j^N (y_{j_{расч}} - \bar{y}_{j_{эксп}})^2, \quad (3.20)$$

где k – кол-во коэффициентов регрессионного уравнения, $\bar{y}_{j_{эксп}}$ – среднеарифметическое значение выходного параметра по итогам эксперимента; $y_{j_{расч}}$ – значение выходного параметра, рассчитанное по модели для условий j – го опыта;

10. После вычисления дисперсии адекватности проводили проверку соответствия модели экспериментальным данным с использованием F – критерия Фишера (3.21):

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}. \quad (3.21)$$

Если $F_p < F_T$, то модель считают адекватной.

После проверки адекватности, уравнение регрессии, полученное в кодированных данных, переводили в исходные величины с использованием уравнений (3.7) – (3.9).

3.2 Влияние режимных факторов магнитно-абразивной обработки на параметры качества наружных и внутренних резьбовых поверхностей буровых штанг

3.2.1 Шероховатость наружных и внутренних резьбовых поверхностей

В процессе бурения важным фактором в обеспечении прочности резьбового соединения является финишная обработка резьбовых поверхностей. Одним из основных критериев оценки качества обработанной поверхности является шероховатость.

Шероховатость резьбовых поверхностей буровых штанг позволяет определить качество обработки и эффективность применения магнитно-абразивной обработки для обеспечения прочности резьбового соединения.

В ходе проведенных опытов во 2 главе, направленных на анализ влияния режимных факторов обработки на значение шероховатости резьбовых поверхностей буровых штанг, был определен диапазон значений. Данные значения впоследствии подвергались логарифмированию, после чего вычисляли среднее арифметическое значение по формуле (3.10). Дополнительно для каждого проведенного эксперимента рассчитывали построчную дисперсию S_j^2 согласно выражению (3.11). Результаты опытов, включая вычисленные дисперсии, показаны в таблице 3.4 для наружной резьбовой поверхности.

Таблица 3.4 – Результаты экспериментов и расчета дисперсий опытов для наружной резьбовой поверхности

Номер опыта N	Номер параллельного опыта u	Шероховатость поверхности Ra , мкм	$y_{Ra} = \ln Ra$	\bar{y}_{Ra}	S_j^2
1	1	1,144	0,135	0,134	0,0014
	2	1,102	0,097		
	3	1,187	0,171		
2	1	0,912	-0,092	-0,047	0,0020
	2	0,954	-0,047		
	3	0,997	-0,003		
3	1	1,352	0,302	0,303	0,0007
	2	1,391	0,330		
	3	1,318	0,276		

Продолжение таблицы 3.4

4	1	1,245	0,219	0,221	0,0013
	2	1,204	0,186		
	3	1,294	0,258		
5	1	0,599	-0,512	-0,589	0,0063
	2	0,511	-0,671		
	3	0,558	-0,583		
6	1	0,507	-0,679	-0,706	0,0011
	2	0,476	-0,742		
	3	0,499	-0,695		
7	1	0,709	-0,344	-0,289	0,0036
	2	0,742	-0,298		
	3	0,798	-0,226		
8	1	0,607	-0,499	-0,426	0,0047
	2	0,659	-0,417		
	3	0,696	-0,362		

По формуле (3.10) определяли значение критерия Кохрена с целью проверки однородности ряда построчных дисперсий:

$$\sum_{j=1}^N s_j^2 = 0,021; S_{max}^2 = 0,0063.$$

Таким образом:

$$G_{расч} = \frac{0,0063}{0,021} = 0,3.$$

Уровень значимости составлял $\alpha = 0,05$, число экспериментов $N = 8$, значение степеней свободы $f = 2$, следовательно величина G – критерия [40]: $G_{0,05; 2; 8}^{табл} = 0,516$. Ряд дисперсий считается однородным, ввиду соблюдения условия $G^{расч} = 0,3 < 0,516 = G_{0,05; 2; 8}^{табл}$. Далее определяли дисперсию опыта, применив формулы (3.11) $S_y^2 = \frac{0,021}{8} = 0,003$ и значение степеней свободы $f_l = N(n-1) = 8(3-1) = 16$.

Через уравнение (3.5) находили значение шероховатости резьбовых поверхностей, зависящее от выбранных факторов:

$$y_{Ra} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

С помощью матрицы планирования 2^3 (таблица 3.5) находили коэффициенты уравнения регрессии (для наружной резьбовой поверхности) по уравнениям (3.14) – (3.17).

Таблица 3.5 – Матрица плана 2^3

№ опыта	Кодовые значения факторов				\bar{y}_{Ra}
	x_0	x_1	x_2	x_3	
1	+1	+1	+1	+1	0,134
2	+1	-1	+1	+1	-0,047
3	+1	+1	-1	+1	0,303
4	+1	-1	-1	+1	0,221
5	+1	+1	+1	-1	-0,589
6	+1	-1	+1	-1	-0,706
7	+1	+1	-1	-1	-0,289
8	+1	-1	-1	-1	-0,426

Находили уравнение регрессии, вычислив коэффициенты и подставив их в уравнение (3.5) (3.22):

$$y_{Ra} = -0,17 + 0,06 \cdot x_1 - 0,13 \cdot x_2 + 0,33 \cdot x_3. \quad (3.22)$$

Используя выражение (3.18) рассчитывали дисперсии коэффициентов регрессии с целью проведения статистической оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии:

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,003}{3 \cdot 8} = 0,0001.$$

Таким образом, среднеквадратичная ошибка $S_{b_i} = 0,011$.

Используя выражение (3.19) рассчитали доверительный интервал коэффициентов регрессии, установив уровень значимости $\alpha = 0,05$, число свободы $f_l = N(n-1) = 16$ и выбрав значение t -критерия $t_{0,05;16}$ по таблице[40]:

$$\Delta_{b_i} = 2,12 \cdot 0,011 = 0,02.$$

Коэффициенты уравнения регрессии считают статистически значимыми, если их абсолютное значение равно доверительному интервалу или превышает его. В данном исследовании все коэффициенты уравнения регрессии удовлетворяют этому условию.

Далее, для оценки адекватности модели, вычисляли расчетные значения отклика, используя выражение (3.22). Важно учитывать, что все переменные x_i в указанном выражении представлены в кодированном виде. К примеру, для 2-ого опыта (см. таблицу 3.5), где факторы принимают значения $x_1 = -1$, $x_2 = +1$, $x_3 = +1$,

расчетное значение шероховатости резьбовой поверхности определяется выражением:

$$y_{Ra(2)} = -0,17 - 0,06 - 0,13 + 0,33 = -0,038.$$

Для вычисления дисперсии адекватности использовали данные из таблицы 3.6, где представлены рассчитанные значения шероховатости. Формула для вычисления дисперсии адекватности (3.20): $S_{ад}^2 = \frac{3 \cdot 0,005}{4} = 0,004$.

Таблица 3.6 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

№ опыта	$\bar{y}_{Ra_{эксп}}$	$\bar{R}_{a_{эксп}}$, мкм	$y_{Ra_{расч}}$	$R_{a_{расч}}$, мкм	$ \Delta y_{Ra} $	Δy_{Ra}^2
1	0,134	1,144	0,090	1,095	0,044	0,002
2	-0,047	0,954	-0,038	0,962	0,008	0,0001
3	0,303	1,354	0,344	1,411	0,041	0,002
4	0,221	1,247	0,215	1,239	0,006	0,00003
5	-0,589	0,556	-0,565	0,568	0,024	0,0006
6	-0,706	0,494	-0,694	0,499	0,012	0,0001
7	-0,289	0,749	-0,311	0,732	0,022	0,0005
8	-0,426	0,654	-0,440	0,644	0,014	0,0002
Σ						0,0052

Проверку гипотезы об адекватности модели (3.22) осуществляли посредством применения F – критерия Фишера. Расчетное значение этого критерия определяли по формуле (3.21): $F_{4; 16}^{расч} = \frac{0,004}{0,003} = 1,33$.

Значение F – критерия по таблице при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $F_{0,05; 4, 16}^{табл} = 3,06$. Ввиду того, что выполняется условие $F^{расч} < F^{табл}$, математическую модель параметра y_{Ra} считали адекватной.

После подтверждения адекватности модели была выполнена процедура раскодирования и потенцирования выражения (3.22). Получена математическая модель, описывающая зависимость величины шероховатости наружных резьбовых поверхностей изделия от параметров магнитной индукции, времени обработки и частоты вращения заготовки (3.23):

$$Ra = 1,47 \cdot B^{0,58} \cdot t^{-0,63} \cdot n^{0,59} \quad (3.23)$$

На основе выполненных опытов построены зависимости, иллюстрирующие влияние режимных факторов магнитно-абразивной обработки на значение шероховатости наружных резьбовых поверхностей изделия (рисунок 3.4).

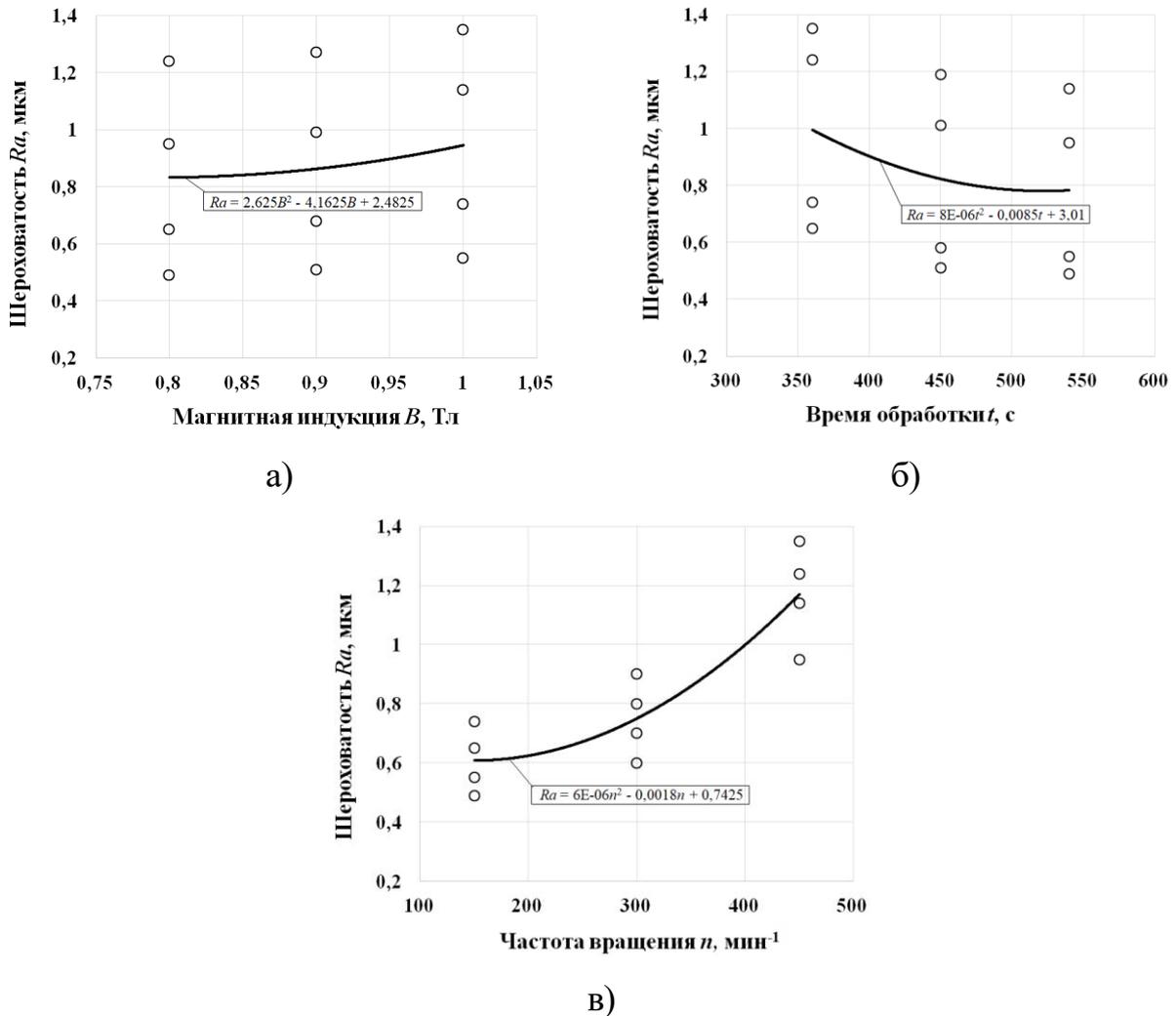


Рисунок 3.4 – Зависимость шероховатости наружной резьбовой поверхности от:

а) магнитной индукции; б) времени обработки, в) частоты вращения

Результаты опытов, включая вычисленные дисперсии, показаны в таблице 3.7 для внутренней резьбовой поверхности.

