

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Брянский государственный технический университет»

На правах рукописи

Шевцов Михаил Юрьевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ДЕТАЛЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛА ИМПЛАНТИРОВАНИЕМ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА**

Специальности: 2.5.6 – Технология машиностроения

2.5.3 – Трение и износ в машинах

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Горленко Александр Олегович

Брянск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Анализ состояния вопроса обеспечения износостойкости цилиндрических поверхностей трения деталей машин.....	14
1.1. Применение деталей с цилиндрическими поверхностями в узлах трения машин.....	14
1.2. Виды дифференциалов и причины выхода из строя.	25
1.3. Конструкторские и технологические методы обеспечения износостойкости поверхностей трения.....	37
1.4. Трение и изнашивание цилиндрических поверхностей	44
1.5. Современные технологические методы повышения износостойкости цилиндрических поверхностей трения	49
1.6. Результаты и выводы по первой главе	58
2. Методика проведения исследований	60
2.1. Методика проведения теоретических исследований	60
2.2. Методика проведения экспериментальных исследований	61
2.2.1. Материалы, образцы, детали.....	61
2.2.2. АСНИ для испытаний цилиндрических поверхностей трения.....	65
2.2.3. Методы измерения параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя	70
2.2.4. Методика исследования химического состава и структуры материала	72
2.3. Оборудование и технология ИКЭМО цилиндрических поверхностей трения	75
2.3.1. Установка для ИКЭМО	75
2.3.2. Инструментальная и технологическая оснастка	77
2.4. Результаты и выводы по второй главе	85
3. Оценка параметров контактного взаимодействия деталей с цилиндрическими поверхностями трения	86
3.1. Контактное взаимодействие трущихся цилиндрических поверхностей	86
3.2. Модель изнашивания цилиндрических поверхностей трения	95

3.3. Проверка адекватности модели	99
3.4. Результаты и выводы по третьей главе	102
4. Обеспечение износостойкости поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой.....	103
4.1. Совершенствование теоретических основ и технологии электромеханического метода упрочнения поверхностей трения деталей машин	103
4.2. Электромеханический метод имплантирования высокотвердых дисперсных частиц с последующим упрочнением поверхностного слоя	107
4.3. Процессы формирования микро- и наноструктур поверхностного слоя при ИКЭМО.....	112
4.4. Результаты и выводы по четвертой главе	117
5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	118
5.1. Сравнительные испытания износостойкости современных твердых антифрикционных покрытий и модифицированных поверхностных слоев трения	118
5.2. Исследования влияния режимов ИКЭМО на качество и износостойкость обрабатываемых поверхностей	123
5.3. Исследования влияния ИКЭМО на структурное состояние поверхностного слоя	127
5.4. Сравнительный анализ возможностей технологии ИКЭМО по сравнению с другими современными технологическими методами.	136
5.5. Результаты и выводы по пятой главе	137
6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	138
6.1. Технологические возможности и рекомендации по применению технологии ИКЭМО.....	138
6.2. Реализация результатов исследования применительно к паре трения «сателлит – ось сателлита»	139
6.3. Расчет экономической эффективности	145

6.4. Результаты и выводы по шестой главе.....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.....	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	154
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	166
Приложение А.	167
Приложение Б.....	168
Приложение В	170

Введение

Актуальность темы исследования. В диссертационной работе рассматриваются вопросы, связанные с решением проблемы повышения износостойкости деталей дифференциала, имеющих цилиндрические поверхности трения, в частности пары трения «сателлит – ось сателлита».

Одна из основных проблем, общая для всех отраслей техники – это повышение износостойкости и долговечности узлов машин и механизмов. Повышение износостойкости увеличивает эксплуатационные показатели и межремонтные сроки обслуживания, сокращает время простоя в ремонте и снижает его стоимость, повышает безотказность работы.

Так, по данным экспертов от 1/4 до 1/3 всей вырабатываемой человечеством энергии безвозвратно теряется на преодоление сил трения в подвижных сопряжениях машин. В этой связи нет сомнений в актуальности проблем, связанных с реализацией мероприятий по снижению затрат, обусловленных трибологическими проблемами. Успешное решение любой научно-технической проблемы возможно лишь на основе ее всестороннего изучения. Стремление повысить надежность машин, привело машиностроителей обратить свое внимание на подвижные, а также неподвижные сопряжения, бесперебойная работа которых связана с протеканием целого комплекса явлений и процессов, изучаемых современной трибологией и триботехникой.

Эксплуатационные характеристики, особенно износостойкость, деталей с цилиндрическими поверхностями трения в значительной степени зависят от качества их поверхностного слоя (геометрия поверхности: отклонения формы, волнистость, шероховатость; а также физико-механические свойства), формирующегося на этапе производства. Интенсивность изнашивания напрямую связана со скоростями, нагрузками, мощностью и режимами работы оборудования. Поэтому актуальной задачей является разработка и совершенствование методов обработки поверхностного слоя, обеспечивающих повышение износостойкости.

В настоящее время развитию эффективных технологий обработки мешает отсутствие научно обоснованных методик:

- расчёта износа деталей;
- выбора и нормирования параметров качества сопрягаемых поверхностей;
- выбора методов и режимов упрочняющей и отделочной обработки с учётом критерия износостойкости.

Это препятствует достижению оптимальных эксплуатационных характеристик и повышению качества поверхностных слоев цилиндрических деталей. Пара трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала переднего моста специального колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач», имеет недостаточную износостойкость. При отказе или выработке ресурса пары трения «сателлит – ось сателлита», имеется необходимость замены дифференциала на новый. Лимитирующим элементом в данной паре трения является ось сателлитов. В связи с тем, что дифференциал имеет высокую стоимость (132660,81 руб. в ценах 2024 г.), очевидна необходимость повышения износостойкости пары трения «сателлит – ось сателлита» как минимум в 1,5...2 раза.

Безусловно, исследования, направленные на повышение износостойкости пары трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала, остаются крайне актуальными в контексте современного машиностроения. Ключевым аспектом в этом направлении является выбор рациональных технологических методов обработки, ориентированных на достижение максимальной износостойкости поверхностей трения деталей дифференциала. Рациональный подбор способов обработки позволяет не только продлить срок службы узлов, но и обеспечить надежную и эффективную работу механизма в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок.

Особенно перспективной техникой в данном случае представляется упрочняющая обработка. Этот метод позволяет осуществлять целенаправленное воздействие на поверхность трения, что способствует минимизации износа контактирующих деталей. Одним из наиболее эффективных подходов является

создание многослойных модифицированных поверхностных слоев, которые обладают высокими физико-механическими свойствами.

Выбор конкретного метода упрочняющей обработки зависит от характеристик материала, условий эксплуатации и специфических требований к компонентам дифференциала. Комплексный подход, включающий анализ условий работы, подбор оптимальных технологических параметров и контроль качества обработанных поверхностей, является залогом успешного повышения износостойкости и долговечности узлов.

Таким образом, дальнейшие исследования в области технологического обеспечения износостойкости пара трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала, с акцентом на упрочняющие методы обработки и создание многослойных модифицированных поверхностей, имеют значительный потенциал для улучшения эксплуатационных характеристик деталей дифференциала и обеспечения их надежной работы в течение длительного времени.

В связи с этим тема диссертации является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Настоящее исследование является логическим продолжением работ отечественных и зарубежных ученых: В.И. Аверченкова, А.А. Барзова, В.Ф. Безъязычного, А.М. Дальского, Д.Г. Евсеева, И.В. Маталина, В.С. Мухина, А.Н. Овсеенко, Д.Д. Папшева, Э.В. Рыжова, В.М. Смелянского, В.К. Старкова, А.Г. Сулова, А.М. Сулимы, Т.Р. Томаса, А.В. Тотая, В.П. Федорова, Л.А. Хворостухина, Ю.Г. Шнейдера, П.И. Ящерицина и др., изучавших вопросы технологического обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин; А.Ю. Албагачиева, Э.Д. Брауна, Н.А. Буше, Д.И. Гаркунова, А.О. Горленко, И.Г. Горячевой, Дж. Гудьера, Н.Б. Демкина, М.Н. Добычина, Ю.Н. Дроздова, С.М. Захарова, В.В. Измайлова, В.Я. Кершенбаума, И.В. Крагельского, Ю.К. Машкова, Н.М. Михина, Н.К. Мышкина, Е.А. Памфилова, А.С. Проникова, Д. Тейбора, В.П. Тихомирова, В.В. Шульца, А.В. Чичинадзе и др., исследовавших процессы контактного взаимодействия, трения и изнашивания деталей машин.

Имеющиеся в данной области научные достижения требуют дальнейшего развития. В частности, не решены вопросы, связанные с адекватным моделированием процессов контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения, а также технологическим обеспечением их износостойкости и ресурса на требуемом уровне, с применением недорогостоящих материалов и технологий их обработки.

Цель диссертационной работы: повышение износостойкости деталей дифференциала, имеющих цилиндрические поверхности трения, в частности пары трения «сателлит – ось сателлита», имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие способы обеспечения и повышения износостойкости цилиндрических поверхностей трения деталей машин.

2. Разработать модели контактного взаимодействия и изнашивания трущихся цилиндрических поверхностей, с помощью которых представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия.

3. Установить закономерности взаимосвязи режимов процесса имплантирования материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением (технология ИКЭМО) с показателями износостойкости и качества поверхностного слоя цилиндрических поверхностей трения.

4. Провести экспериментальные исследования на трение и изнашивание цилиндрических поверхностей, с целью установления возможностей технологических методов их обработки в повышении износостойкости.

5. Провести анализ результатов исследования и расчет экономической эффективности от использования технологии ИКЭМО.

Объектом исследования являются детали дифференциала, имеющие цилиндрические поверхности трения, работающие в условиях скользящего

контакта и граничного трения, в частности, детали дифференциала переднего моста специального колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач» (пара трения «сателлит – ось сателлита»).

Предметом исследования являются процессы контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей трения, а также технологические методы их обработки, в частности технология ИКЭМО (процесс имплантирования в поверхностный слой материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением).

Научная новизна работы:

- разработана технология комбинированной электромеханической обработки (ИКЭМО), заключающаяся в насыщении поверхностного слоя карбидами вольфрама и углеродом из консистентного состава, содержащего графитный смазочный материал с карбидами вольфрама, при электромеханическом воздействии, с последующим электромеханическим упрочнением, что позволяет получать композиционно упрочненный имплантированными карбидами вольфрама поверхностный слой с подслоем стабилизированного вольфрамом переохлажденного аустенита, армированного сеткой из карбида вольфрама (п. 4, п. 7 паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения).

- разработаны модели процесса контактного взаимодействия и изнашивания, которые посредством компьютерного статистического расчета характеристик контактного взаимодействия трущихся цилиндрических поверхностей (*фактической* площади контакта, сближения контактирующих поверхностей, *фактического* давления; интенсивности изнашивания, с учетом параметров шероховатости, *коэффициента упрочнения*, физико-механических свойств, условий трения), позволяют выполнять сравнительную оценку эффективности технологических параметров ИКЭМО (п. 2, п. 10 паспорта специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах).

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

- модификация поверхности трения стали за счет образования на ней поверхностного слоя, имплантированного и композиционно упрочненного карбидами вольфрама, наряду с формированием подслоя, состоящего из ячеистого переохлажденного аустенита, стабилизированного вольфрамом и армированного сеткой из карбида вольфрама, состоящей из агрегатированных наноразмерных частиц карбида вольфрама, методом ИКЭМО позволяет существенно повысить износостойкость поверхностей трения, что подтверждается триботехническими испытаниями;

- на основе выработанных научных положений разработаны модель, алгоритмы и программное обеспечение для определения характеристик контактного взаимодействия трущихся цилиндрических поверхностей: *фактической* площади контакта; сближения контактирующих поверхностей; *фактического* давления; с учетом параметров шероховатости, *коэффициента упрочнения* и физико-механических свойств поверхностного слоя;

- на основе предложенной модели изнашивания, учитывающей параметры качества поверхностного слоя, в частности параметры шероховатости, коэффициент упрочнения и физико-механические свойства, а также условия трения, представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия;

- разработана технология комбинированной электромеханической обработки и определены рациональные режимы технологического процесса получения износостойкого модифицированного поверхностного слоя, имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением, начиная с обработки заготовки и заканчивая финишной обработкой детали;

- применение технологии ИКЭМО возможно на машиностроительных предприятиях, в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления. Использование результатов исследований позволяет повысить износостойкость

деталей в 1,5 – 2 раза и более, и является эффективным способом повышения эксплуатационных показателей деталей машин.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования базируются на основных положениях технологии машиностроения и трибологии, современной статистической теории и методологии, теории контактного взаимодействия деталей, молекулярно- механической теории трения, а также на широком применении математических методов исследований и математического аппарата дифференциального и интегрального исчислений.

При выполнении работы применялись современные методы оценки параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, химического состава и структуры материала, а также показателей, характеризующих износостойкость.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки по повышению износостойкости цилиндрических поверхностей трения, в частности пары трения «сателлит – ось сателлита», на основе получения модифицированного поверхностного слоя, имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением, имеющие существенное значение для развития страны.

3. Модель процесса контактного взаимодействия, позволяющая определять характеристики контактного взаимодействия трущихся цилиндрических поверхностей: *фактическую* площадь контакта, сближение контактирующих поверхностей, *фактическое* давление; с учетом параметров шероховатости, *коэффициента упрочнения* и физико-механических свойств поверхностного слоя.

4. Модель изнашивания, учитывающая параметры качества поверхностного слоя, в частности параметры шероховатости, коэффициент упрочнения, физико-механические свойства, а также условия трения, на основе которой представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения применением технологии ИКЭМО.

5. Полученные методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа зависимости между режимами ИКЭМО и интенсивностью изнашивания J_h , параметром шероховатости R_a , коэффициентом упрочнения поверхностного слоя k ;

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность основных научных положений, выводов и результатов, сформулированных в диссертации, подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований, полученным патентом на изобретение РФ, результатами комплексных сравнительных испытаний износостойкости на образцах и натурных деталях.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных научных конференциях: Международной научно-практической конференции «Технология машиностроения и материаловедение» (Новокузнецк, 2017); Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и системная модернизация страны» (Курск, 2017); VIII Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век» (Курск, 2018); Международной научно-практической конференции «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (Санкт-Петербург, 2018); Международной научно-практической конференции «Технология машиностроения и материаловедение» (Новокузнецк, 2018); 6-й Международной научно-технической конференции «Качество в производственных и социально-экономических системах» (Курск, 2018); 12-й Международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ – 2020)» (Курск, 2020); Международной конференции «Проблемы прикладной механики» (Брянск, 2021); Proceedings International Conference «Problems of Applied Mechanics» (New York, 2021); Международной научно-технической конференции «Время научного прогресса» (Волгоград, 2023).

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 27 печатных работах (8 научных статей опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 4 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus). Получен патент на изобретение (приложение А).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, оформленного в виде основных результатов и выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 163 страницах машинописного текста, включающего 18 таблиц, 78 рисунков, списка литературы из 109 наименований и приложений на 6 страницах.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1. Применение деталей с цилиндрическими поверхностями в узлах трения машин

Детали с цилиндрическими поверхностями трения широко применяются в различных механизмах автомобильной, строительной, сельскохозяйственной техники, общего машиностроения. Цилиндрическая поверхность (тело вращения) — простейшая форма поверхности, образуемая вращением прямой линии по окружности параллельно принятой оси. Детали, имеющие форму тел вращения, можно разбить на три класса: валы, втулки и диски. К классу «валов» относятся такие детали как валы, валики, оси, пальцы, цапфы и т. п. Эти детали образуются в основном наружной поверхностью вращения — цилиндрической, иногда конической и несколькими торцовыми поверхностями. К классу «втулок» относятся втулки, вкладыши, гильзы, буксы и т. п. Эти детали характеризуются наличием наружной и внутренней цилиндрических поверхностей. В класс деталей «диски» входят диски, шкивы, маховики, кольца, фланцы. Все они образуют различные пары трения такие как цилиндр-поршень (трение скольжения), вал-втулка (трение качения, скольжения) [36, 60, 65, 67, 68].

Рассмотрим несколько примеров узлов трения с цилиндрическими поверхностями.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Цилиндропоршневая группа (ЦПГ), кривошипно-шатунный механизм (КШМ), их износ зачастую определяет ресурс двигателя до капитального ремонта. При эксплуатации для разных двигателей характерны большие колебания величин износа, что обусловлено различным качеством их изготовления (технологический фактор) и различными условиями эксплуатации и обслуживания (эксплуатационный фактор). Детали ЦПГ подвергаются коррозионно-механическому водородному, абразивному

изнашиванию, причем, согласно последним исследованиям, ведущим видом изнашивания этих деталей является абразивное и сопутствующее ему водородное. Наряду с абразивным, водородным коррозионно-механическим изнашиванием в местах, где нарушается непрерывная масляная пленка (в верхней части цилиндра), возможно схватывание, а в отдельных случаях – даже появление задиров (рисунок 1.1) [56, 58].



Рисунок 1.1 – Износ при схватывании цилиндропоршневой группы дизельного двигателя

Также примером применения цилиндрических поверхностей трения, являются, валы силовой передачи трансмиссии. Они имеют следующие характерные дефекты: износ боковой поверхности шлицев и посадочных поверхностей под подшипники качения, изгиб и скручивание. У шлицевых валов, которые сопрягаются с блочными и несимметричными шестернями, наблюдается неравномерный износ шлицев по длине. В случае замены только одной из деталей сопряжения (шестерни или вала) шестерня будет устанавливаться с некоторым перекосом, при этом будут ускоренно изнашиваться зубья, а также появятся дополнительные осевые нагрузки и как следствие износ посадочных отверстий под подшипники качения. Нагруженные длинные валы трансмиссии могут иметь прогиб и биение, что вызывает усиленный износ шестерен и подшипников.

В мостах трансмиссии имеет место повышенный износ осей сателлитов,

сопровождается выкрашиванием контактирующей поверхности, влиянием абразивных частиц и усталостным износом (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Износ осей сателлитов

Карданные передачи, являясь ключевыми элементами трансмиссии, подвержены разнообразным дефектам, которые могут существенно влиять на их надежность и долговечность. Рассмотрим основные аспекты, связанные с износом и нарушениями посадки в этих системах.

Основные дефекты карданных передач:

1. Износ шлицевого сопряжения: Скользящая вилка и карданный вал взаимодействуют через шлицевые соединения. Постоянное трение и нагрузка приводят к постепенному износу шлицев, что может вызвать люфт и снижение передачи крутящего момента.

2. Износ цапф крестовины и игольчатых подшипников: Цапфа крестовины является местом соединения кардана с подшипниками. Износ на этих участках может привести к неравномерной работе крестовины, шумам и вибрациям.

3. Повреждения отверстий во вилке и фланце: Со временем отверстия,

через которые проходят игольчатые подшипники, могут деформироваться или изнашиваться, что нарушает правильное расположение подшипников и усугубляет износ остальных компонентов.

Причины нарушений посадки:

1. Изменение размеров и геометрической формы: Износ рабочих поверхностей деталей приводит к изменению их размеров и формы, что нарушает точную посадку. Например, овальность или конусность могут вызвать перекосы и вибрации.

2. Нарушение взаимного расположения: Даже небольшие отклонения в расположении рабочих поверхностей могут привести к неравномерному распределению нагрузок и ускоренному износу.

3. Изменение физико-химических свойств материалов: Высокие температуры или коррозионные среды могут изменить свойства материалов, делая их более подверженными износу.

Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания:

1. Нагрузки на сопряженные детали: Более высокие нагрузки увеличивают силу трения и, соответственно, износ.

2. Скорость перемещения трущихся поверхностей: Высокие скорости могут приводить к увеличению температуры и ускоренному износу.

3. Температурный режим работы: Повышенные температуры могут способствовать разложению смазочных материалов и изменению свойств материалов деталей.

4. Применение смазочных материалов: Недостаточное или неправильное применение смазочных материалов увеличивает трение и износ. Правильный выбор и поддержание смазки критически важны для долговечности узлов.

5. Степень агрессивности окружающей среды: Пыль, влага и другие агрессивные среды могут ускорить коррозию и износ деталей.

Меры по предотвращению износа сопряженных деталей:

1. Регулярное техническое обслуживание: Периодическая проверка состояния карданных передач позволяет своевременно выявлять износ и принимать

меры.

2. Правильный выбор смазочных материалов: Использование качественных смазок, соответствующих условиям эксплуатации, снижает трение и предотвращает износ.

3. Контроль качества материалов: Применение высококачественных материалов с устойчивостью к износу и коррозии увеличивает долговечность передач.

4. Оптимизация условий эксплуатации: Снижение перегрузок, поддержание рекомендованных температурных режимов и защита от агрессивных сред способствуют продлению срока службы карданных передач.

5. Точность сборки и балансировка: Правильная сборка и балансировка крестовины и других компонентов уменьшают вибрации и равномерно распределяют нагрузки, предотвращая преждевременный износ.

Понимание причин и механизмов износа в карданных передачах позволяет инженерам и техническим специалистам разработать эффективные стратегии для их предотвращения, обеспечивая надежную и долговечную работу узлов машин. (рисунок 1.3).

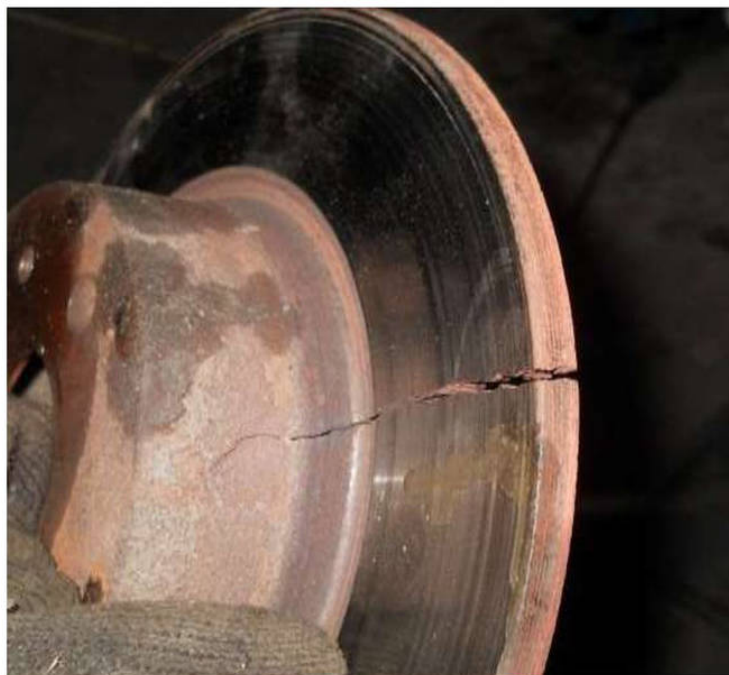


Рисунок 1.3 – Нарушение температурного режима работы тормозного диска

Нарушение взаимного расположения рабочих поверхностей является критическим фактором, влияющим на функциональность и долговечность механических агрегатов. Изменение расстояния между осями цилиндрических поверхностей может привести к неравномерной передаче нагрузок, что в свою очередь вызывает дополнительные напряжения в деталях. Отклонения от параллельности или перпендикулярности осей и плоскостей способны нарушить баланс вращающихся частей, что может вызвать вибрации и шум в работе оборудования. Такие отклонения также способствуют преждевременному износу подвижных элементов, снижая эффективность и увеличивая затраты на обслуживание.

Причины данных нарушений часто связаны с неравномерным износом рабочих поверхностей, который может быть обусловлен различными факторами эксплуатации, такими как перегрузки, неправильная смазка или эксплуатация при неподходящих условиях. Внутренние напряжения, возникающие в деталях во время производства или ремонта, также играют значительную роль. Например, неправильное термическое или механическое обработка может привести к остаточным деформациям, которые со временем проявляются в виде смещений и кручений деталей под воздействием эксплуатационных нагрузок.

Особенно уязвимы к таким нарушениям корпусные детали, которые служат основой для других компонентов агрегата. Перекосы в корпусных элементах приводят к изменению геометрии всей конструкции, что усугубляет износ других деталей и может привести к их быстрому выходу из строя. Это создает порочный цикл, где ухудшение состояния одних элементов ускоряет деградацию остальных, снижая общую надежность и срок службы устройства.