Таблица 3.7 – Результаты экспериментов и расчета дисперсий опытов для внутренней резьбовой поверхности

Номер опыта N	Номер параллельного опыта u	Шероховатость поверхности Ra , мкм	$y_{Ra} = \ln Ra$	\bar{y}_{Ra}	S_j^2
1	1	1,245	0,219	0,219	0,001
	2	1,288	0,253		
	3	1,203	0,185		

Продолжение таблицы 3.7

2	1	1,098	0,093	0,053	0,002
	2	1,013	0,013		
	3	1,055	0,054		
3	1	1,492	0,400	0,375	0,001
	2	1,419	0,350		
	3	1,453	0,374		
4	1	1,305	0,266	0,299	0,001
	2	1,395	0,333		
	3	1,346	0,297		
5	1	0,659	-0,417	-0,421	0,005
	2	0,612	-0,491		
	3	0,701	-0,355		
6	1	0,508	-0,677	-0,615	0,004
	2	0,577	-0,549		
	3	0,539	-0,618		
7	1	0,843	-0,171	-0,162	0,003
	2	0,899	-0,107		
	3	0,811	-0,209		
8	1	0,762	-0,272	-0,281	0,004
	2	0,797	-0,226		
	3	0,708	-0,345		

По формуле (3.10) определяли значение критерия Кохрена с целью проверки однородности ряда построчных дисперсий:

$$\sum_{j=1}^N s_j^2 = 0,02; S_{max}^2 = 0,005.$$

Таким образом:

$$G_{расч} = \frac{0,005}{0,02} = 0,237.$$

Уровень значимости составлял $\alpha = 0,05$, число экспериментов $N = 8$, значение степеней свободы $f = 2$, следовательно величина G – критерия [40]: $G_{0,05; 2; 8}^{табл} = 0,516$. Ряд дисперсий считается однородным, ввиду соблюдения условия $G_{расч} = 0,237 < 0,516 = G_{0,05; 2; 8}^{табл}$. Далее определяли дисперсию опыта, применив формулы (3.11) $S_y^2 = \frac{0,02}{8} = 0,002$ и значение степеней свободы $f_l = N(n-1) = 8(3-1) = 16$.

Через уравнение (3.5) находили значение шероховатости резьбовых поверхностей, зависящее от выбранных факторов:

$$y_{Ra} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

С помощью матрицы планирования 2^3 (таблица 3.8) находили коэффициенты уравнения регрессии (для внутренней резьбовой поверхности) по уравнениям (3.14) – (3.17).

Таблица 3.8 – Матрица плана 2^3

№ опыта	Кодовые значения факторов				\bar{y}_{Ra}
	x_0	x_1	x_2	x_3	
1	+1	+1	+1	+1	0,219
2	+1	-1	+1	+1	0,053
3	+1	+1	-1	+1	0,375
4	+1	-1	-1	+1	0,299
5	+1	+1	+1	-1	-0,421
6	+1	-1	+1	-1	-0,615
7	+1	+1	-1	-1	-0,162
8	+1	-1	-1	-1	-0,281

Находили уравнение регрессии, вычислив коэффициенты и подставив их в уравнение (3.5) (3.24):

$$y_{Ra} = -0,07 + 0,069 \cdot x_1 - 0,124 \cdot x_2 + 0,303 \cdot x_3. \quad (3.24)$$

Используя выражение (3.18) рассчитывали дисперсии коэффициентов регрессии с целью проведения статистической оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии:

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,02}{3 \cdot 8} = 0,0001.$$

Таким образом, среднеквадратичная ошибка $S_{b_i} = 0,01$.

Используя выражение (3.19) рассчитали доверительный интервал коэффициентов регрессии, установив уровень значимости $\alpha = 0,05$, число свободы $f_i = N(n-1) = 16$ и выбрав значение t -критерия $t_{0,05;16}$ по таблице[40]:

$$\Delta_{b_i} = 2,12 \cdot 0,01 = 0,02.$$

Коэффициенты уравнения регрессии считают статистически значимыми, если их абсолютное значение равно доверительному интервалу или превышает его. В данном исследовании все коэффициенты уравнения регрессии удовлетворяют этому условию.

Далее, для оценки адекватности модели, вычисляли расчетные значения отклика, используя выражение (3.24). Важно учитывать, что все переменные x_i в указанном выражении представлены в кодированном виде. К примеру, для 2-ого опыта (см. таблицу 3.8), где факторы принимают значения $x_1 = -1$, $x_2 = +1$, $x_3 = +1$, расчетное значение шероховатости резьбовой поверхности определяется выражением:

$$y_{Ra(2)} = -0,07 - 0,069 - 0,124 + 0,303 = 0,043.$$

Для вычисления дисперсии адекватности использовали данные из таблицы 3.9, где представлены рассчитанные значения шероховатости. Формула для вычисления дисперсии адекватности (3.20): $S_{ад}^2 = \frac{3 \cdot 0,09}{4} = 0,006$.

Таблица 3.9 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

№ опыта	$\bar{y}_{Ra_{эксп}}$	$\bar{R}_{a_{эксп}}$, мкм	$y_{Ra_{расч}}$	$R_{a_{расч}}$, мкм	$ \Delta y_{Ra} $	Δy_{Ra}^2
1	0,219	1,245	0,182	1,199	0,037	0,001
2	0,053	1,055	0,043	1,044	0,01	0,0001
3	0,375	1,455	0,429	1,537	0,055	0,003
4	0,299	1,349	0,291	1,338	0,007	0,0001
5	-0,421	0,657	-0,429	0,654	0,004	0,00001
6	-0,615	0,541	-0,564	0,569	0,05	0,003
7	-0,162	0,851	-0,176	0,838	0,014	0,0002
8	-0,281	0,756	-0,315	0,729	0,033	0,001
Σ						0,009

Проверку гипотезы об адекватности модели (3.24) осуществляли посредством применения F – критерия Фишера. Расчетное значение этого критерия определяли по формуле (3.21): $F_{4; 16}^{расч} = \frac{0,006}{0,002} = 2,66$.

Значение F – критерия по таблице при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $F_{0,05; 4, 16}^{табл} = 3,06$. Ввиду того, что выполняется условие $F^{расч} < F^{табл}$, математическую модель параметра y_{Ra} считают адекватной.

После подтверждения адекватности модели была выполнена процедура раскодирования и потенцирования выражения (3.24). Получена математическая модель, описывающая зависимость величины шероховатости внутренних

резьбовых поверхностей изделия от параметров магнитной индукции, времени обработки и частоты вращения заготовки (3.25):

$$Ra = 107 \cdot B^{0,62} \cdot t^{-1,11} \cdot n^{0,44} \quad (3.25)$$

На основе выполненных опытов построены зависимости, иллюстрирующие влияние режимных факторов магнитно-абразивной обработки на значение шероховатости внутренних резьбовых поверхностей изделия (рисунок 3.5).

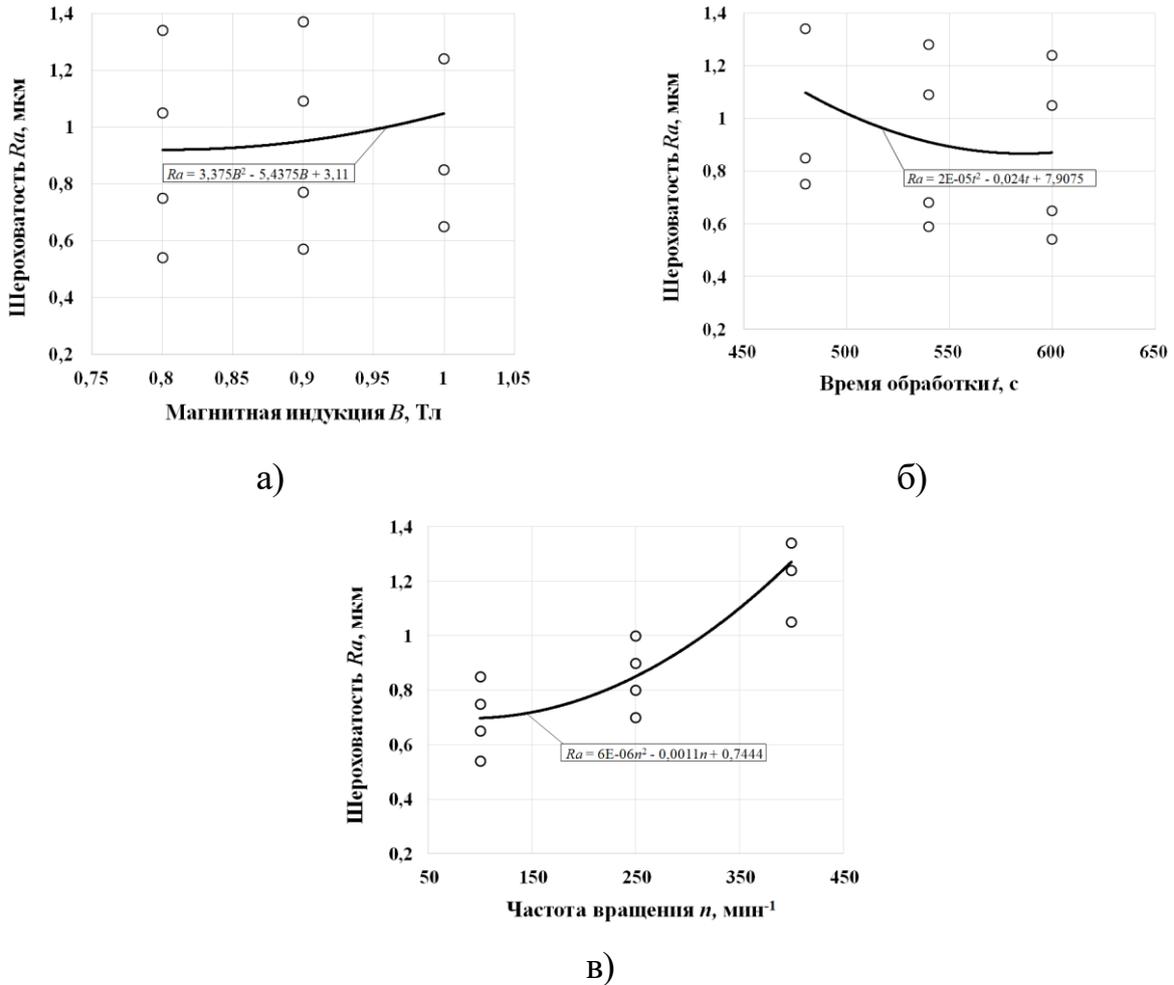


Рисунок 3.5 – Зависимость шероховатости внутренней резьбовой поверхности от:

а) магнитной индукции; б) времени обработки,

в) частоты вращения

В пределах исследуемого диапазона режимных факторов процесса MAO при повышении времени обработки, снижении магнитной индукции и частоты вращения образца шероховатость наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений уменьшается, что объясняется удалением магнитно-

абразивным инструментом исходных микронеровностей обрабатываемой поверхности.