Для предотвращения подобных проблем важно уделять внимание точности обработки и сборки деталей, а также регулярно проводить техническое обслуживание и мониторинг состояния оборудования. Использование высококачественных материалов и современных технологий производства может значительно снизить риск возникновения внутренних напряжений и деформаций. Кроме того, внедрение систем контроля геометрии и состояния рабочих

поверхностей позволит своевременно выявлять и устранять отклонения, предотвращая развитие серьезных дефектов и повышая общую эффективность работы механических агрегатов.

Ремонт карданной передачи чаще всего требуется при нарушении сроков ТО или проведении некачественно обязательных работ. Поломки могут возникать и при сильных механических воздействиях на карданный вал, отмечающихся при небрежной эксплуатации оборудования и автотранспортных средств. Устройство карданной передачи не отличается сложностью, и к основным проблемам, которые могут возникать относятся следующие:

- разбалтывание креплений;
- износ шеек (рисунок 1.4);
- физический износ крестовин или шарниров (рисунок 1.5).



Рисунок 1.4 – Износ шеек



Рисунок 1.5 – Износ крестовин

Стоит отметить, что эксплуатировать транспортное средство, карданный вал которого неисправен, не только недопустимо правилами, но и просто опасно.

Наиболее уязвимым местом карданной передачи можно считать шарниры, которые могут быстро изнашиваться вне зависимости от привода машины, особенно при эксплуатации в достаточно экстремальных условиях: пересеченная местность, тяжелое бездорожье, гонки (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Шарнир карданной передачи

Еще одним примером использования цилиндрических поверхностей трения является ходовая часть гусеничных самоходных машин, при работе, кроме больших ударных нагрузок и частых перегрузок, постоянно испытывает действие пыли, грязи и влаги. Все это сопровождается усиленным изнашиванием ее составных частей. По данным ведущих мировых производителей (АО «ММЗ», АО

«Концерн «УралВагонЗавод», АО «ЧТЗ», Caterpillar, Komatsu) затраты на ремонт и техническое обслуживание ходовой части в большинстве случаев составляют до 50% общих затрат.

У гусеничных самоходных машин наибольшему износу подвержены проушины и пальцы гусениц, особенно при работе на песчаных почвах. По мере изнашивания гусеничных цепей увеличивается их шаг, в результате возникают чрезмерные нагрузки на звеньях гусениц и зубьях ведущих колес, влекущие за собой усиленное изнашивание указанных сопряжений.

Износ поверхностей проушин и концов втулок гусеничного звена (рисунок 1.7) обусловлен трением между пальцем и втулкой, в результате чего увеличивается радиальный зазор между этими деталями. Втулка смещается из центрального положения (относительно оси проушины), при этом в одном месте зазор между втулкой и проушиной уменьшается. В результате втулка вращается и трется в этом месте о поверхность проушины.

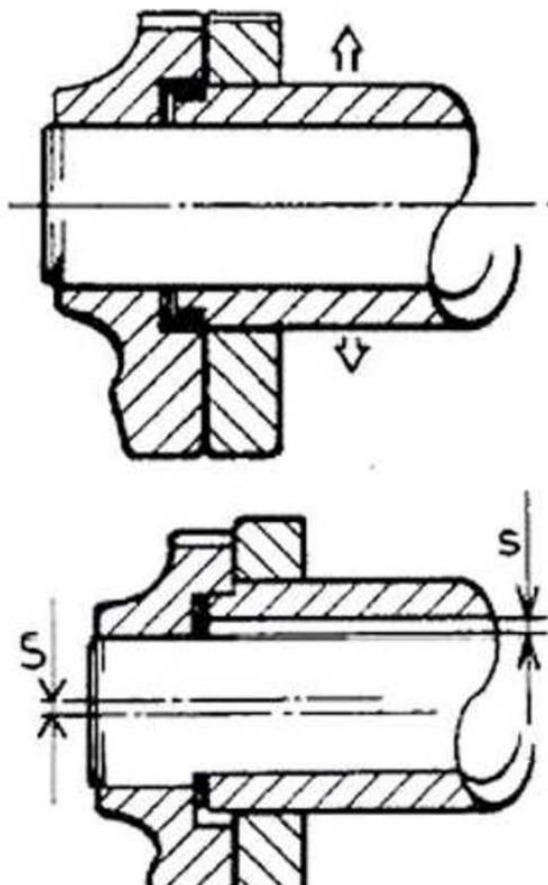


Рисунок 1.7 – Износ поверхностей проушин и концов втулок

Основным фактором, ускоряющим износ является скорость, масса и мощность машины; ширина башмаков и натяжение гусеничной цепи.

Равномерный износ одной стороны пальца (рисунок 1.8) соответствует зоне износа сопряженной поверхности втулки. Процесс называется внутренним износом в шарнире и часто является поводом для ремонта или замены деталей ходового механизма.



Рисунок 1.8 – Износ поверхностей пальца гусеничного звена

Причиной является контакт и взаимное перемещение пальца и втулки. Основными факторами, ускоряющие износ, является неисправность уплотнения (для шарниров гусеничных цепей с консистентной или жидкой смазкой), чрезмерное натяжение цепи, работа на высокоабразивном грунте (гусеничные цепи «сухого» типа), скорость машины.

Износ боковых поверхностей ведущего колеса или сменных секторов (рисунок 1.9). Износ этого типа обычно не является определяющим при оценке общего износа ведущего колеса и необходимости замены.

Факторами, ускоряющими износ, являются частые или резкие повороты машины. Скорость движения машины, нагрузка и мощность. Ударные нагрузки, абразивное воздействие, усталостный износ, фреттинг.

В связи с перечисленными факторами защита от износа должна быть многофакторной. Применение только смазочного материала, хоть и является важным элементом, не может в одиночку обеспечить полную защиту от износа.

Применение смазочных материалов эффективно предотвращает схватывание, но не исключает его полностью. Более того, они не способны предотвратить другие необратимые процессы, неизбежно возникающие при трении:

- Взаимное внедрение неровностей: Даже идеально отполированные поверхности имеют микронеровности, которые при контакте под нагрузкой внедряются друг в друга, вызывая деформацию и разрушение материала.

- Пластическая деформация: Под воздействием нагрузок материал поверхности может претерпевать необратимые изменения формы, что приводит к изменению геометрии деталей и ускорению износа.

- Окисление и разрушение окисных пленок: Кислород, содержащийся в воздухе, вступает в реакцию с поверхностью металла, образуя оксидные пленки. Эти пленки могут иметь различную прочность и при определенных условиях разрушаться, открывая доступ к нижележащему металлу и способствуя дальнейшему износу.

Важно отметить, что разрушение поверхностей деталей может происходить и без разрыва смазочной пленки. Многократное взаимодействие шероховатостей под нагрузкой, даже при наличии смазки, приводит к накоплению повреждений и постепенному разрушению поверхностного слоя.

Переход к гладкой поверхности при граничной смазке, когда толщина смазочной пленки сравнима с размерами шероховатостей, является особенно опасным. В этом случае высока вероятность вытеснения смазочного материала из зоны контакта («масляное голодание»), что приводит к непосредственному контакту поверхностей и, как следствие, к схватыванию.

Таким образом, для эффективной защиты от износа необходим комплексный подход, включающий:

1. Выбор оптимальных материалов с учетом условий эксплуатации: твердость, устойчивость к окислению, способность к упрочнению.
2. Применение соответствующей обработки поверхности: повышение

твердости и износостойкости, создание защитных покрытий.

3. Использование эффективной системы смазки: подбор смазочного материала с оптимальными вязкостными характеристиками и противозадирными свойствами, обеспечение необходимого количества смазки в зоне трения.

4. Оптимизация конструкции узла трения: снижение нагрузки, уменьшение скорости скольжения.

Только комплексный подход с учетом всех факторов, влияющих на износ, позволит обеспечить долговечность и надежность работы механизмов. [68, 84].

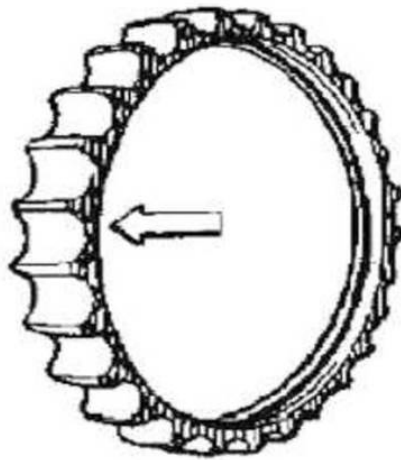


Рисунок 1.9 – Износ боковых поверхностей ведущего колеса

1.2. Виды дифференциалов и причины выхода из строя.

Дифференциал представляет собой ключевой элемент трансмиссии автомобиля, выполняя несколько важных функций. Его основная задача заключается в передаче, изменении и распределении крутящего момента между двумя потребителями, такими как колёса или мосты. Это обеспечивает возможность вращения колес или мостов с разной угловой скоростью, что особенно необходимо при поворотах или движении по неровной поверхности.

В зависимости от типа приводной системы автомобиля, расположение дифференциала может варьироваться:

– Заднеприводные автомобили: Дифференциал находится в картере заднего моста (редуктора), обеспечивая привод только ведущим задним колёсам.

– Переднеприводные автомобили: Дифференциал интегрирован в коробку передач, что может быть как механической (МКП), так и автоматической (АКП). Это позволяет распределять крутящий момент между ведущими передними колёсами.

– Полноприводные автомобили: здесь дифференциалы устанавливаются как в переднем, так и в заднем мостах (редукторах) для привода всех колёс. Также в полноприводных системах может быть задействован межосевой дифференциал, который обеспечивает распределение мощности между передними и задними мостами.

Межколесные дифференциалы предназначены для распределения крутящего момента именно между колёсами, тогда как межосевые дифференциалы отвечают за распределение мощности между различными мостами или осями автомобиля.

Конструкция дифференциала основана на принципах планетарного редуктора. В зависимости от типа зубчатой передачи, используемой внутри редуктора, различают несколько видов дифференциалов:

1. Конический дифференциал: использует конические шестерни, позволяя эффективно передавать моменты на различные оси.

2. Цилиндрический дифференциал: применяет цилиндрические шестерни, обеспечивая стабильную передачу мощности и допуская определённые угловые смещения.

3. Червячный дифференциал: включает червячную передачу, что позволяет достичь большого передаточного отношения и обеспечивает самоблокировку системы.

Каждый тип дифференциала обладает своими преимуществами и используется в зависимости от требований к трансмиссии конкретного транспортного средства. Правильный выбор и настройка дифференциала существенно влияют на динамику и управляемость автомобиля, особенно в условиях различных дорожных покрытий и режимов движения. (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Виды конструкций дифференциалов [63]

Конический дифференциал чаще всего используется в качестве межколесного, то есть для распределения крутящего момента между ведущими колесами одной оси. Его конструкция основана на зубчатых конических шестернях, которые обеспечивают компактность и эффективность передачи момента. Конические дифференциалы хорошо подходят для легковых автомобилей и небольших грузовиков.

Цилиндрический дифференциал обычно ставится как межосевой на полноприводных машинах. Зубчатые цилиндрические шестерни позволяют передавать больший крутящий момент между осями по сравнению с коническим дифференциалом. Это важно для полного привода, где нагрузки на трансмиссию выше. Цилиндрический дифференциал обеспечивает необходимую прочность и надежность.

Червячный дифференциал - наиболее универсальный тип. Благодаря червячной передаче он может устанавливаться и как межколесный, и как межосевой дифференциал. Червячный механизм позволяет получить большое передаточное отношение в компактном размере. Также он способен передавать значительный крутящий момент. Это делает червячные дифференциалы хорошим выбором как для легковых, так и для тяжелых полноприводных автомобилей.

Симметричный дифференциал распределяет крутящий момент поровну между ведущими колесами независимо от разницы в их угловых скоростях. Такое

свойство делает его идеальным межколесным дифференциалом. Он позволяет колесам вращаться с разными скоростями на поворотах, обеспечивая хорошую управляемость и устойчивость. Симметричные дифференциалы широко применяются на легковых автомобилях.