Проведенные исследования по воздействию магнитно-абразивной обработки позволили установить, что на изменение шероховатости наружных резьбовых поверхностей замковых соединений наибольшее влияние оказывает время обработки, потом частота вращения образца, и наименьшее влияние оказывает магнитная индукция (формула 3.23). На изменение шероховатости внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений наибольшее влияние оказывает время обработки, потом магнитная индукция, и наименьшее влияние оказывает частота вращения образца (формула 3.25).

В этой связи, в исследуемом диапазоне режимных факторов процесса MAO (частота вращения образца: 100...450 мин⁻¹; магнитная индукция: 0,8...1,0 Тл; время обработки: 360...600 с) шероховатость наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений снижается до $Ra = 0,4...0,5$ мкм. Минимальные значения шероховатости для образца с наружной резьбой получены при магнитно-абразивной обработке с частотой вращения $n = 150$ мин⁻¹, магнитной индукцией $B = 0,8$ Тл, временем обработки $t = 540$ с; максимальные – с частотой вращения $n = 450$ мин⁻¹, магнитной индукцией $B = 1,0$ Тл и временем обработки $t = 360$ с. Минимальные значения шероховатости для образца с внутренней резьбой получены при магнитно-абразивной обработке с частотой вращения $n = 100$ мин⁻¹, магнитной индукцией $B = 0,8$ Тл, временем обработки $t = 600$ с; максимальные – с частотой вращения $n = 400$ мин⁻¹, магнитной индукцией $B = 1,0$ Тл и временем обработки $t = 480$ с.

3.2.2 Твердость наружных и внутренних резьбовых поверхностей

При исследовании влияния качества резьбовых поверхностей замковых соединений одним из критериев оценки является твердость поверхности.

Влияния режимных параметров процесса MAO на твердость резьбовых поверхностей было изучено с применением методики, представленной в разделе 3.1. Анализ экспериментальных данных проводили аналогично алгоритму расчетов, приведенному в разделе 3.2.1. В рамках исследования были вычислены

средние арифметические значения, дисперсия по строкам для каждого опыта, суммарная дисперсий, G – критерий Кохрена и дисперсия опыта. Полученные результаты представлены в таблице 3.10 для наружной резьбовой поверхности.

Таблица 3.10– Результаты экспериментов и расчета дисперсий опытов для наружной резьбовой поверхности

N	u	Твердость наружной резьбовой поверхности HV		\bar{y}_{Hv}	S_j^2	$\sum_{j=1}^N S_j^2$	$G_{расч}$	S_y^2
		HV	$y_{Hv} = \ln HV$					
1	1	995	6,903	6,891	0,0002	0,002	0,213	0,0003
	2	984	6,892					
	3	969	6,876					
2	1	871	6,769	6,754	0,0002			
	2	857	6,753					
	3	844	6,738					
3	1	945	6,851	6,851	0,0002			
	2	958	6,865					
	3	930	6,835					
4	1	819	6,708	6,722	0,0002			
	2	831	6,723					
	3	842	6,736					
5	1	772	6,649	6,649	0,0002			
	2	785	6,666					
	3	759	6,632					
6	1	636	6,455	6,471	0,0003			
	2	642	6,465					
	3	659	6,491					
7	1	741	6,608	6,584	0,0005			
	2	709	6,563					
	3	721	6,581					
8	1	617	6,425	6,425	0,0003			
	2	605	6,405					
	3	629	6,444					

Находили уравнение регрессии, вычислив коэффициенты и подставив их в уравнение (3.9) (3.26):

$$y_{Hv} = 6,67 + 0,08 \cdot x_1 + 0,02 \cdot x_2 + 0,14 \cdot x_3 \quad (3.26)$$

Используя выражение (3.19) рассчитали доверительный интервал коэффициентов регрессии:

$$\Delta_{b_i} = 0,007.$$

Коэффициенты уравнения регрессии считают статистически значимыми, если их абсолютное значение равно доверительному интервалу или превышает его. В данном исследовании все коэффициенты уравнения регрессии удовлетворяют этому условию.

Проверку гипотезы об адекватности модели (3.26) осуществляли посредством применения F – критерию Фишера. Расчетное значение этого критерия определяли по формуле (3.21): $F_{4;16}^{\text{расч}} = 2,5$.

Значение F – критерия по таблице при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $F_{0,05; 4,16}^{\text{табл}} = 3,06$. Ввиду того, что выполняется условие $F^{\text{расч}} < F^{\text{табл}}$, математическую модель параметра y_{Hv} считают адекватной.

После подтверждения адекватности модели была выполнена процедура раскодирования и потенцирования выражения (3.26).

Получена математическая модель, описывающая зависимость величины твердости наружных резьбовых поверхностей изделия от параметров магнитной индукции, времени обработки и частоты вращения заготовки (3.27):

$$HV = 110 \cdot B^{0,68} \cdot t^{0,11} \cdot n^{0,25} \quad (3.27)$$

Для внутренней резьбовой поверхности также были вычислены средние арифметические значения, дисперсия по строкам для каждого опыта, суммарная дисперсий, G – критерий Кохрена и дисперсия опыта. Полученные результаты представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11– Результаты экспериментов и расчета дисперсий опытов для внутренней резьбовой поверхности

N	и	Твердость наружной резьбовой поверхности HV		\bar{y}_{Hv}	S_j^2	$\sum_{j=1}^N S_j^2$	$G_{\text{расч}}$	S_y^2
		HV	$y_{Hv} = \ln HV$					
1	1	971	6,878	6,892	0,0002	0,002	0,212	0,0003
	2	998	6,906					
	3	986	6,893					
2	1	842	6,736	6,751	0,0002			
	2	869	6,767					
	3	855	6,751					

Продолжение таблицы 3.11

3	1	956	6,863	6,848	0,0002			
	2	943	6,849					
	3	928	6,833					
4	1	840	6,733	6,719	0,0002			
	2	817	6,706					
	3	829	6,721					
5	1	783	6,663	6,646	0,0003			
	2	770	6,646					
	3	757	6,629					
6	1	657	6,488	6,467	0,0003			
	2	634	6,452					
	3	640	6,462					
7	1	719	6,578	6,581	0,0005			
	2	739	6,605					
	3	707	6,561					
8	1	603	6,402	6,421	0,0004			
	2	627	6,441					
	3	615	6,422					

Находили уравнение регрессии, вычислив коэффициенты и подставив их в уравнение (3.9) (3.28):

$$y_{Hv} = 6,67 + 0,08 \cdot x_1 + 0,02 \cdot x_2 + 0,14 \cdot x_3 \quad (3.28)$$

Используя выражение (3.19) рассчитали доверительный интервал коэффициентов регрессии:

$$\Delta_{b_i} = 0,007.$$

Коэффициенты уравнения регрессии считают статистически значимыми, если их абсолютное значение равно доверительному интервалу или превышает его. В данном исследовании все коэффициенты уравнения регрессии удовлетворяют этому условию.

Проверку гипотезы об адекватности модели (3.22) осуществляли посредством применения F – критерию Фишера. Расчетное значение этого критерия определяли по формуле (3.21): $F_{4;16}^{\text{расч}} = 2,25$.

Значение F – критерия по таблице при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $F_{0,05;4,16}^{\text{табл}} = 3,06$. Ввиду того, что выполняется условие $F^{\text{расч}} < F^{\text{табл}}$, математическую модель параметра y_{Hv} считают адекватной.

После подтверждения адекватности модели была выполнена процедура раскодирования и потенцирования выражения (3.28). Получена математическая модель, описывающая зависимость величины твердости наружных резьбовых поверхностей изделия от параметров магнитной индукции, времени обработки и частоты вращения заготовки (3.29):

$$HV = 81 \cdot B^{0,68} \cdot t^{0,21} \cdot n^{0,19} \quad (3.29)$$

На основе выполненных опытов построены зависимости, иллюстрирующие влияние режимных параметров магнитно-абразивной обработки на значение твердости наружных и внутренних резьбовых поверхностей изделия (рисунки 3.6, 3.7).

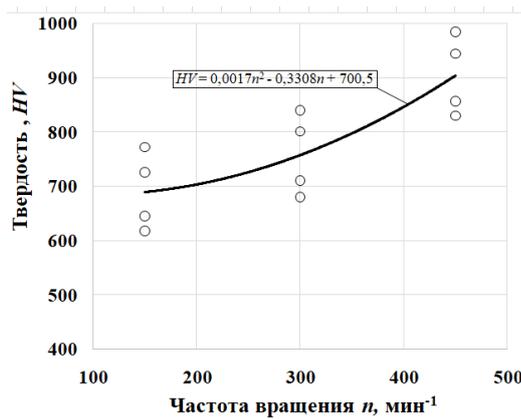
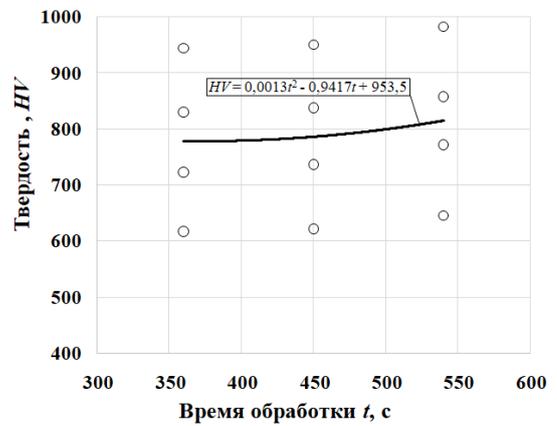
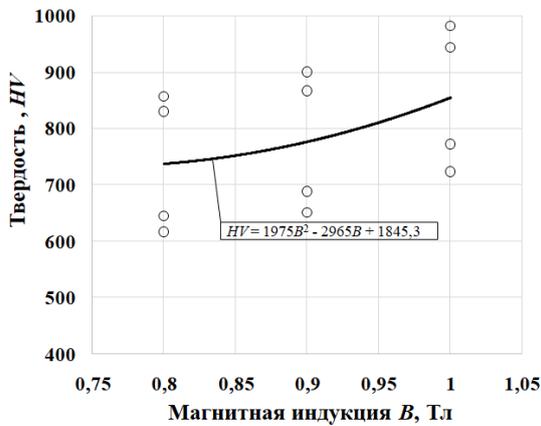
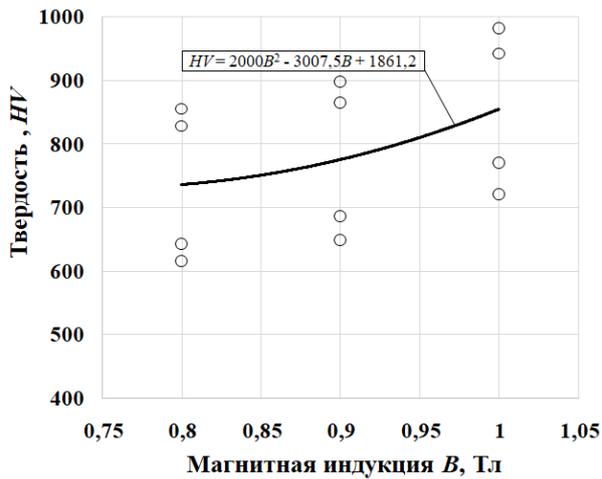
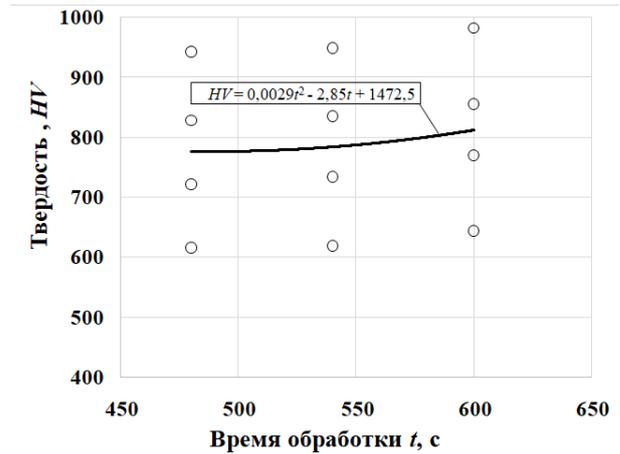