Несимметричный дифференциал делит крутящий момент в заданной пропорции, например 40:60. Поэтому его используют как межосевой, чтобы распределять тягу между передней и задней осью в нужном соотношении. Это позволяет улучшить проходимость и управляемость полноприводного автомобиля в сложных дорожных условиях. Несимметричные дифференциалы ставят на кроссоверы, внедорожники, пикапы.

Каждый тип автомобильных дифференциалов имеет свои особенности и преимущества. Выбор конкретного типа зависит от компоновки трансмиссии (передний, задний, полный привод), требований к прочности и распределению момента, условий эксплуатации. Правильно подобранный дифференциал является важным элементом, влияющим на ходовые качества, проходимость и надежность автомобиля в целом. [63].

Устройство самого распространенного симметричного конического дифференциала показано на рисунке 1.11. Составные части дифференциала являются характерными и для других видов дифференциалов.

Корпус дифференциала, также известный как чашка дифференциала, является важной частью трансмиссии автомобиля. Он выполняет несколько ключевых функций в процессе передачи крутящего момента от двигателя к ведущим колесам.

Главная передача, состоящая из ведущей и ведомой шестерен, передает крутящий момент на корпус дифференциала. Ведомая шестерня главной передачи жестко закреплена на корпусе, обеспечивая прочное соединение и эффективную передачу вращательного движения. Внутри корпуса дифференциала размещены сателлиты, которые играют решающую роль в распределении крутящего момента между левым и правым ведущими колесами. Сателлиты установлены на осях, позволяющих им свободно вращаться. В конструкции дифференциалов грузовых

автомобилей обычно используются четыре сателлита для обеспечения высокой прочности и надежности. Оси сателлитов в дифференциалах грузовиков часто выполняются в виде крестовины. Такая конструкция обеспечивает прочное и стабильное положение сателлитов, позволяя им эффективно передавать крутящий момент на полуосевые шестерни. Полуосевые шестерни, также называемые шестернями полуосей, находятся в зацеплении с сателлитами и передают крутящий момент на полуоси, а затем на ведущие колеса автомобиля. Благодаря такому механизму, состоящему из сателлитов и полуосевых шестерен, крутящий момент может распределяться между левым и правым колесами в необходимой пропорции, обеспечивая плавное прохождение поворотов и улучшая управляемость автомобиля. Прочная конструкция корпуса позволяет ему выдерживать высокие нагрузки, возникающие при передаче крутящего момента, особенно в тяжелых условиях эксплуатации грузовых автомобилей.

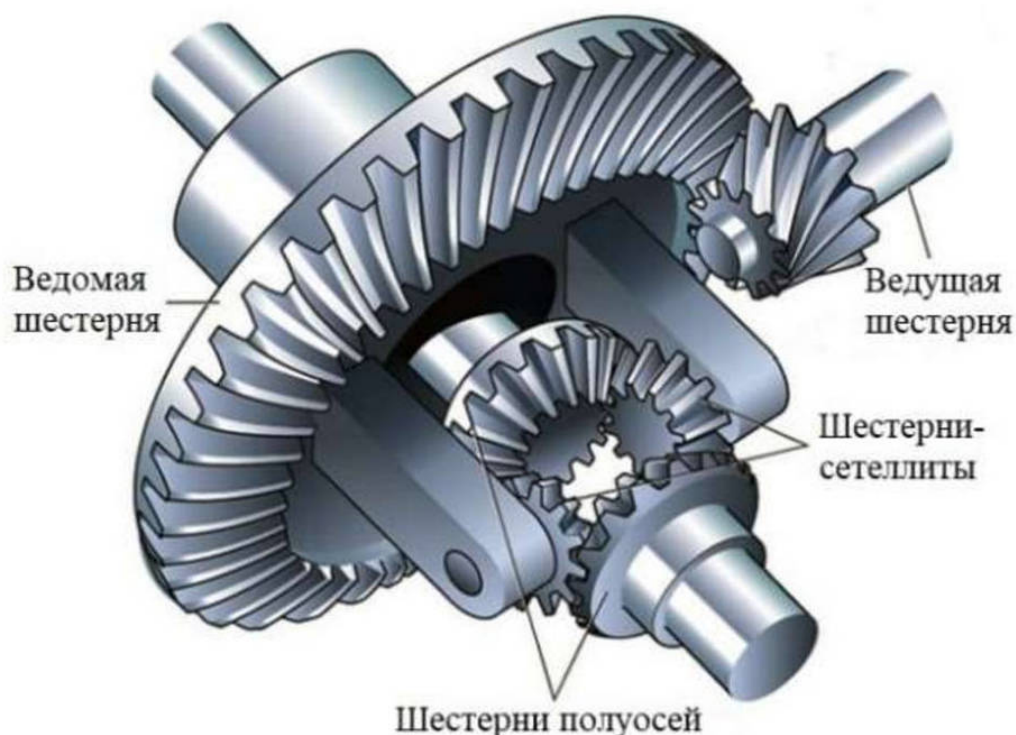


Рисунок 1.11 – Устройство симметричного конического дифференциала. [46]

Коническая главная передача с гипоидным зацеплением является одним из наиболее распространенных видов главных передач, используемых в конструкции автомобильных мостов и трансмиссий. Основная особенность данного типа

передачи заключается в том, что оси ведущей и ведомой шестерен не лежат в одной плоскости, а смещены относительно друг друга на определенное расстояние, называемое гипоидным смещением. (рисунок 1.12).

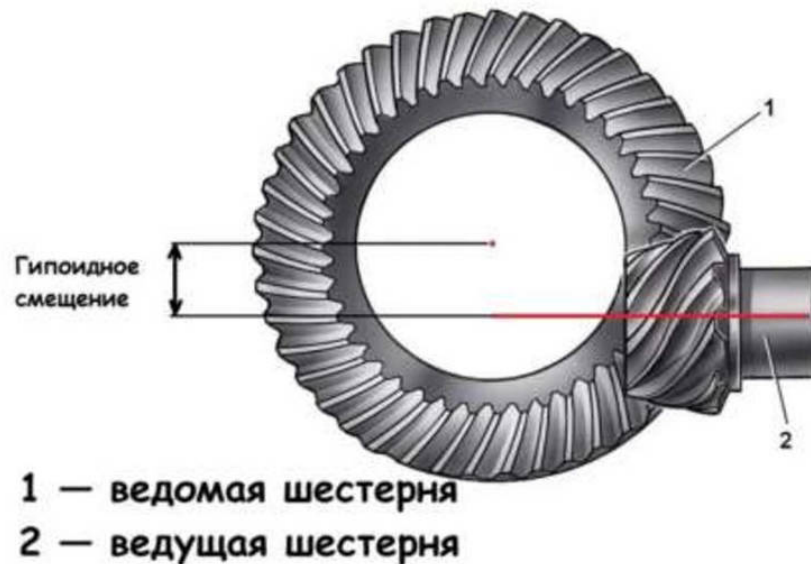


Рисунок 1.12 – Гипоидная главная передача.

Симметричный межколесный дифференциал работает в трех основных режимах: прямолинейное движение, движение в повороте и движение по скользкой дороге с пробуксовкой одного из ведущих колес.

При движении по прямой оба колеса испытывают одинаковое сопротивление. Крутящий момент от главной передачи делится поровну между шестернями полуосей через корпус дифференциала. Сателлиты остаются неподвижными, а полуосевые шестерни вращаются с одинаковой угловой скоростью, равной скорости ведомой шестерни главной передачи. (рисунок 1.13).

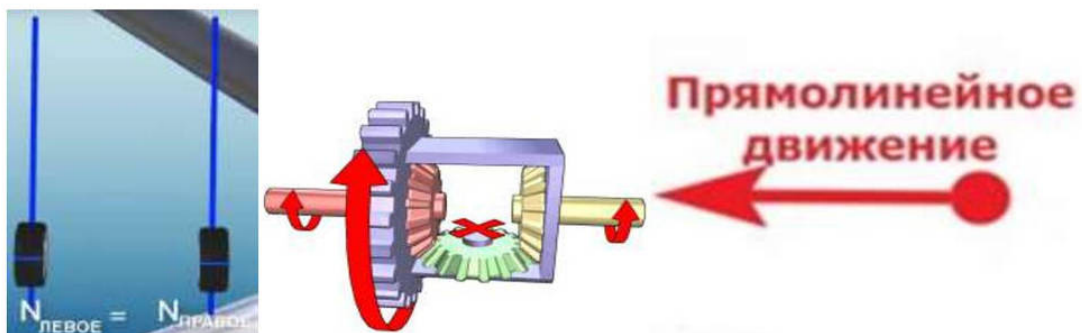


Рисунок 1.13 – Схема работы дифференциала при прямолинейном движении.

В повороте внутреннее колесо проходит меньший путь, чем внешнее, поэтому должно вращаться медленнее во избежание проскальзывания. Дифференциал позволяет полуосям вращаться с разными скоростями. Шестерня внутреннего колеса замедляется, вынуждая сателлиты обкатываться по ней и ускорять шестерню внешнего колеса. Так колеса вращаются с разными скоростями без пробуксовки, а крутящий момент по-прежнему делится поровну (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Схема работы дифференциала при движении в повороте.

На скользкой дороге буксующее колесо вращается все быстрее, а второе колесо из-за этого останавливается. Из-за низкого сцепления буксующего колеса с дорогой, тяговое усилие и крутящий момент на нем невелики. Симметричный дифференциал передает такой же небольшой момент и на второе колесо. (рисунок 1.15) [63].



Рисунок 1.15 – Буксование правого колеса автомобиля на скользкой дороге.

Примеры поломок дифференциала - превышение скорости в поворотах и неправильное использование блокировок. Из-за разницы скоростей колес сателлиты активно вращаются на осях. Чем выше скорость сателлитов, тем сильнее нагружаются поверхности осей. Длительные нагрузки нарушают масляную пленку между трущимися деталями. Масло перегревается и испаряется, смазка ухудшается. Начинается полусухое трение, поверхности осей и сателлитов задираются.

Дальнейшая работа поврежденного дифференциала приводит к увеличению задигов. В итоге сателлиты могут заклинить на осях, вызвав разрушение деталей. Своевременный ремонт или замена дифференциала помогут избежать серьезных поломок.

В такой ситуации дифференциал функционирует в ненормальном режиме. Сателлиты начинают интенсивно обкатываться по осям только при различии в угловых скоростях полуосевых шестерен, что происходит при прохождении поворотов. Увеличение скорости вращения сателлитов приводит к росту нагрузок на поверхности их осей. Продолжительное воздействие высоких нагрузок нарушает смазывание в парах трения "сателлит - ось".

Смазка этих деталей осуществляется разбрызгиванием масла внутри картера дифференциала. Однако при длительных перегрузках масляная пленка разрушается из-за перегрева и испарения смазки. Ее становится недостаточно для поддержания нормального гидродинамического режима. Вместо жидкостного трения возникает граничное или полусухое трение. Это приводит к образованию задигов - участков схватывания и вырывания материала на контактирующих поверхностях сателлитов и осей (рисунок 1.16).

Возникшие повреждения продолжают прогрессировать даже после прекращения пробуксовки и выравнивания скоростей колес. При дальнейшей эксплуатации автомобиля задиры провоцируют заклинивание сателлитов на осях. Область повреждений растет до тех пор, пока не происходит резкая остановка сателлита из-за его заклинивания. Это в свою очередь вызывает разрушение оси

сателлита или его самого. Таким образом, последствия перегрузки дифференциала могут проявиться даже через некоторое время при его работе в штатном режиме, приводя к серьезным поломкам. (межмолекулярный адгезионный прихват поверхностей).



Рисунок 1.16 – Износ оси сателлитов переднего моста специального колесного шасси, в следствии нарушения скоростей движения.

Часто можно встретить разрушение всех осей крестовины сателлитов (рисунки 1.17 – 1.19). Разрушение осей произошло в результате их силового скручивания из-за адгезионного схватывания к их поверхности сателлитов, так же причина разрушения крестовины сателлитов дифференциала переднего моста связана с длительным буксованием ведущих колес грузового автомобиля при

выключенной водителем функции блокировки и носит эксплуатационный характер.



Рисунок 1.17 – Внешний вид разрушенного дифференциала первого ведущего моста грузового автомобиля.



Рисунок 1.18 – Разрушение всех осей крестовины сателлитов дифференциала первого ведущего моста.