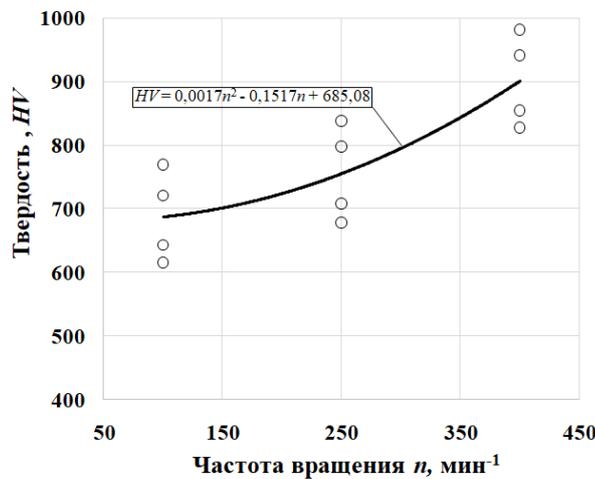
Рисунок 3.6 – Зависимость твердости наружной резьбовой поверхности от:
а) магнитной индукции; б) времени обработки, в) частоты вращения



а)



б)



в)

Рисунок 3.7 – Зависимость твердости внутренней резьбовой поверхности от:

а) магнитной индукции; б) времени обработки, в) частоты вращения

В пределах исследуемого диапазона режимных факторов процесса МАО при повышении времени обработки, магнитной индукции и частоты вращения образца твердость наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений увеличивается. Данное явление объясняется тем, что обработка осуществляется с такими процессами, как микроудары, микрорезание, пластическая деформация тонкого приповерхностного слоя [4].

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что наибольшее влияние на изменение твердости наружных резьбовых поверхностей замковых соединений оказывает магнитная индукция, потом частота вращения образца, и наименьшее влияние оказывает время обработки (формула 3.27). На

изменение твердости внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений оказывает магнитная индукция, потом время обработки, и наименьшее влияние оказывает частота вращения образца (формула 3.29).

В этой связи, в исследуемом диапазоне режимных факторов процесса МАО (частота вращения образца: $100 \dots 450 \text{ мин}^{-1}$; магнитная индукция: $0,8 \dots 1,0 \text{ Тл}$; время обработки: $360 \dots 600 \text{ с}$) твердость наружных и внутренних резьбовых поверхностей замковых соединений повышается до $982 \dots 985 \text{ HV}$. Минимальные значения твердости для образца с наружной резьбой получены при магнитно-абразивной обработке с частотой вращения $n = 150 \text{ мин}^{-1}$, магнитной индукцией $B = 0,8 \text{ Тл}$, временем обработки $t = 360 \text{ с}$; максимальные – с частотой вращения $n = 450 \text{ мин}^{-1}$, магнитной индукцией $B = 1,0 \text{ Тл}$ и временем обработки $t = 540 \text{ с}$. Минимальные значения твердости для образца с внутренней резьбой получены при магнитно-абразивной обработке с частотой вращения $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, магнитной индукцией $B = 0,8 \text{ Тл}$, временем обработки $t = 480 \text{ с}$; максимальные – с частотой вращения $n = 400 \text{ мин}^{-1}$, магнитной индукцией $B = 1,0 \text{ Тл}$ и временем обработки $t = 600 \text{ с}$.

3.3 Выводы по третьей главе

1. Экспериментально определены закономерности влияния режимных факторов МАО резьбовых поверхностей замковых соединений по предлагаемому способу на шероховатость и твердость резьбовых поверхностей замковых соединений.

2. Получены математические модели влияния режимных факторов на шероховатость и твердость наружных и внутренних резьбовых поверхностей.

3. Установлено, что минимальные значения шероховатости резьбовых поверхностей замковых соединений получены при следующих значениях режимных факторов: магнитная индукция $B = 0,8 \text{ Тл}$; время обработки $t = 540 - 600 \text{ с}$; частота вращения заготовки $n = 100 - 150 \text{ мин}^{-1}$. Максимальные значения твердости резьбовых поверхностей замковых соединений получены при следующих значениях режимных факторов: магнитная индукция $B = 1,0 \text{ Тл}$; время обработки $t = 540 - 600$

s ; частота вращения заготовки $n = 400 - 450 \text{ мин}^{-1}$. Удаётся достичь шероховатости обработанной поверхности до $Ra = 0,4 \dots 0,5 \text{ мкм}$, твердости – до $982 \dots 985 \text{ HV}$.

4. Комбинации режимных факторов МАО влияют на качество обработанных резьбовых поверхностей и эффективность обработки. При наборе определенных режимных факторов наблюдается положительная тенденция в изменении шероховатости Ra и твердости HV поверхности.

ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРОВЫХ ШТАНГ

Как было отмечено в первой главе, под действием напряжений в элементах колонны развиваются усталостные трещины, и, в конечном счете, происходят усталостные поломки. В связи с наличием в скважине промывочной жидкости и пластовых вод к силовым факторам добавляется коррозионный эффект, и разрушение элементов колонны приобретает коррозионно-усталостный характер [55].

Буровой раствор поступает к первой нитке резьбы ниппеля изнутри труб по винтовому зазору в замковой резьбе и через капиллярную щель по упорным торцам муфты и ниппеля.

Для регулирования свойств буровых растворов применяют многочисленные химические добавки. Широкое распространение получили следующие химические реагенты [55]:

1. Кальцинированная сода Na_2CO_3 ;
2. Каустическая сода (едкий натр) $NaOH$;
3. Тринатрийфосфат Na_2PO_3 ;
4. Жидкое стекло, представляющее собой растворенный в воде силикат натрия $Na_2O \cdot nSiO_2$;
5. Известь $Ca(OH)_2$;
6. Соединения хлора $NaCl$, KCl , $MgCl$ и др.

Все перечисленные реагенты в водных растворах влияют на электрохимическую коррозию металлов подземного бурового оборудования. Наиболее сильную коррозию стальных буровых труб следует ожидать в присутствии растворов соединений хлора, интенсифицирующих окислительные процессы железа.

Природная пластовая вода включает в себя множество различных солей и их соединений. Химический состав пластовых вод в нефтяных и газовых месторождениях разнороден и в процессе разработки месторождений меняются и

зависят от таких факторов, как снижение температуры, давления, смешивание с другими пластовыми водами, что приводит к нарушению ионного обмена.

В связи с вышесказанным, выяснение вопросов прочности резьбовых элементов буровой колонны необходимо связывать с проблемой коррозионной усталости материалов труб. Весь опыт эксплуатации буровых труб показывает, что коррозионное поражение металла резьбовых элементов трубы приводит к существенному снижению ее несущей способности и долговечности [55].

4.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Для изучения механизмов коррозионных процессов была использована методика фиксации количества продуктов коррозии после испытаний в камере соляного тумана *TDC 1200 PN* (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 - Камера соляного тумана *TDC 1200 PN*

Камера соляного тумана предназначена для имитации воздействия солевого раствора на материалы при контролируемых температурных условиях и условиях влажности. В процессе испытаний оценивали как изменение материала непосредственно во время воздействия, и так и его поведение после завершения. Опыт с использованием соляного тумана является высокоэффективным методом для определения коррозионной стойкости материалов (согласно ГОСТ 9.308-85). Данная методика позволяет значительно ускорить процесс получения результатов по сравнению с традиционными испытаниями образцов в условиях повышенной влажности.

Таким образом, коррозионная стойкость оценивалась в среде, имитирующей агрессивную.

Принцип работы камеры соляного тумана основан на воздействии специального мелкодисперсного спрея с высоким содержанием солей на поверхность тестируемого образца.

Для эксперимента были выбраны образцы с наружной резьбовой поверхностью ввиду того, что на внутреннюю резьбу образцов мелкодисперсный спрей не осаждался из-за особенностей конструкции детали. В ходе эксперимента исследовали влияние величины магнитной индукции на степень коррозии резьбовой поверхности.

В этой связи образцы с наружной резьбой, подвергнутые магнитно-абразивной обработке, использовались 3 типов: обработанные в магнитном поле 0,6 Тл, 0,8 Тл и 1,0 Тл, а также образцы, изготовленные базовой конфигурации (без применения магнитно-абразивной обработки). Повторяемость образцов на каждый вид обработки – 3шт., таким образом, в эксперименте рассматривались 12 образцов.

В ходе испытаний 5% раствор $NaCl$ распыляли в течение суток на образцы с наружной резьбой из стали 40Х со средней скоростью от 1,0 - 2,0 мл/ч при температуре $(35 \pm 2) ^\circ C$ и влажности 95%. Распыление соляного тумана осуществляли непрерывно на протяжении всего испытания.

После снятия образцов с испытания проводили визуальный осмотр с применением измерительного микроскопа *Leica DM ILM HC* (рисунок 3.2) и

оценивали состояние поверхности образцов, исходя из наличия коррозионных повреждений.

Для определения количества и местоположения дефектов применяли сетку-шаблон с квадратами 5×5 мм, которую накладывали на испытуемый образец согласно ГОСТ Р 9.905-2007.

4.2 Оценка коррозионной стойкости резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг с различными режимами подготовки поверхностей

Коррозионные испытания в камере соляного тумана *TDC 1200 PN* показали, что защитная способность, которую оценивали по времени до появления на испытуемом образце первых признаков коррозии, увеличивается в ряду: образцы без обработки (2 ч), образцы после магнитно-абразивной обработки при магнитной индукции 1,0 Тл (12 ч); при магнитной индукции 0,6 Тл (14 ч); при магнитной индукции 0,8 Тл (22 ч).

При визуальном контроле выявлено, что образцы, не подвергнутые магнитно-абразивной обработке, имеют 99 % коррозионных поражений на поверхности (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Результаты коррозионных испытаний в камере соляного тумана образцов с наружной резьбой из стали 40Х, не обработанных магнитно-абразивной обработкой

Коррозионные повреждения после испытаний в камере соляного тумана на резьбовой поверхности образцов, обработанных магнитно-абразивной обработкой, представлены на рисунке 4.3.



а)

б)

в)

Рисунок 4.3 – Результаты коррозионных испытаний в камере соляного тумана образцов с наружной резьбой из стали 40X, обработанных магнитно-абразивной обработкой при различных значениях магнитной индукции, где:

а) 0,6 Тл, б) 0,8 Тл, в) 1,0 Тл

На рисунке 4.3 (а, в) видно, что впадина резьбы образца не подвергалась магнитно-абразивному полированию, однако агрессивное распространение коррозии не наблюдается, что говорит о том, что воздействие магнитного поля благоприятно отражается на эксплуатационных свойствах поверхностного слоя изделий. Последнее обстоятельство позволяет выделить магнитную обработку в самостоятельный способ обработки [8].

Интенсивность развития коррозионных поражений на резьбовой поверхности образцов, обработанных магнитно-абразивной обработкой, представлены в таблице 4.1. Таблица 4.1 – Интенсивность развития коррозии на резьбовой поверхности образцов в зависимости от значения магнитной индукции

Время проведения эксперимента, ч	Степень коррозии, занимаемой поверхности, % при магнитном поле		
	0,6 Тл	0,8 Тл	1,0 Тл
24	32	18	58

Образцы, подвергнутые магнитно-абразивной обработке и образцы базовой конфигурации, были рассмотрены под микроскопом *Leica DM ILM HC* (рисунок 4.4).

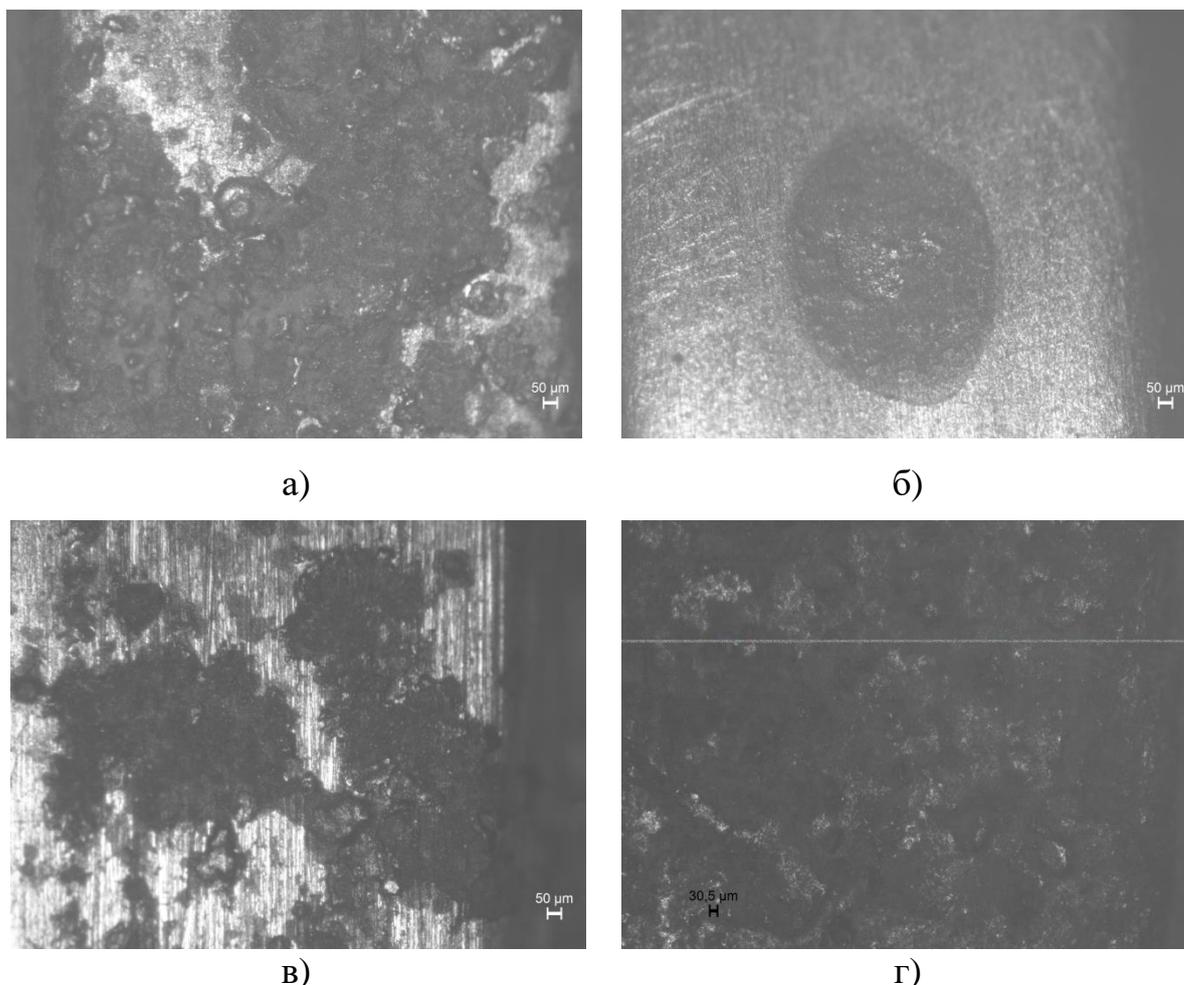


Рисунок 4.4 – Коррозионные поражения под микроскопом на образцах, обработанных магнитно-абразивной обработкой при различном значении магнитной индукции, где: а) 0,6 Тл, б) 0,8 Тл, в) 1,0 Тл, г) без МАО

Анализ макроструктуры резьбовых поверхностей, подвергнутых магнитно-абразивной обработке, позволил определить разновидность коррозионного поражения поверхностей. Коррозия, показанная на рисунке 4.4 (а, в) является питтинговой. При таком виде разрушения корродируют отдельные участки поверхности металла, где и образуются глубокие поражения, которые обычно переходят в сквозное разрушение [16].

Коррозия, показанная на рисунке 4.4 (г), является сплошной и неравномерной. Опасность такого вида коррозии заключается в том, что она вызывает в отдельных местах значительное уменьшение толщины металла.

В результате обработки экспериментальных данных построена графическая зависимость изменения степени коррозионного поражения и шероховатости резьбовой поверхности от величины магнитной индукции (рисунок 4.5).

Согласно графику (рисунок 4.5), сопротивление коррозии возрастает с уменьшением шероховатости резьбовой поверхности.

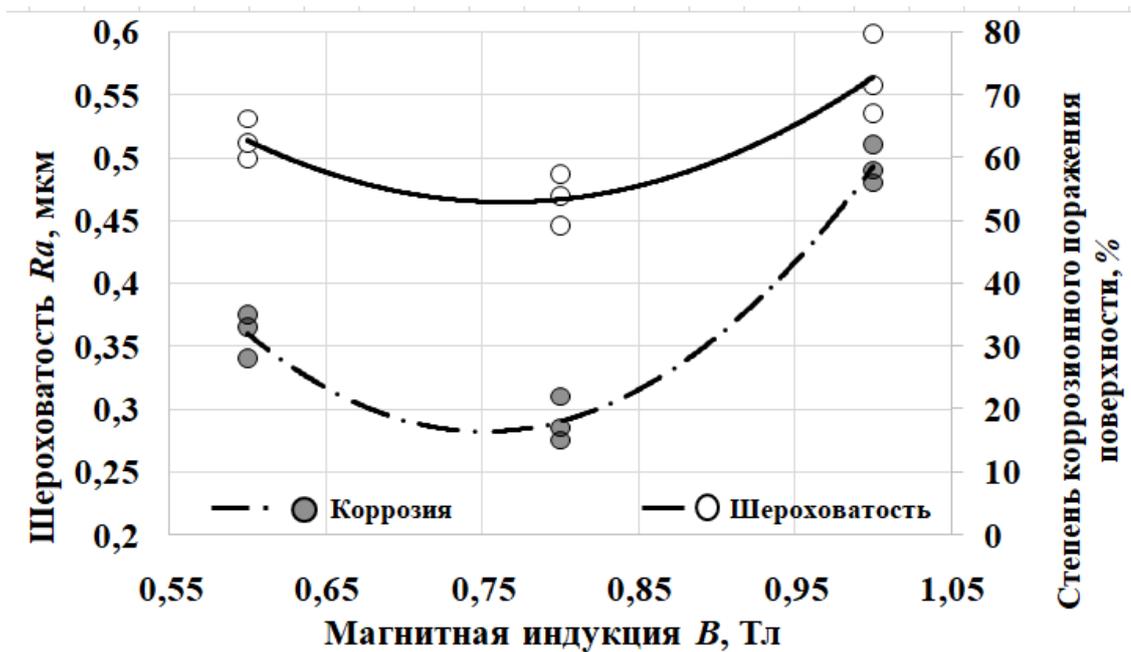


Рисунок 4.5 – Графическое представление зависимости степени коррозионного поражения и шероховатости резьбовой поверхности от величины магнитной индукции

В условиях высокой шероховатости на резьбовой поверхности формируется микрорельеф, включающий выступы и впадины, которые увеличивают суммарную площадь взаимодействия поверхности металла с коррозионными агентами (влага, кислород, соли, и другие химические реагенты). Снижение шероховатости способствует сокращению площади контакта, тем самым уменьшая активное электрохимическое взаимодействие.

Анализ результатов эксперимента свидетельствует о том, что MAO повышает коррозионную стойкость резьбовой поверхности замковых соединений буровых штанг в условиях, имитирующих агрессивную среду, в 5 раз.

4.3 Практические рекомендации по технологическому обеспечению качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг

Использование инструмента на основе сплава карбида титана и железа $TiC+Fe$ фракции $\Delta = 160 - 400$ мкм в качестве магнитно-абразивного инструмента в сочетании со смазочно-охлаждающими жидкостями способствует увеличению

плотности магнитно-абразивной массы и обеспечивает ее прилегание к обрабатываемой поверхности, обеспечивая равномерную обработку по всему профилю.

В ходе исследования определены режимные факторы магнитно-абразивной обработки, включая магнитную индукцию B , частоту вращения образца n , время обработки t . Варьируя данные факторы обработки, шероховатость резьбовых поверхностей замковых соединений достигает $Ra = 0,4...0,5$ мкм. Твердость резьбовой поверхности после магнитно-абразивной обработки равномерно повышается до $982...985 HV$ по всей обработанной поверхности.

Дефекты на поверхности, возникшие на предыдущих этапах технологического процесса можно устранить, применив магнитно-абразивную обработку.

Эффективность применения магнитно-абразивной обработки подтверждена сравнительным анализом коррозионной стойкости деталей, отличающихся по технологии изготовления: базовой конфигурации и с применением магнитно-абразивной обработки с варьированием значения магнитной индукции. Доказано, что применение магнитно-абразивной обработки по предлагаемому способу увеличивает коррозионную стойкость в условиях, имитирующих агрессивную среду, в 5 раз.

Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяют разработать ряд практических рекомендаций:

1. Финишную обработку резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг рекомендуется проводить способом магнитно-абразивной обработки;

2. Магнитно-абразивную обработку резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг рекомендуется осуществлять посредством предлагаемого способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг;

3. Для достижения максимальной эффективности магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг рекомендуется придерживаться следующих режимных факторов:

а) Инструмент и среда обработки:

- магнитно-абразивный порошок $TiC+Fe$ фракции $\Delta = 160 - 400$ мкм, применяемого совместно со смазочно-охлаждающими жидкостями.

б) Рабочий зазор и параметры магнитной индукции:

- зазор между обрабатываемой поверхностью и полюсными наконечниками составляет $\delta = 1,5 - 2$ мм (заполняемость зазора порошком более 80%);

- магнитная индукция $B = 0,8 - 1,0$ Тл (при установленном рабочем зазоре $\delta = 1,5 - 2$ мм).

в) Конструктивные особенности установки:

- наличие наклонной поверхности полюсного наконечника для обработки наружной резьбовой поверхности, равной конусу резьбы;

- наличие дополнительного инструмента для обработки внутренней резьбовой поверхности, конус которого равен конусу внутренней резьбовой поверхности.

4. Режимные параметры магнитно-абразивной обработки:

- магнитная индукция $B = 0,8 - 1,0$ Тл;

- время обработки $t = 360 - 600$ сек;

- частота вращения $n = 100 - 450$ мин⁻¹.

5. Дополнительные рекомендации:

Перед началом магнитно-абразивной обработки рекомендуется проводить компьютерное моделирование процесса магнитно-абразивного воздействия резьбовых поверхностей замковых соединений различных типоразмеров с целью оценки эффективности выбранного способа магнитно-абразивной обработки, режимных факторов обработки.