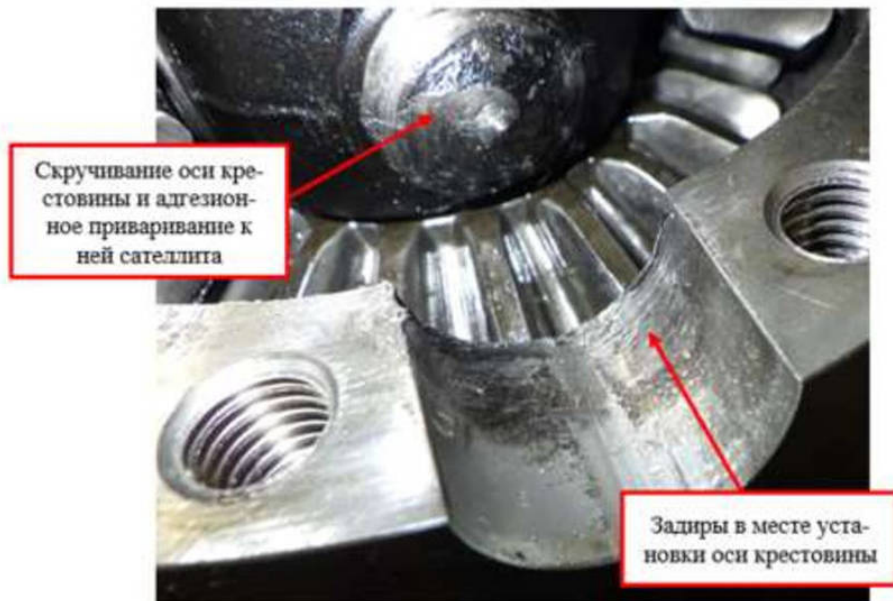


Рисунок 1.19 – Сателлит с фрагментом оси крестовины.

Также стоит отметить, что при повреждении оси сателлитов и высокой степени износа пары трения «сателлит – ось сателлита», увеличивается зазор в месте сопряжения, что приводит к смещению пятна контакта зубьев шестерен сателлитов с шестернями полуосей (рисунок 1.20). В результате, происходит пластическая деформация зуба и разрушение дифференциала.



Рисунок 1.20 – Смещение пятна контакта в зацеплении шестерни и пластическая деформация зубьев шестерни полуоси.

Поломки дифференциалов и мостов можно встретить не только из-за износа, но и не соблюдения требований эксплуатационной документации при включении

блокировки межколесных и межтележечных дифференциалов во время движения (рисунок 1.21.).



Рисунок 1.21 – Разрушение корпуса редуктора переднего моста, в следствие включения блокировки межколесного дифференциала во время движения.

Результаты анализа приведенных примеров свидетельствуют о том, что наиболее распространенной причиной выхода из строя дифференциалов современных автомобилей являются эксплуатационные отказы. Тем не менее, при проведении экспертных исследований дифференциалов автомобилей необходимо принимать во внимание и другие потенциальные факторы, способные привести к их отказам, среди которых можно выделить следующие:

1. Наличие производственных дефектов материалов, использованных для изготовления деталей дифференциала (оси, шестерней, стопорных колец оси), таких как металлургические дефекты, отклонения химического состава, дефекты упрочненного поверхностного слоя и прочие.
2. Недостаточное количество трансмиссионного масла в картере трансмиссии или его несоответствие требуемым качественным характеристикам.
3. Нарушения в процессе регулировки зубчатого зацепления главной передачи трансмиссии.

Для изготовления осей сателлитов дифференциалов современных автомобилей, как правило, применяются конструкционные низкоуглеродистые

цементуемые стали (например, 19ХГН, 18ХГ и аналогичные) с типовой термической обработкой, включающей цементацию, закалку и низкотемпературный отпуск. Альтернативным вариантом являются конструкционные среднеуглеродистые улучшаемые стали (40Х, 40ХГМ и подобные), подвергаемые улучшению (закалке с последующим высокотемпературным отпуском) и дальнейшему азотированию поверхности. Шестерни дифференциала изготавливаются из конструкционных низкоуглеродистых цементуемых сталей (20ХГНМ, 20ХН и т.п.) с применением типовой термической обработки, состоящей из цементации, закалки и низкотемпературного отпуска.

1.3. Конструкторские и технологические методы обеспечения износостойкости поверхностей трения

Продолжительность эксплуатации основных видов машин, механизмов и оборудования до момента проведения капитального ремонта в значительной мере зависит от износостойкости деталей, входящих в состав их узлов трения [12, 16, 22, 23, 58, 62]. Общеизвестным фактом является то, что подавляющее большинство деталей (80-85%) выходит из строя вследствие интенсивного изнашивания. Недостаточная долговечность деталей приводит к возникновению экономически неоправданно высокого уровня потребности в запасных частях и их расхода. Решение проблемы обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей машин сводится к решению двух фундаментальных задач: конструкторской и технологической.

Конструктивные способы повышения долговечности и надежности работ трущихся деталей решаются конструктором на стадии проектирования узлов трения. Основными задачами в этом плане являются: оценка и выбор схем узла трения машины с позиции влияния ее на износостойкость и надежность конструкции; выбор материалов пары трения; назначение размеров и формы деталей; обеспечение нормальной работы узла трения в заданном режиме и защита

от перегрузок; обеспечение эксплуатации с минимальными затратами; защита узла трения от аварийных повреждений.

Исследования показывают, что различные поверхности деталей изнашиваются по-разному. Наибольший износ, достигающий 52%, наблюдается у цилиндрических поверхностей. Конические, сферические элементы и шлицы подвергаются износу в меньшей степени - около 3% для каждого типа. Пазы, канавки и лыски изнашиваются на 5%, резьбовые части - на 10%. Плоские поверхности и зубья шестерен страдают от износа лишь на 1-2%, профильные фасонные элементы - на 1%. Трещины и изломы составляют 9% от общего износа, а отклонения формы - 13%. Таким образом, цилиндрические участки являются самыми уязвимыми к износу, что требует повышенного внимания к обеспечению их износостойкости при работе в условиях трения.

Современный подход к обеспечению эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений строится на двух ключевых направлениях. Первое относится к конструкторским задачам и включает подбор оптимальных материалов, определение размеров деталей, задание точности и качества их поверхностей. Эти параметры выбираются исходя из функций деталей и нацелены на достижение требуемых характеристик при работе. Второе направление охватывает технологические аспекты - обеспечение заданной на этапе проектирования точности размеров и свойств поверхностного слоя. Для этого применяются соответствующие методы обработки и контроля качества при изготовлении деталей.

При конструировании машин используются различные приемы для повышения износостойкости узлов и деталей. Прежде всего, это снижение нагрузок, температур и скоростей в зонах трения, что делает условия работы более щадящими. Также важно защищать контактирующие поверхности от попадания абразивных частиц и агрессивных веществ. Кроме того, необходимо избегать режимов работы с недостаточной смазкой или полным ее отсутствием, что предотвращает ускоренный износ и повреждения трущихся деталей.

Инженеры-конструкторы применяют различные подходы для повышения износостойкости деталей и узлов. Они стремятся добиться равномерного распределения износа, избежать критических повреждений поверхностей, таких как задиры и схватывания. Большое значение придается возможности ремонта и восстановления изношенных элементов, что упрощает техническое обслуживание и продлевает время эксплуатации оборудования.

Для реализации этих задач тщательно подбираются материалы контактирующих поверхностей, оптимизируется форма деталей и кинематика механизмов. Применяются эффективные системы смазки, надежные уплотнения, фильтры и отстойники для очистки смазочных материалов. Конструкция узлов должна обеспечивать удобный доступ для осмотра, ремонта и замены быстроизнашивающихся элементов. Все это в комплексе позволяет повысить безотказность работы и ресурс машин и механизмов.

Таким образом, комплексный подход, включающий как конструкторские, так и технологические меры, позволяет эффективно решать проблему износостойкости деталей машин и их соединений, обеспечивая их надежную и длительную эксплуатацию в разнообразных условиях работы.

Подбор материалов, способных эффективно противостоять трению и износу в механических узлах, представляет собой нелёгкую инженерную задачу. Износостойкость не сводится к единственной характеристике материала, поскольку её проявление зависит от конкретных условий эксплуатации. Износ может принимать разнообразные формы и уровни интенсивности. Кроме того, при выборе материалов следует учитывать совокупность их свойств, гарантирующих надёжность конструкции в целом, на чём неоднократно акцентируют внимание научные работы.

Выявить оптимальные параметры качества взаимодействующих поверхностей, определяющие их работоспособность, также не просто. Для каждого отдельного узла трения, обладающего собственными габаритами, типом материала и особыми рабочими режимами (нагрузка, скорость, характеристика смазки и т. д.), характерен свой уникальный набор критериев качества поверхностей, что

подтверждается рядом исследований [17, 11, 70].

При этом одной из основных сложностей при выборе оптимальных параметров качества служит нелинейность зависимостей между эксплуатационными показателями и функциональными свойствами поверхностных слоёв деталей [89].

Таким образом, выбор материалов и определение параметров качества поверхностных слоев деталей являются комплексными задачами, требующими учета множества факторов и глубокого понимания процессов трения и изнашивания.

Для оценки состояния и характеристик поверхностного слоя деталей прибегают к разностороннему комплексу параметров, которые можно разделить на несколько основных групп:

Геометрические параметры [108, 75, 83, 87], отражающие особенности макро- и микрогеометрии поверхности. Сюда относятся:

- Отклонения реальной геометрической формы (например, круглости, прямолинейности либо плоскостности) от заданного эталона, определяющие точность формообразования.
- Показатели волнистости, фиксирующие регулярные изменения рельефа с относительно крупными шагами.
- Характеристики шероховатости, позволяющие судить о наличии тонких микронеровностей с небольшим шагом.
- Направление обработочных следов, т. е. текстура поверхности, которая описывает упорядоченность микронеровностей в определённом направлении.

Параметры, характеризующие механические и физико-механические свойства поверхностного слоя [2, 107, 26, 68, 98]. К ним относятся:

- Базовые механические свойства материала (предел текучести, модуль упругости, коэффициент Пуассона, твёрдость и т. п.), определяющие реакцию материала на внешние нагрузки.
- Показатели упрочнённости слоёв, куда входят микротвёрдость близ

поверхностных слоёв (HV), коэффициент упрочнения (k), глубина (h_n), а также степень (U_n) и градиент упрочнения. Эти величины позволяют выявить, насколько сильно изменяются механические свойства поверхностных участков по сравнению с остальной массой материала.

- Характеристики остаточных напряжений, возникающих при разнообразных технологических операциях. В первую очередь изучаются макронапряжения, сопоставимые по масштабам с габаритами детали. Значение остаточных напряжений у поверхности, их максимальная величина и глубина залегания относятся к ключевым параметрам.

- Структурные характеристики материала (устройство кристаллической решётки, размер и ориентация зёрен, наличие и тип дефектов). Сюда же входят параметры фрагментации структуры, углы разориентировки, концентрации вакантных позиций и плотность различного рода дислокаций.

Физико-химические свойства, определяющие характер взаимодействия поверхности с окружающей средой [64, 68, 70, 85, 98]. К их числу относят:

- Адсорбционные возможности (физическая адсорбция и хемосорбция), отражающие способность поверхности поглощать молекулы извне.
- Устойчивость к окислению, свидетельствующую о сопротивлении материала действию кислорода.
- Образование защитных или функциональных плёнок, влияющих на трибологические характеристики и на защиту поверхности.
- Процессы диффузии, при которых чужеродные атомы могут внедряться в материал и оказывать влияние на свойства деталей.

Таким образом, комплексная оценка качества поверхностного слоя с использованием перечисленных групп показателей позволяет прогнозировать его эксплуатационные характеристики и выбирать оптимальные методы обработки для достижения требуемого уровня качества.

Управление эксплуатационными характеристиками деталей машин достижимо посредством нормирования комплекса параметров качества их поверхностных слоев. При этом ключевым аспектом является включение в данный

комплекс минимально необходимого числа параметров, обеспечивающих простоту и экономическую эффективность метрологического и технологического контроля в производственных условиях.

Технологические методы предупреждения износа базируются на широких возможностях управления износостойкими свойствами деталей на этапах их производства. К таким методам относятся физико-химические, тепловые и механические методы обработки поверхностных слоев материалов; технологии плакирования, нанесения покрытий, наплавки рабочих поверхностей, модификации структуры материалов с применением различных физических полей и высокоэнергетических частиц.