4.4 Выводы по четвертой главе

1. В ходе экспериментальных исследований изучено влияние способа окончательной обработки на коррозионную стойкость резьбовых поверхностей

замковых соединений буровых штанг. Защитные свойства материала определяли по появлению первых признаков коррозии на испытуемом образце в течение 24 ч.

2. Результаты экспериментальных исследования показали, что применение магнитно-абразивной обработки по предлагаемому способу позволяет увеличить коррозионную стойкость резьбовых поверхностей в 5 раз, в условиях, имитирующих агрессивную среду, по сравнению с образцом базовой конфигурации.

3. Выявлено, что образованный при МАО микрорельеф поверхности способствует созданию нового слоя, механические характеристики которого позволяют повысить эксплуатационные свойства детали, и, как следствие – ее долговечность.

4. Даны практические рекомендации по применению способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг, что позволит обеспечить снижение шероховатости резьбовых поверхностей до $Ra = 0,4 \dots 0,5$ мкм, а также обеспечить повышение твердости до $982 \dots 985$ HV. Применение магнитно-абразивной обработки представляет возможным устранить дефекты поверхности, возникшие на предыдущих этапах технологического процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных в диссертационной работе исследований позволяют сделать следующие основные 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 замковых соединений 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 MAO на значения шероховатости и

твердости обработанных резьбовых поверхностей. Установлено, что предлагаемый способ позволяет уменьшить шероховатость резьбовых поверхностей до $Ra = 0,4 \dots 0,5$ мкм, увеличить твердость до $982 \dots 985 HV$.

4. Получены математические модели, 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 факторов обработки наблюдается положительная тенденция изменения шероховатости поверхности по параметру Ra 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, 5 раз.

6. Сформулированы практические рекомендации по применению способа МАО резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг с диапазонами режимных факторов: магнитная индукция $B = 0,8 - 1,0$ 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1255403 SU СССР, МКИ В24В 31/112. Способ магнитно-абразивной обработки цилиндрических отверстий: № 3794152: заявл. 06.08.1984: опубл. 07.09.1986 / Ю. А. Базарнов, В. В. Смоляк, А.П. Матвеев; заявитель ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН БЕЛОРУССКОЙ ССР.
2. Авторское свидетельство № 1585124 А1 СССР, МПК В24В 31/112. Способ магнитно-абразивной обработки: № 4407781: заявл. 11.04.1988: опубл. 15.08.1990 / В. Ф. Чеботаев, С. А. Михалькова; заявитель КРАМАТОРСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ.
3. Акулович, Л.М. Магнитно-абразивная обработка поворотных резцов для проходческих и очистных комбайнов / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, Е.В. Сенчуров, В.В. Падаляк, В.Я. Лебедев, В.Е. Бабич// Вестник Полоцкого государственного университета Прикладные науки. – 2011. – №11. – с. 78-84.
4. Акулович, Л.М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Я. Лебедев. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.
5. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.
6. Акулович, Л. М. Ферроабразивные порошки для магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, А. И. Покровский, Е. В. Сенчуров. – Минск: БГАТУ, 2015. – 284 с.
7. Бабич, В.Е. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.03.01 / Бабич Виталий Евгеньевич. – ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси. – Минск, 2009. – 158 с.
8. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.

9. Барон, Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1975. – 128 с.
10. Биргер, И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. - М.:Машиностроение, 1990. -368с.
11. Дурынин, И.В. Разработка и исследование методики электромагнитного расчета устройств магнитно-абразивной обработки: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук:05.09.05. – Л., 1991. – 16 с.
12. Жданович, В.И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Жданович Венедикт Иванович. – Физико-технический ин-т АН БССР. – Минск, 1974. – 23 с.
13. Зарипов, В.Н. Технологическое обеспечение и повышение долговечности переводников бурильных колонн финишной электромеханической обработкой: автореф. Дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук /Зарипов Вадим Назиуллинович. - Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. – Москва. 2024. – 16с.
14. Иосилевич, Г.Б. Детали машин: учебник для студентов машиностроит. спец. вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
15. **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.
16. Кац, Н.Г. Анализ образования питтингов в материале магистрального трубопровода /Н.Г. Кац, Д.В. Коноваленко// Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. - 2016. - № 2 (50). - С. 174-177.
17. Кексин, А. И. Повышение качества внутренних резьбовых поверхностей на основе предварительного магнитно-абразивного полирования сложнопрофильного инструмента: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.02.08 / Кексин Александр Игоревич. – СПб, 2017. – 204 с.

18. Кексин, А.И. Повышение эффективности технологического процесса изготовления внутренних резьб в изделиях горных машин / А.И. Кексин, В.В. Максаров // Металлообработка. – 2016. – №2 (92). – с. 27-33.

19. Кексин, А.И. Технологическое повышение качества сложнопрофильных поверхностей методом магнитно-абразивного полирования / А.И. Кексин, В.В. Максаров // Металлообработка. – 2017. – №1 (97). – с. 47-57.

20. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин / В.П. Когаев, Ю.М. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.

21. Колесников, К.С. Технологические основы обеспечения качества машин / – М.: Машиностроение, 1990. – 256с.

22. Коновалов, Е.Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е.Г. Коновалов, Ф.Ю. Сакулевич. – Мн.: Наука и техника, 1974. – 272 с.

23. Коновалов, Е.Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев. Минск: Наука и техника, 1967. – 125с.

24. Кремень, З.И. Турбоабразивная обработка сложнопрофильных деталей / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев. – Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 163 с.

25. Крыжановский, Е. И. Повышение сопротивления усталости замковых резьбовых соединений элементов бурильной колонны: автореферат дис. кандидата технических наук : 05.04.07. — Львов, 1980. — 187 с.

26. Кузнецов, А.М. Новые методы обработки – основа интенсификации производства машин. В кн.: Научные основы прогрессивной техники и технологии. М.: Машиностроение, 1986. – с. 228-241.

27. Лачинян, Л.А. Работа бурильной колонны. – М.: Недра, 1979. -207.

28. Литвиненко, В.А. Финишная обработка фасонных поверхностей с высокими требованиями к качеству методом МАП с вращающейся рабочей зоной: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.02.08 / Литвиненко Валентина Алексеевна. – Ленинград, 1985. – 259 с.

29. Мавлютов, Р.Р. Концентрация напряжений в элементах конструкций / Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1996. – 240 с.

30. 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.

31. 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. Ольт, А.И. Кексин, **Р.А. Щеглова** // *Черные металлы*. – 2022 (2). – С. 49 – 55.

32. 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.

33. 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.

34. Максимов, Д. Д. Технологическое обеспечение и повышение качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 2.5.6 / Максимов Дмитрий Дмитриевич. – СПб, 2024. – 160 с.

35. Малинина, Е.М. Способы бурения скважин /Малинина Е.М., Аракчеева С.В.// *Вологдинские чтения*. №. 76. 2009.110-111 с.

36. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

37. Маталин, А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. – Киев, Техника, 1971. – 144 с.

38. Маталин, А.А. Технология механической обработки. – М.: Машиностроение, 1977. 460 с.

39. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. / [Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др.]. – М.: Машиностроение, 2000. – Т. 3: Технология изготовления деталей машин

/ А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; Под общ. ред. А.Г. Суслова. 2002. – 840 с.

40. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

41. Нуруллин, И.Г. Применение метода электроэрозионной обработки для повышения качества обработанной поверхности/И.Г. Нуруллин, И.И. Хафизов, З.Б. Садыков//Материалы IX МНТК «ИМТОМ-2018» Ч.1.- Казань, 2018. - 432 с.

42. Патент 2534656. Российская Федерация, МПК В24В 31/112. Способ и устройство для обработки внутренней поверхности волноводов. Заявка № 2012152137/02: заявл. 04.12.2012: опубл. 10.12.2014 / С. В. Агашкин, М. М. Михнев, А. Р. Ушаков; заявитель ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева».

43. Патент 94657. Украина. Способ финишной магнитно-абразивной обработки поверхностей цилиндрических отверстий деталей из высоколегированных композитов. Заявка UA 200911005A: заявл. 30.10.2009: опубл. 25.05.2011 / А. П. Гавриш, Т. А. Роик, Е. А. Мельник, Ю.Ю. Вицюк, О.А. Гавриш; заявитель Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт».

44. Патент 2797796. Российская Федерация, МПК В24В 31/112. Способ магнитно-абразивной обработки замкового соединения буровой штанги. Заявка № 2022128603: заявл. 03.11.2022: опубл. 08.06.2023 / В. В. Максаров, А. И. Кексин, **Р. А. Щеглова**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

45. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.

46. Прокофьев, А.А. Технологическое повышение коррозионной стойкости резб насосно-компрессорных труб: автореферат дис. на соискание ученой степени

кандидата технических наук: 05.02.07. Моск. гос. индустр. ун-т (МГИУ)]. - Москва, 2013. - 23 с.

47. Прокофьев, А.Н. Технологическое обеспечение и повышение качества резьбовых соединений: автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.02.08. Брян. гос. техн. ун-т (БИТМ)]. - Брянск, 2008. - 34 с.

48. Рахштадт, А.Г., Брострем В.А. (ред.). Справочник металлиста. Том 2. В 5-ти т. — 3-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1976. — 720 с.: ил.

49. Решетов, Д.Н. Детали машин / Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1975. – 655 с.

50. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

51. Сакулевич, Ф. Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей. – Минск, 1977. – 288 с.

52. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.

53. Саруев, А. Л. Динамические процессы и напряжения в элементах резьбовых соединений буровых штанг при вращательно-ударном нагружении: монография / Саруев А. Л., Саруев Л. А.//М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Нац. исслед. Томский политехнический ун-т». 2-е изд. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та. 2011. 100 с.

54. Сахаров, Г.Н. Металлорежущие инструменты / Г.Н. Сахаров и др. – М.: Машиностроение, – 1986. – 328 с.

55. Северинчик, Н. А. Долговечность и надежность геологоразведочных бурильных труб / Н. А. Северинчик, Б. В.Копей. – М.: Недра, 1979. – 176 с.

56. Скворчевский, Н.Я. и др. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.Я. Скворчевский и др. Физ. - техн. инс-т. – Минск.: Наука и техника, 1991 – 214 с.

57. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова.-5-изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение. – Т. 1, 2001. – 912 с.
58. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова.-5-изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – Т. 2, 2001. – 905 с.
59. Стешков, А.Е. Режущий инструмент: учеб. пособие. – Брянск: БГТУ, 2015. – 163 с.
60. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
61. Сулов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. – 318 с.
62. Сулов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Сулов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
63. Сулов, А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / В.П. Федоров, О.А. Горленко и др. / Под общей ред. А.Г. Сулова.– М.: Машиностроение, 2006.–448 с.
64. Сулов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
65. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. Под ред. канд. техн. наук Н. А. Табачниковой. Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007, 136 с.
66. Трощенко, С.А. повышение износостойкости резьбовых соединений буровых труб : бакалавр : 15.03.02.Сибир Фед Университет нефти и газа. - Красноярск, 2016. - 82 с.
67. Федорова, Л.В. Повышение надежности резьбовых соединений электромеханической обработкой / Л.В.Федорова, Ю.С.Иванова, М.В.Воронина // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 456-461.

68. Филипенко, И. А. Технологическое повышение качества кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц методом магнитно-абразивной обработки: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.02.08 / Филипенко Ирина Анатольевна. – СПб, 2022. – 153 с.

69. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий. – Минск: БНТУ, 2006. – 200 с.

70. **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.

71. **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.

72. **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.