Несмотря на значительное разнообразие существующих технологических решений, на сегодняшний день разработка методов комплексного обеспечения параметров качества поверхностного слоя, определяющих эксплуатационные характеристики деталей машин, все еще не достигла необходимого уровня. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин включает в себя выбор оптимальных условий обработки их рабочих поверхностей, таких как методы и режимы обработки, характеристики инструментария и другие технологические параметры. Данный выбор производится с целью достижения заданных характеристик поверхности при минимизации производственных затрат, а также для возможности корректировки параметров обработки непосредственно в процессе производства [2, 19, 46, 47, 75, 83, 79].

Существующие многочисленные нормативные документы, регламентирующие режимы резания [82], в основном ориентированы на обеспечение лишь параметров высоты неровностей профиля поверхности Ra и Rz . В данном контексте перспективным направлением представляется внедрение комплексных показателей качества рабочих поверхностей деталей. Одним из таких показателей является комплексный параметр S_x , характеризующий совокупность свойств поверхностного слоя.

Применение комплексных показателей, подобных S_x , в сочетании с дальнейшим совершенствованием технологических методов обработки позволит

более эффективно управлять качеством поверхностных слоев деталей машин и, как следствие, повышать их эксплуатационные характеристики [79, 89]:

$$C_x = \frac{(R_a W_z H_{max})^{1/6}}{t_m^{3/2} S_m^{1/2} k^{2/3} \lambda'}, \quad (1.1)$$

где R_a , $t_m^{3/2}$, $S_m^{1/2}$, W_z и H_{max} – параметры шероховатости, волнистости и макроотклонений; k – коэффициент упрочнения поверхностного слоя; λ' – коэффициент, учитывающий влияние остаточных напряжений.

В ходе приработки контактирующих поверхностей постепенно меняются их физико-механические характеристики и микрорельеф, что выражается в изменении картины деформаций с преимущественно пластических на преобладающе упругие. В результате снизившихся макро- и волнистых искажений возрастает реальная площадь соприкосновения, а количество взаимодействующих микронеровностей возрастает, обеспечивая более равномерное распределение нагрузок. Установлено, что уровень шероховатости, формирующийся при приработке, в значительной мере определяется свойствами исходного металла, режимами термомеханического воздействия и качеством окончательной обработки. Особое влияние оказывают факторы, определяющие пластичность материала, строение приповерхностного слоя и остаточные напряжения, поскольку именно они напрямую связаны с устойчивостью к истиранию и общим объёмом износа в реальных эксплуатационных условиях. Формирование технологической схемы производства и заключительной обработки деталей, учитывающей особенности их последующей приработки, может осуществляться на базе одноступенчатого подхода, опирающегося на связь эксплуатационных характеристик деталей со способами изменения структуры и состояния поверхностных слоёв. Однако полноценная реализация такого метода возможна только при комплексном анализе всех влияющих параметров, которые в совокупности определяют итоговое качество.

1.4. Трение и изнашивание цилиндрических поверхностей

Компоненты с цилиндрическими контактными поверхностями широко распространены в различных технических системах. Эксплуатационные режимы таких деталей отличаются значительным многообразием. В частности, они могут функционировать как в условиях, допускающих самоустановку, так и при её отсутствии. Распределение характера и интенсивности изнашивания на траектории движения контактной точки может носить как стационарный, так и нестационарный характер. Контактные условия при изнашивании сопряжения также варьируются в широких пределах: от стабильных до изменяющихся во времени.

Следует отметить, что влияние особенностей конструкции на геометрию изношенной поверхности зачастую превосходит влияние закономерностей, присущих процессам изнашивания материалов.

Наиболее существенное негативное влияние на работоспособность цилиндрических контактов оказывают неравномерность распределения контактного давления и неоднородность поля скоростей скольжения. Многократные релятивные смещения контактирующих поверхностей, циклический характер нагружения - все эти факторы способствуют накоплению пластических деформаций, искажению микрогеометрии поверхности, контактному и усталостному разрушению её неровностей. В определенных условиях наблюдается возникновение микрорезания. Совокупное действие указанных факторов обуславливает ускоренную деградацию трибологического узла в целом.

Анализ данных, представленных в таблице 1.1, показывает, что диапазон типичных рабочих давлений для деталей с цилиндрическими поверхностями трения составляет 1...30 МПа. Наиболее распространенными типами движения для рассматриваемого класса деталей являются вращательное, возвратно-качательное и возвратно-поступательное. Эксплуатация таких деталей, как правило,

происходит в условиях граничной смазки. Основными типами изнашивания являются усталостное, абразивное, адгезионное, коррозионное и кавитационное.

В зависимости от вида смазочного материала различают три режима трения [3, 13, 29, 84]: жидкостный, полужидкостный и граничный. В условиях жидкостной смазки контактирующие поверхности полностью разделены сплошной масляной пленкой, что исключает непосредственный контакт металлических поверхностей.

В режиме полужидкостной смазки наблюдается нарушение сплошности масляной пленки, что приводит к возникновению локальных участков контакта микронеровностей сопряженных поверхностей.

Таблица 1.1 – Виды трения и изнашивания цилиндрических поверхностей

Пара трения	Вид трения	Давление, скорость	Вид смазки	Вид изнашивания
«вал – втулка», подшипник скольжения	Трение скольжения	20 МПа, 10 м/с	Граничная, жидкостная, полужидкостная	Усталостное, адгезионное, абразивное, кавитационное, коррозионное
«цилиндр - поршневое кольцо» ДВС	Трение скольжения	0,5...16 МПа, 3...20 м/с	Переменный режим смазки	Абразивное, адгезионное
Колодочный тормоз	Трение скольжения	0,2...8 МПа, до 10 м/с	Сухая, граничная	Адгезионное, абразивное, усталостное
Цилиндрические направляющие скольжения	Трение скольжения	0,05...3 МПа, 0,05...0,2 м/с	Граничная, жидкостная, полужидкостная	Абразивное, адгезионное, усталостное, коррозионно-механическое
«Щетка - контактное кольцо»	Трение скольжения	0,05...1 МПа, 5...50 м/с	Сухая	Электроэрозионное усталостное
Ролик конвейера, ролик ролика	Трение качения	0,5...10 МПа, 0,05...0,2 м/с	Сухая	Абразивное, усталостное,
Ролики приводных цепей	Трение качения	15...50 МПа, 0,5...15 м/с	Граничная	Абразивное, усталостное
Проушины и пальцы гусениц	Трение качения	15...50 МПа, 0,5...15 м/с	Сухая	Абразивное, адгезионное, усталостное, коррозионно-механическое
Ось сателлитов дифференциала	Трение скольжения	4...20 МПа, 4 м/с	Граничная, жидкостная, полужидкостная	Усталостное, абразивное при фреттинг-коррозии изнашивание при заедании

Граничная смазка согласно ГОСТ 27674–88 представляет собой такой режим трения, при котором основные трибологические характеристики (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) определяются преимущественно физико-химическими свойствами поверхностей и используемого смазочного состава, а не его вязкостью. В данном режиме взаимодействующие поверхности могут контактировать либо по всей площади соприкосновения, либо по её значительному фрагменту, в то время как смазочный материал представлен главным образом тонкой адсорбционной плёнкой. Несмотря на скромную толщину данного слоя, он способствует существенному снижению сил трения по сравнению с полностью несмазанным контактом, однако отличительной чертой граничной смазки является сравнительно высокий коэффициент трения относительно тех значений, которые достигаются при полужидкостной и жидкостной смазке.

Следует подчеркнуть, что чистый граничный режим трения в реальных условиях встречается довольно редко. На практике он обычно реализуется лишь на отдельных участках контактирующих поверхностей, так что весь процесс трения представляет собой сложный смешанный режим. При этом подавляющее большинство узлов, работающих при высоких нагрузках, периодически оказывается в режиме граничной смазки — в тех фазах, когда давление и температура в контакте достаточно велики, чтобы тонкий смазочный слой не мог сохранять исключительно гидродинамический характер. Разграничение зон гидродинамического, комбинированного и граничного трения в узлах скольжения может быть осуществлено с помощью графика Герси-Штрибека (рисунок. 1.22). Этот график наглядно демонстрирует, как коэффициент трения f изменяется в зависимости от безразмерного параметра подобия, известного как число Герси [3, 13, 29, 90]:

$$Z = \frac{\mu u}{P_{\text{пог}}}, \quad (1.2)$$

где μ — динамическая вязкость смазки, u — скорость относительного перемещения трущихся тел; $P_{\text{пог}}$ — погонная нагрузка на узел трения (нагрузка, отнесенная к длине сопряжения).

В области граничной смазки (отрезок I на рисунке 1.22) наблюдаются следующие условия: значительные удельные нагрузки на узел трения (большие значения $P_{\text{пог}}$), малые скорости относительного движения трущихся поверхностей (низкие значения u), высокие температуры (приводящие к уменьшению вязкости μ). Этот режим отличается не только увеличенным коэффициентом трения, но и непрерывным износом контактирующих деталей.

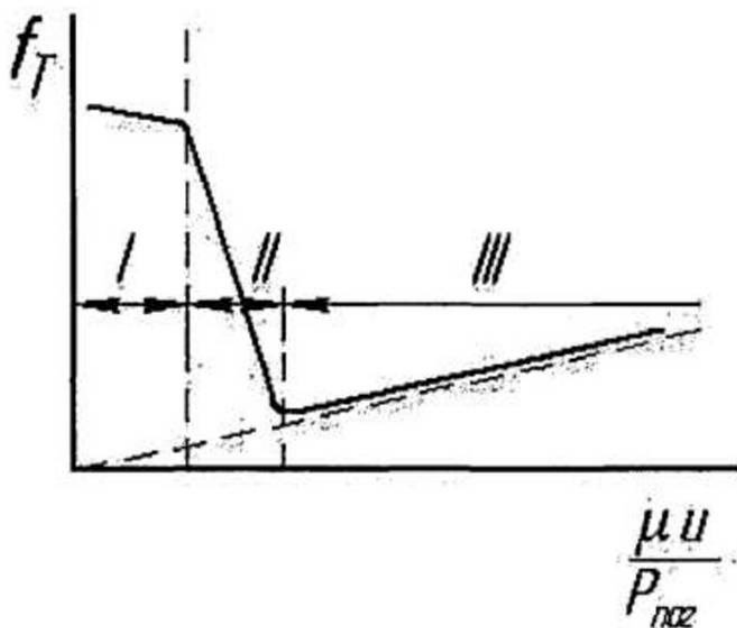


Рисунок 1.22 – Диаграмма Герси – Штрибека

При увеличении скорости скольжения наблюдается стремительное снижение коэффициента трения. Расстояние между взаимодействующими поверхностями возрастает, однако его величина все еще недостаточна для полного предотвращения соприкосновения отдельных микронеровностей и шероховатостей. В результате формируется режим смешанной (полужидкостной) смазки, (рисунок 1.22, участок II) характеризующийся линейной зависимостью коэффициента трения от безразмерного параметра Z .

Следует отметить, что режим полужидкостной смазки обладает ограниченной стабильностью. В случае снижения значения параметра Z , обусловленного уменьшением вязкости смазочного материала, ростом нагрузки или снижением скорости относительного перемещения поверхностей, происходит увеличение силы трения и повышение температуры контактирующих тел. Данный

процесс приводит к переходу в режим граничной смазки.

В области полужидкостной смазки при увеличении скорости наблюдается резкое падение коэффициента трения и последующий переход в режим жидкостной смазки. Таким образом, при условии наличия достаточного количества смазочного материала, переход через полужидкостный режим в процессе запуска трибосистемы является относительно безопасным.

Минимальное значение коэффициента трения f достигается в условиях, когда толщина смазочной пленки лишь покрывает микронеровности контактирующих поверхностей. Дальнейший рост параметра Z приводит к увеличению толщины смазочного слоя, полностью разделяющего взаимодействующие поверхности и исключаяющего их непосредственный контакт, что соответствует установлению режима жидкостной смазки (рисунок 1.22, участок III).