73. **Щеглова, Р.А.** Повышение надежности замкового соединения буровой штанги путем магнитно-абразивной обработки наружной резьбовой поверхности /**Р.А. Щеглова**//, Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «РОССИЯ МОЛОДАЯ» Кемерово, 18-21 апреля 2023 года.

74. **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.

75. 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.

76. Янгиров, Ф.Н., Улучшение показателей бурения применением новой смазки в резьбовых соединениях бурильного инструмента: автореферат дис. кандидата технических наук : 05.15.10. - Уфа, 1999. - 190 с.

77. Ясин, Н. Разработка технологических решений предупреждения аварий при бурении скважин моделированием резьбовых соединений бурильного инструмента : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 25.00.15. Росс. гос. ун-т нефти и газа им. И.М.Губкина - Москва, 2019. - 169 с.

78. Ящерицын, П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын, М.Т. Забавский, Л.М. Кожуро, Л.М. Акулович. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 272 с.

79. Ящерицын, П.И. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. – Минск: Физико-технический ин-т, 1997. – 416 с.

80. Ящерицын, П.И., Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев, А.И. Барботько. – Минск, 1976. – 326 с.

81. Baron, Y.M. Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring / Y.M. Baron, S. –L. Ko, J.I. Park // Key Engineering Materials Vols. 291-292 (2005) pp. 291-296.

82. Beheshti, M. Fatigue Life Prediction of Threaded Pipe Connection ... Doctor of Philosophy/ Milad Beheshti; [Place of protection: Brunel University]. – United Kingdom, 2017. - 252 p.

83. Feygin, S., Kreman, G. and Igelstyn, L. (1998) US Patent No. 5846270.

84. Fethullayev, E. K. Analysis of the effect of heat generated during machining the screw threads on the temperature of the surface layers. / Fethullayev E.K, Karatas C, Kafkas F, Akyildiz H.K // In: Third international advanced technologies symposium Ankara, Turkey; 2003. p. 49–60 [in Turkish].

85. Fox, M. (1994) ‘Magnetic abrasive finishing of rollers’/ M. Fox, K. Agrawal, T. Shinmura, R. Komanduri //, Annals of CIRP, Vol. 43, No. 1, pp.181–184.

86. Handa, K. (2008) ‘New spherical magnetic abrasives with carried diamond particles for internal finishing of capillary tubes’/ K. Handa, H. Yamaguchi, H. Zhou //, Diamond & Related Materials, Vol. 17, No. 7–10, pp.1434–1437.

87. Jain, V.K. Specific energy and temperature determination on abrasive flow machining process / V.K. Jain, R.K. Jain // Int. J. Mach. Tool Manuf. 41 (12) (2001) 1689-1704.

88. Jain, V.K. Modeling and simulation of surface roughness in magnetic abrasive finishing using non-uniform surface profiles / V.K. Jain, S.C. Jayswal, P.M. Dixit // Mater. Manuf. Process., 22: 256-270, 2007.

89. Jayswal, S.C. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process / S.C. Jayswal, V.K. Jain, P.M. Dixit // Int. J. Adv. Manuf. Technol., 26: 477-490, 2005.

90. Keksin, A.I. Methods of increasing the quality of the thread pitches / A.I. Keksin, V.V.Maksarov // Agronomy Research. – 2013. – Vol. 11, №1. – pp.139-146.

91. Khairy, A.B. ‘Aspects of surface and edge finish by magnetoabrasive particles’, Journal of Materials Processing Technology. - 2001. - Vol. 116, pp.77–83.

92. Khafizov, I.I. Problems of development of electrochemical production of Russia and possibility of their decision/ I.I. Khafizov, I.G. Nurullin, Z.B. Sadykov//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2018. - Vol.412.

93. Kim, J.D. Simulation for the prediction for surface-accuracy in magnetic abrasive machining / J.D. Kim, M.S. Choi // J. Mater. Process. Technol. 53 (1995) 630-642.

94. Kremen, G. (1999) ‘Material removal rate and surface roughness of the magnetic abrasive processes’/ G. Kremen, E. Elsayed, S. Feygin, L. Igelshteyn //, 3rd International Machining And Grinding Conference, Cincinnati, Ohio.

95. Kwak, J.S Parameter optimization and development of prediction model for second generation magnetic abrasive polishing of AZ31B Plate / J.S Kwak, C.M. Shin // Proc. of the Int. MultiConference of engineers and computer scientists. 2011 Vol. II, IMECS 20011, March 16-18, 2011.

96. Method and device for magnetic-abrasive machining of parts: Patent Number 5,775,976: Int. Cl B24B 1/00; U.S. Cl. 451/36 / Gennady Kremen, Brooklyn, N.Y; Savva Feigyn; Leonid Igelshteyn, both of Manalapan, N.J.; Assignee: Scientific Manufacturing Technologies, Inc., Brooklyn, N.Y. – Filed: Mar. 27, 1997: Date of Patent: Jul. 7, 1998, Appl. No.: 827,158. – 9 p.

97. Rodriguez, C. J. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing [Text]/ C. J. Rodriguez. – Kassel: Kassel university press GmbH, 2009. – 205 c.

98. Shinmura, T. Development of spindle-finish type finishing apparatus and its finishing performance using a magnetic abrasive machining process / T. Shinmura, E. Hitano, K. Takazava // JSPE, 20 (2) (1986) 79-84.

99. Shinmura, T. (1995) ‘Study on a new internal finishing process by the application of magnetic abrasive machining’/ T. Shinmura, H. Yamaguchi //, JSME International Journal, Vol. 38, No. 4, pp.798–804.

100. Shinmura, T. Study on magnetic abrasive process – effect of various types of magnetic abrasives on finishing characteristics / T. Shinmura, K. Takazava, E. Hitano, T. Aizawa // J. Jpn. Soc. Prec. Eng. 21 (2) (1987) 139-141.

101. Shinmura, T. Study on magnetic abrasive process – process principle and finishing possibility / T. Shinmura, K. Takazava, E. Hitano, T. Aizawa // J. Jpn. Soc. Prec. Eng. 18 (4) (1984) 347-348.

102. Singh, S. Development of magneto abrasive flow machining process / S. Singh, H.S. Shan // Int. J. Mach. Tool Manuf. 42 (2002) 953-959.

103. Wang, A.C. (2009) ‘Study the characteristics of magnetic finishing with gel abrasive’. / A.C. Wang, S.J. Lee //, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 49, pp.1063–1069.

104.Wang, Y. ‘Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing’/ Y. Wang, D. Hu //, International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. Vol. 45, pp.43–49.

105.Yamaguchi, H. Development of a new precision internal machining processing on alternating magnetic field / H. Yamaguchi, T Shinmura, M. Takenada // Prec eng. – 2003. – N27. – P. 51-58.

106.Yamaguchi, H. (2008) ‘Development of spherical abrasive made by plasma spray’/ H. Yamaguchi, K. Handa // Journal of Manufacturing Science and Engg., Vol. 130, No. 3, pp.031107-1–031107-9.

107.Yin, S. A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing / S. Yin, T. Shinmura // Int. J. of Mach. Tools and Manuf. Vol. 44, no. 4, pp. 383-390, Mar. 2004.

108.Yin, S. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy / S. Yin, T. Shinmura // Int. J. of Mach. Tools and Manuf. Vol. 44, no. 12-13, pp. 1297-1303, Oct. 2004.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технические характеристики станка, приборов

Таблица А.1 – Технические характеристики прибора *Waveline W920RC*

Модель	W920RC
Назначение	Измерение параметров контура и шероховатости
Диапазон линейных измерений	
По оси Z	16 мм
По оси X	200 мм
Диапазон измерений шероховатости	
Ra	0,01...260 мкм
Датчик	
Модификация датчика	Surfscan
Радиус закругления шупа	2 мкм
Измерительное усилие	0,75...30 мН

Таблица А.2 – Технические характеристики твердомера портативного *Константа ТУ*

Характеристика	Значение
Диапазон измерения, HB	20...650
Диапазон измерения, HRC	20...70
Диапазон измерения, HV	75 ... 1000
Шкала твердости	HRC, HB, HV, HRA, HRB, HRN15, HRN30, HRN45, HRT15, HRT30, HRT45, HSD, σВ, HLD
Направление измерения	90°
Погрешность, HV	±12
Повторяемость, HV	3
Диапазон рабочих температур, °С	-20...+50
Испытательная нагрузка	50 Н
Тип наконечника	Алмазный наконечник

Таблица А.3 – Технические характеристики микроскопа инвертированного *Leica DM ILM HC*

Параметр прибора	Характеристика
Увеличение	От 5х – опционально до 2000х
Методы контрастирования	Светлое поле, поляризация
Ход предметного столика по ХУ	60х40 мм
Ход фокусировки по Z	12 мм
Режимы освещения	Отраженный свет
Источник освещения	Светодиодный белый
Вес образцов	До 8 кг
Размеры микроскопа: Фронтальное расположение с корпусом лампы: Ширина (макс.) : Резьба объектива: Диаметр окуляра: Диаметр фильтра:	650 мм 320 мм M25 x 0,75 23,2 мм 32 мм (опционально 50 мм)

Таблица А.4 – Технические характеристики камеры солевого тумана
TDC 1200 PN

Параметр прибора	Характеристика
Вес	220 кг
Температурный режим	До +55 °С
Рабочий диапазон частот	50 Гц
Полезный объем	1105 л
Номинальный ток	18 А

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на способ магнитно-абразивной обработки
замкового соединения буровой штанги

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2797796

**СПОСОБ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ
ЗАМКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ БУРОВОЙ ШТАНГИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Максаров Вячеслав Викторович (RU), Кексин Александр Игоревич (RU), Щеглова Радмила Алексеевна (RU)*

Заявка № 2022128603

Приоритет изобретения 03 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 08 июня 2023 г.Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 03 ноября 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 797 796**⁽¹³⁾ **C1**
 (51) МПК
B24B 31/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B24B 31/112 (2023.02)

(21)(22) Заявка: 2022128603, 03.11.2022
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 03.11.2022
 Дата регистрации:
 08.06.2023
 Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 03.11.2022
 (45) Опубликовано: 08.06.2023 Бюл. № 16
 Адрес для переписки:
 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2,
 ФГБОУ ВО СПГУ, Патентно-лицензионный
 отдел

(72) Автор(ы):
 Максаров Вячеслав Викторович (RU),
 Кексин Александр Игоревич (RU),
 Щеглова Радмила Алексеевна (RU)
 (73) Патентообладатель(и):
 Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования "Санкт-Петербургский горный
 университет" (RU)
 (56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: UA 94657 C2, 25.05.2011. SU 716648
 A1, 25.02.1980. SU 1440676 A1, 30.11.1988. RU
 2098258 C1, 10.12.1997. UA 44708 U, 12.10.2009.
 CN109333164 A, 15.02.2019.

(54) СПОСОБ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАМКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ БУРОВОЙ ШТАНГИ

(57) Реферат:
 Изобретение относится к магнитно-абразивной обработке машиностроительных изделий, в частности к обработке наружных и внутренних резьбовых поверхностей изделий. Способ включает обработку резьбовых поверхностей изделия в магнитно-абразивной массе, установку буровой штанги между полюсными наконечниками магнитной системы разноименной полярности, заполнение рабочих зазоров магнитно-абразивным порошком и задание относительного перемещения вращающейся буровой штанги и полюсным наконечникам. При обработке наружной резьбовой поверхности полюсные наконечники устанавливают параллельно углу наклона резьбы и задают им вращательное движение с

одновременной синхронизацией их поступательного и осцилляционного движений с поступательным движением буровой штанги. При обработке внутренней резьбовой поверхности полюсные наконечники устанавливают параллельно оси буровой штанги. Во внутреннее пространство устанавливают конусный наконечник со смещением относительно собственной оси и оси буровой штанги. Задают конусному наконечнику вращательное движение с эксцентриситетом и одновременной синхронизацией его поступательного движения с поступательным движением буровой штанги. Обеспечивается равномерная обработка резьбовых поверхностей, повышается качество. 6 ил.