Жидкостный режим смазки демонстрирует стабильность функционирования в широком диапазоне рабочих параметров, обеспечивая эффективное разделение контактирующих поверхностей и минимизацию износа

Анализируя процессы износа, возникающие при трении цилиндрических деталей, можно выделить основные факторы, влияющие на интенсивность износа трущихся поверхностей:

1. **Внедрение шероховатостей одной поверхности в другую:** При скольжении это приводит к образованию неровностей и их многократному разрушению.
2. **Адгезионное схватывание:** Приводит к переносу материала от одной детали к другой, усиливая износ.
3. **Наводороживание поверхностей:** Ускоряет износ в зависимости от условий эксплуатации, увеличивая его скорость более чем в 10 раз.
4. **Пластические деформации:** Вызывают наклеп поверхностных слоёв и разрушение микронеровностей.
5. **Окислительные процессы:** Формируют оксидные пленки на поверхностях трения. Хотя они препятствуют схватыванию и глубокому вырыванию материала, их низкая прочность приводит к быстрому разрушению. [36].

1.5. Современные технологические методы повышения износостойкости цилиндрических поверхностей трения

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что среди различных методов технологического воздействия на поверхностный слой особо выделяются упрочняющие технологии. Эти технологии можно разделить на три основные категории.

Первая категория включает методы, которые обеспечивают упрочнение за счет улучшения физико-механических свойств поверхностных слоев детали. К таким методам относятся поверхностное пластическое деформирование, которое включает обработку деталей с использованием роликов, шариков, а также алмазное шлифование и создание регулярных профилей. Кроме того, сюда относятся методы термической обработки и поверхностной закалки, осуществляемые с помощью нагрева токами высокой частоты, газовым пламенем и другими способами. Также в эту группу входят термомеханическая и электромеханическая обработки, лазерное и ультразвуковое упрочнение.

Вторая категория охватывает методы, создающие эффект упрочнения путем частичного изменения химического состава поверхности. В эту группу входят химико-термические обработки, такие как цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование и другие, а также методы диффузионной металлизации из различных сред, включая алитирование, диффузионное хромирование, борирование и другие. Дополнительно сюда относятся методы химического и электрохимического осаждения покрытий, включая оксидирование, фосфатирование, никель-борирование и другие технологии. Также в эту категорию входят лазерное и электроискровое легирование, а также ионная имплантация, например, ионное азотирование и цементация в плазме тлеющего разряда.

Третья основная группа методов включает технологии формирования на поверхности трущейся детали слоев, полностью отличающихся по химическому составу от базового материала. В эту категорию входят механо-термические методы, которые включают фрикционное и электроконтактное нанесение

покрытий, а также различные способы наплавки, такие как газовая, электродуговая, плазменная и лазерная. Кроме того, сюда относятся методы газотермического напыления с использованием различных техник, методы химического осаждения покрытий из парогазовой фазы (CVD), например, вакуумное титанирование и нанесение карбидтитановых покрытий, а также методы физического осаждения покрытий из пароплазменной фазы (PVD), включая конденсацию с ионной бомбардировкой и реактивное электронно-лучевое осаждение.

Каждый из перечисленных методов обладает своими уникальными характеристиками и находит применение в различных областях промышленности. Эти методы характеризуются определёнными факторами, влияющими на процесс формирования качественных параметров обрабатываемых поверхностных слоев деталей. Важными характеристиками технологических методов обработки являются конкретные величины и параметры неровностей поверхности, направление этих неровностей, степень и глубина наклепа, а также величина и знак остаточных напряжений. Эти параметры во многом зависят от условий механической, упрочняющей и отделочной обработки, включая режимы работы, геометрические параметры инструментов, свойства смазывающих и охлаждающих сред, а также жесткость оборудования и другие факторы. Одной из ключевых задач при технологической подготовке производства является определение оптимальных режимов обработки, которые должны обеспечивать не только требуемую производительность при минимальных затратах, но и соответствовать установленным стандартам качества поверхностного слоя.

Для большинства технологических методов обработки все же не удастся получить теоретические зависимости между технологическими факторами и параметрами качества поверхностного слоя, обуславливающими эксплуатационные свойства деталей машин, и поэтому оптимальные режимы устанавливают опытно-статистическим путем, в частности на основе методов планирования экспериментов.

Перспективным является детонационно-газовый метод напыления. Это один из видов газотермического нанесения покрытий, использующих энергию горючих

газов (в основном пропан-бутана) в смеси с кислородом, а также со сжатым воздухом (азотом, аргоном). Детонационно-газовый метод, используя энергию взрыва газовых смесей, является циклическим процессом, обладает высокой удельной мощностью и значительным упрощением преобразования энергии в полезную работу.

Преимуществами детонационного метода напыления являются:

- высокая адгезия покрытия (80...250 МПа);
- низкая пористость покрытия (0,5...1%);
- отсутствие деформации напыляемой детали.

К недостаткам следует отнести низкую производительность и недостаточную надежность существующего оборудования.

Технология детонационно-газового напыления позволяет не только восстановить рабочие поверхности деталей, но и существенно повысить эксплуатационный ресурс за счет применения износостойких материалов. Детонационно-газовый способ позволяет наносить покрытия из металлов, их сплавов, оксидов и карбидов металлов, композиционных порошков (плакированных и конгломерированных) а также механических смесей.

Одним из новых методов модификации поверхности, обеспечивающим нанесение износостойких тонкопленочных покрытий, является процесс финишного плазменного упрочнения (ФПУ), основанный на применении плазменной струи, истекающей при атмосферном давлении. Эффективность данного процесса основана на использовании малогабаритного и экономичного оборудования, обеспечивающего возможность нанесения упрочняющих нанопокровов.

Уникальность данных покрытий заключается в высокой объемной доле границ раздела фаз и их прочности, отсутствии дислокаций внутри кристаллитов, возможности изменения соотношения объемных долей кристаллической и аморфной фаз, взаимной растворимости металлических и неметаллических компонентов. Эти свойства позволяют получать покрытия с улучшенными физико-механическими свойствами, такими как высокие значения твердости, упругого

восстановления, прочности, жаро- и коррозионной стойкости. При этом в последнее десятилетие уделяется повышенное внимание к трибологическим свойствам таких покрытий.

В качестве плазмообразующего газа применяется аргон, который обеспечивает повышенную долговечность и надежность элементов плазмотрона при длительном ведении процесса.

В качестве материалов для образования покрытия используются пары летучих жидких реагентов, подача которых в реактор осуществляется специальным дозатором. Источником питания плазмотрона служит инвертор постоянного тока со специальной вольтамперной характеристикой. Для стабильного охлаждения реактора и плазмотрона используется охладитель, изготовленный на базе холодильного агрегата. Система мониторинга процесса обеспечивает управление и контроль параметров режимов, а также определение толщины наносимого покрытия в процессе его осаждения.

Плазменная активация обеспечивает повышенное качество подготовки поверхности подложки, ведет к более быстрому прохождению химических реакций, а также к более высоким скоростям осаждения покрытия.

Наиболее перспективными в управлении функциональными параметрами качества поверхностного слоя деталей машин являются методы комбинированной обработки, соединяющие преимущества упрочняющей и отделочной обработки, и методы физического осаждения покрытия из пароплазменной фазы, при которых сохраняется исходная структура основной массы материала детали, что способствует сочетанию ее высокой динамической прочности и износостойкости.

Наиболее перспективными методами отделочно-упрочняющей обработки в этом отношении являются электромеханическая обработка.

Электромеханическая обработка (ЭМО) представляет собой технологию обработки материалов, основанную на синергетическом сочетании термического и силового воздействий на поверхностный слой детали. Такое комбинированное воздействие приводит к модификации физико-механических и геометрических характеристик поверхностного слоя, что, в свою очередь, способствует улучшению

целого ряда эксплуатационных свойств, таких как износостойкость, предел выносливости и другие.

Суть метода ЭМО заключается в пропускании электрического тока значительной силы и низкого напряжения через область контакта инструмента с обрабатываемой заготовкой. Высокое электрическое сопротивление в зоне контакта становится причиной интенсивного нагрева микронеровностей поверхности детали. Под воздействием силы, приложенной со стороны инструмента, эти микронеровности деформируются и сглаживаются. Одновременно с этим происходит быстрое рассеяние тепла вглубь материала, обеспечивая высокую скорость охлаждения от температуры фазового превращения металла, что приводит к упрочнению поверхностного слоя. Достижение температур фазового превращения является обязательным условием для реализации упрочняющих режимов обработки [61].

Отличительными чертами ЭМО являются:

- Одновременность термического и силового воздействия на поверхностный слой.
- Наличие двух основных источников тепловыделения в зоне контакта:
- Внешнего источника, обусловленного трением между инструментом и деталью;
- Внутреннего источника, связанного с прохождением электрического тока через малую площадь контакта. Важной особенностью внутреннего источника является мгновенное выделение тепла во всем объеме контактирующего с инструментом поверхностного слоя.

Кратковременность термического цикла (нагрев, выдержка, охлаждение), измеряемая долями секунды. Высокая скорость охлаждения обеспечивается интенсивным отводом тепла вглубь материала детали.

В локальных зонах тепловыделения температура поверхностного слоя превышает критическую точку A_{c3} , что вызывает аустенитное превращение, за которым следует интенсивная закалка, обусловленная высокой скоростью отвода

тепла из зоны контакта. Эффект упрочнения при ЭМО достигается благодаря сочетанию сверхбыстрых скоростей нагрева и охлаждения, а также высокой степени измельчения аустенитного зерна. Это, в свою очередь, приводит к формированию мелкокристаллических структур закалки в поверхностном слое, которые характеризуются высокими физико-механическими характеристиками и улучшенными эксплуатационными свойствами [79].

Существует несколько разновидностей методов ЭМО, различающихся по следующим параметрам:

Способ подвода тока к зоне контакта:

- Подвод тока от неподвижного контакта через вращающиеся элементы оборудования (например, от пластины, закрепленной в резцедержателе токарного станка, к патрону через скользящий контакт).
- Подвод тока через обкатывающий деталь ролик к патрону с использованием скользящего контакта.
- Подвод тока через пару обкатывающих деталь роликов.

Род тока:

- Постоянный ток.
- Переменный ток.

Характер подачи тока:

- Непрерывная подача постоянного тока, обеспечивающая равномерное упрочнение поверхности.
- Импульсная подача тока.

Частота тока:

- Промышленная частота 50 Гц (см. рисунок 1.23, а).
- Высокая частота до 20 кГц (см. рисунок 1.23, б).
- Промышленная частота, модулированная высокой частотой.
- Тип инструмента:
- Пластина, работающая в режиме трения скольжения.

- Ролик, работающий в режиме трения качения, что снижает тепловыделение от внешнего источника и увеличивает стойкость инструмента.

Важным аспектом реализации методов ЭМО является выбор материала инструмента, так как он работает в условиях высоких температур и силовых нагрузок. Материал инструмента должен обладать высокой электропроводностью, теплопроводностью, термостойкостью, твердостью и износостойкостью контактной поверхности. Наиболее подходящими материалами являются термостойкие бронзы и твердые сплавы, легированные медью.

Для проведения ЭМО могут применяться различные типы металлообрабатывающих станков, такие как токарные, фрезерные, сверлильные и другие, оснащенные специальными приспособлениями. Эти приспособления обеспечивают необходимое взаимное расположение инструмента и детали, подвод СОТС, а также включают в себя источник питания для ЭМО, средства коммутации и контроля.

Электромеханическая обработка связана, в основном, с резким повышением твердости и снижением шероховатости обрабатываемой поверхности деталей и в меньшей мере оказывает влияние на другие характеристики. В зависимости от степени влияния на структуру и свойства поверхностного слоя различают следующие режимы электромеханической обработки [36]:

1. Жесткий упрочняющий режим, как правило, используется при обработке на переменном токе. При этом в поверхностном слое значительной глубины образуется светлая зона мелкодисперсного мартенсита, а в переходном слое отсутствуют значительные пластические деформации. Данный режим предусматривает высокую плотность тока $(700...1500) \text{ А/мм}^2$ в контакте инструмента с деталью, низкую скорость обработки $(0,01...0,08) \text{ м/с}$ и невысокие требования к шероховатости поверхности.

2. Средний упрочняющий режим осуществляется как на переменном, так и на постоянном токе. Он характеризуется незначительной глубиной упрочнения, наличием светлой и темной зон ферритно-мартенситной структуры

Электромеханическая обработка, осуществляемая на упрочняющих и отделочных режимах, не оказывает влияния на точностные характеристики, сформированные на предшествующих технологических операциях обработки деталей [30].