RU 2 797 796 C 1

RU 2 797 796 C 1

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Акт о промышленном внедрении результатов диссертации**

Утверждаю

Генеральный директор
АО «НПП «Пирамида»

О.А. Фомичев

« 04 » 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации
Карениной Радмилы Алексеевны
по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения

Комиссия научно-технического совета в составе:

Председателя: директора научно-технического центра Борисова И.А.

Членов комиссии: директора по производству Чичева С.А., главного инженера Островершенко А.Н., заместителя директора центра качества Вершинина С.В., ведущего технолога Глухова А.М.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг финишной магнитно-абразивной обработкой», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в производственном процессе АО «НПП «Пирамида» при разработке технологии окончательной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений.

Обработка резьбовых поверхностей замковых соединений посредством магнитно-абразивного полирования по предлагаемому способу позволила достигнуть заданного качества резьбовой поверхности, повысить эксплуатационные характеристики изделия.

Результаты магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений показали, что шероховатость поверхности может достигать $Ra = 0,4 - 0,5$ мкм по среднему диаметру пятна контакта резьбовых поверхностей (шероховатость заготовки составляла $Ra = 3,56 - 4,94$ мкм).

При этом обеспечивается равномерность покрытия обрабатываемой поверхности магнитно-абразивной массой.

Результаты диссертационного исследования Карениной Р.А. использованы в технологических процессах финишного изготовления резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг в 2024 году, к которым предъявляются повышенные требования по качеству.

Благодаря применению предлагаемого способа для обработки резьбовых поверхностей замковых соединений посредством магнитно-абразивного полирования, реализуется повышение эффективности процесса обработки вышеуказанных изделий.

Председатель комиссии



Борисов И.А.

Члены комиссии:



Чичев С.А.



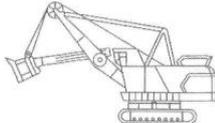
Островершенко А.Н.



Вершинин С.В.



Глухов А.М.

 ИЗ-КАРТЭКС ИМЕНИ П.Г.КОРОБКОВА	Общество с ограниченной ответственностью "ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова"	
	г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. город Колпино, тер. Ижорский завод, д. 40, к.2, литера ДН 196650, тел.:(812) 647-06-09, факс: (812) 647-74-10	
	iz-kartex@iz-kartex.com	www.uralmash-kartex.ru
	ОКПО 74816237 / ОГРН 1047855158780	ИНН 7817301375 / КПП 781701001

УТВЕРЖДАЮ



И.О. главного конструктора

Д.Ю. Шефов

2025 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации
КАРЕНИНОЙ Радмилы Алексеевны
по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения

Комиссия научно-технического совета в составе:

Председателя: И.О. главного конструктора Шефова Д.Ю.

Членов комиссии: начальника отдела, к.т.н. Донченко Т.В., главного конструктор проекта Тихомирова С.А., главного конструктор проекта Гольденберга Р.Я., инженера-конструктора Гуров А.А.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг финишной магнитно-абразивной обработкой», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в производственном процессе ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» при разработке технологии финишной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений в виде:

- применения в технологическом процессе способа магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг;

- методики расчета варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки, обеспечивающей формирование качества резьбовых поверхностей.

Результаты магнитно-абразивной обработки резьбовых поверхностей замковых соединений показали, что шероховатость поверхности может достигать $Ra = 0,4 - 0,5$ мкм по среднему диаметру пятна контакта резьбовых поверхностей (шероховатость заготовки

составляла $Ra = 3,56 - 4,94$ мкм). При этом обеспечивается равномерность покрытия обрабатываемой поверхности магнитно-абразивной массой.

Использование результатов диссертационного исследования Карениной Р.А. в технологических процессах ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» в 2025 году позволило повысить качество резьбовых поверхностей в процессе их окончательной обработки и увеличить ресурс замкового соединения буровой штанги.

Председатель комиссии

И.О. главного конструктора



Шефов Д.Ю.

Члены комиссии:

Начальник отдела, к.т.н.



Донченко Т.В.

Главный конструктор проекта



Тихомиров С.А.

Главный конструктор проекта



Гольденберг Р.Я.

Инженер-конструктор



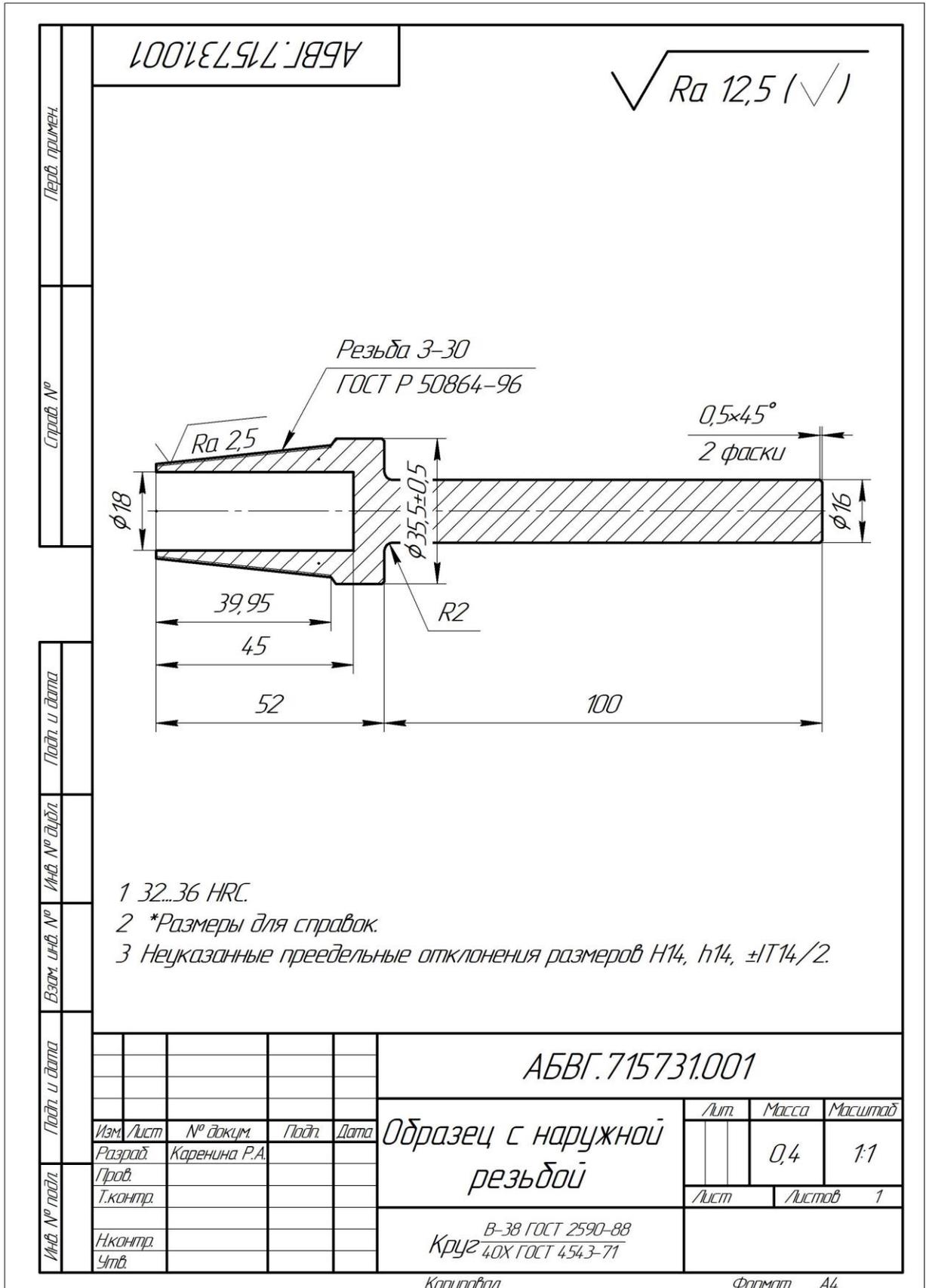
Гуров А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Технологическая карта изготовления образцов с наружной/внутренней резьбой

№ операции	Рабочий центр/Технологическая операция	Время выполнения, мин	Примечание
1	JET HBS-1018W Ленточнопильный станок	11	Отрезать заготовку $\varnothing 38$ длиной 160 мм
	Заготовительная (резчик)		
2	16K25 токарно-винторезный станок облегченный с повышенной линией центров	30	Точить с припуском 3 мм на диаметры и 1 мм на линейные размеры. Сверлить и расточить отверстие.
	Токарная		
3	Электропечь ПВП 500	6	Улучшение 32...36 HRC согласно ТТ чертежа.
	Термообработка		
4	Doosan Puma GT2100 токарно-револьверный станок	11	Точить в чистовую по наружным и внутренним диаметрам, выдерживая размеры согласно чертежу. Точить фаски и радиусы. Нарезать резьбу.
	Токарная ЧПУ		
5	Слесарный участок	2	Зачистить заусенцы
	Слесарная		
6	Стол ОТК	3	Проверить 100 % от партии деталей.
	Контрольная		
Итого:		63	

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Чертежи образцов

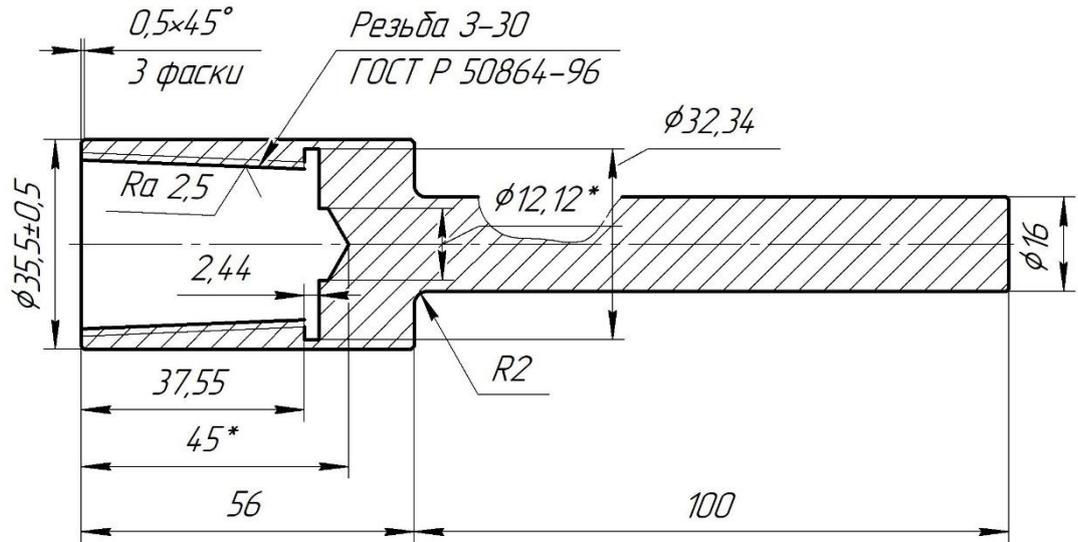


АБВГ.715731.002

$\sqrt{Ra\ 12,5\ (\checkmark)}$

Перв. примен.

Справ. №



Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

- 1 32...36 HRC.
- 2 *Размеры для справок.
- 3 Неуказанные предельные отклонения размеров H14, h14, ±IT14/2.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Каренина Р.А.		
Проб.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

АБВГ.715731.002

Образец с внутренней резьбой

Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1

В-38 ГОСТ 2590-88
Круг 40X ГОСТ 4543-71

Копировал

Формат А4