Шероховатость обработанных поверхностей при ЭМО зависит от исходной шероховатости, геометрии инструмента, его шероховатости, значения подачи, давления инструмента, силы и рода тока, скорости обработки. Во всех случаях обработка должна осуществляться при достаточной жесткости технологической системы и отсутствии вибраций. При этом шероховатость рабочей поверхности инструмента должна быть ниже требуемой шероховатости после обработки, а подача – меньше применяемой при механической обработке.

Оптимальные режимы электромеханического упрочнения позволяют получить закаленную структуру поверхностного слоя с повышенной износостойкостью, что обуславливается его высокой твердостью, прочностью и мелкозернистой структурой. Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое от сил деформирования оказывают благоприятное влияние на различные виды разрушающих нагрузок в совокупности с повышенной пластичностью после ЭМО, что является одной из причин повышения контактной прочности поверхностного слоя. Кроме того, износостойкость повышается за счет образования после ЭМО большей несущей способности профиля, чем после механической и термической обработки, что уменьшает время приработки, а отсутствие прижогов и трещин, наряду со снижением числа микронеровностей, снижает число микроконцентраторов напряжения, что, наряду с упрочнением поверхностных слоев, повышает выносливость деталей на удар. Повышение износостойкости деталей машин, работающих в условиях трения скольжения, возможно также за счет электромеханической обработки при протекании электрического тока по импульсной схеме, благодаря чему на упрочняемой поверхности формируется специфическая текстура, представляющая собой чередование упрочненных и неупрочненных участков.

Кроме повышения износостойкости, ЭМО повышает также сопротивление усталости поверхностного слоя. Поверхностные слои деталей, обработанные ЭМО, обладают более высокой теплостойкостью по сравнению с другими видами термообработки. Упрочнение поверхностных слоев ЭМО повышает их коррозионную стойкость (особенно в кислой среде), в частности фреттингостойкость [30].

В связи с повышением эксплуатационных свойств электромеханическую обработку целесообразно применять для широкой номенклатуры деталей, работающих в различных условиях трения и изнашивания. Так, эффективным является применение ЭМО для деталей транспортного, сельскохозяйственного, дорожного, строительного машиностроения, приборостроения, железнодорожных колес, деталей общего машиностроения и автомобилестроения.

1.6. Результаты и выводы по первой главе

1. Большая часть деталей (80-85%) выходит из строя, вследствие их интенсивного изнашивания в процессе трения, при этом большинство деталей ремонтируемых машин выбраковывается вследствие незначительного износа рабочих поверхностей, составляющего не более 1% исходной массы деталей. Наибольший процент износа, порядка 50%, приходится на цилиндрические поверхности деталей.

2. Практически все тяжело нагруженные узлы трения в те или иные моменты эксплуатации (при пуске и останове любых трибосистем, при недостаточной подаче смазочного материала, при нарушении механизма гидродинамической смазки, в «мертвых точках» цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания и т.д.) на отдельных участках работают в режиме граничной смазки. В узлах трения, работающих при высоких нагрузках и температурах и сравнительно низких скоростях скольжения, граничный режим смазки полностью или частично имеет место в течение всего периода работы сопряжения.

3. Потеря долговечности цилиндрических деталей, работающих в условиях граничного трения, происходит при их износе менее 0,2 мм, поэтому использование дефицитных и дорогих конструкционных материалов во всем объеме изделия нецелесообразно. Экономически оправдывает себя применение материалов со специальными покрытиями, обеспечивающими нужный комплекс триботехнических свойств.

4. Изменение структурного состояния материала, в частности твердости, размера зерна, микротвердости в поверхностном слое, способствуют существенному повышению износостойкости узла трения.

5. Наиболее перспективными в управлении функциональными параметрами качества и износостойкостью поверхностного слоя являются методы обработки, обеспечивающие эффект упрочнения: путем повышения физико-механических свойств поверхностных слоев; при частичном изменении их химического состава; методы создания износостойких покрытий. Наиболее перспективными методами упрочняющей обработки в этом отношении являются электромеханическая и лазерная обработки.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Методика проведения теоретических исследований

теоретическая база исследований основана на ключевых принципах технологии машиностроения, современных концепциях статистической теории и методологии, а также новейших разработках в сфере контактного взаимодействия деталей и молекулярно-механической теории трения. Важную роль в исследовании играет применение математических методов, включая дифференциальное и интегральное исчисление.

Изучение формирования износостойкости деталей с цилиндрическими поверхностями трения проведено с применением системного подхода, подразумевающего создание комплексных моделей технических систем с активным использованием передовых информационно-вычислительных технологий.

Ключевым аспектом работы является моделирование процесса контактного взаимодействия и износа цилиндрических поверхностей с учетом параметров шероховатости и физико-механических свойств материалов. Процесс моделирования состоит из трех основных этапов:

1. Моделирование геометрического контакта поверхностей: одна из контактирующих поверхностей рассматривается как гладкая и упругая, а другая описывается приведенными (эквивалентными) параметрами шероховатости.
2. Моделирование шероховатой поверхности: шероховатая поверхность представляется в виде множества эллиптических параболоидов второго порядка, распределенных по участкам геометрической площади контакта. На этом этапе вычисляется фактическая площадь контакта.
3. Определение интенсивности изнашивания: интенсивность изнашивания рассчитывается в соответствии с выбранной моделью изнашивания.

Для практической реализации разработанного алгоритма создано специальное программное обеспечение, позволяющее проводить статистические испытания на моделях контактного взаимодействия и износа. Корректность полученных моделей проверяется экспериментальным путем.

В качестве исходных данных для построения модели используются (на основе анализа работ [2, 3, 25, 61, 86, 88, 91, 92]):

- геометрические параметры сопряженных деталей (длина контакта и диаметр цилиндрических поверхностей);
- параметры качества поверхностных слоев вала и втулки. (R_{max} , R_a , S_m , t_m , b , ν , E , μ , c , σ_T , k и др.);
- требуемые эксплуатационные характеристики пары трения (нагрузка, скорость скольжения и др.).

Выходными параметрами, получаемыми в результате проведения статистических испытаний на модели, являются: фактическая площадь контакта, способная выдержать внешнюю приложенную нагрузку; интенсивность изнашивания и др.

Для получения эмпирических зависимостей применялись методы математико-статистического моделирования и регрессионного анализа.

При проведении теоретических исследований использовались современные средства программирования и электронно-вычислительной техники.

2.2. Методика проведения экспериментальных исследований

2.2.1. Материалы, образцы, детали

Детали с наружными цилиндрическими поверхностями трения (валы, оси, втулки, ролики, поршни) в основном изготавливают из конструкционных и легированных сталей, к которым предъявляются следующие требования: высокая прочность, хорошая обрабатываемость, малая чувствительность к концентрации напряжений, а также способность подвергаться термической обработке.

Экспериментальные исследования проводились на образцах, изготовленных из стали 45 и стали P18.

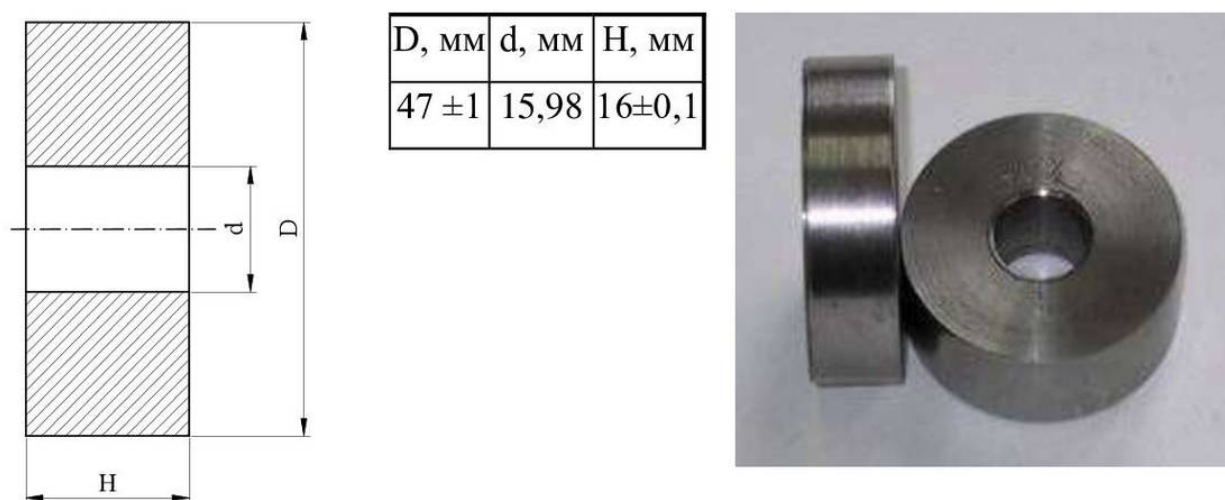


Рисунок 2.1 – Образцы для проведения экспериментов

Рабочая поверхность образцов перед проведением экспериментов обрабатывалась точением на токарно-винторезном станке со следующими режимами обработки: $v = 75$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,1 \dots 0,5$ мм.

Функциональная поверхность трения углеродистой стали 45 обрабатывалась материалами на основе карбида вольфрама (размер частиц до 9 мкм) по технологии ИКЭМО (формирование износостойкого модифицированного поверхностного слоя, имплантацией материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением) [27, 26, 31, 34].

Порошок карбида вольфрама изготовлен на заводе тугоплавких металлов ЗАО "Компания "ВОЛЬФРАМ" (г. Унеча, Брянская область), по спецификации немецкой фирмы «*ElementSixGmbH*» [6].

Карбиды вольфрама W_2C и WC достаточно широко и эффективно применяются при получении различных функциональных материалов. Данные карбиды обладают высокой твердостью, износостойкостью и тугоплавкостью, что является исключительным сочетанием свойств для создания износостойких и жаропрочных сплавов.

В качестве основного легирующего элемента, вольфрам используется при производстве быстрорежущих сталей карбидного класса типа Р6М5, Р6М5К5, Р6М5Ф3 (содержат (9...24)% W), а также инструментальных сталей различного класса (содержат от (0,8...1,2)% W до (2,0...9,0)% W). Инструментальные стали карбидного класса характеризуются повышенной теплостойкостью вследствие образования вторичного высоколегированного мартенсита с высокой твердостью и стабильностью, а также выпадения высокопрочных дисперсных карбидов вольфрама.

Вольфрам образует в стали карбид W_6C , который при аустенитизации частично переходит в твердый раствор, обеспечивая получение после закалки легированного вольфрамом мартенсита, что затрудняет распад мартенсита при нагреве, обеспечивая необходимую красностойкость стали. Нерастворенная часть карбида W_6C приводит к повышению износостойкости инструментальной стали.

На основе карбида вольфрама (WC , W_2C), созданы самые эффективные инструментальные твердые сплавы, содержащие (85...95)% WC и (5...14)% Co . Жаропрочные и износостойкие сплавы-стеллиты ((3...5)% W, (25...35)% Cr , (45...65)% Co) с помощью наплавки наносятся на поверхности значительно изнашивающихся деталей машин.

При проведении исследований, поверхности трения цилиндрических образцов обрабатывались порошком карбида вольфрама (таблицы 2.1, 2.2).

В качестве тугоплавких частиц использовали порошок вольфрама с размером частиц 10...16 мкм. Для определения среднего размера частиц порошка вольфрама (рисунок 2.2), оценивали распределение порошков по размеру на цифровом автоматизированном микроскопе «*Leica DVM6A*» По результатам анализа построена гистограмма распределения частиц порошка вольфрама (рисунок 2.3).

Таблица 2.1 – Марка порошка карбида вольфрама, размер частиц, содержание кислорода и углерода

Марка порошка карбида вольфрама	Средний размер частиц по Фишеру, мкм	Содержание кислорода, масс. %, <i>max</i>	Углерод общий (типичное содержание), масс. %	Углерод общий (минимальное содержание), масс. %	Углерод свободный, масс. %
WC1,0	0,8...1,3	0,20	6,13...6,18	6,08	0,06
WC1,5	1,3...1,8	0,20	6,13...6,18	6,08	0,06
WC2	1,8...2,5	0,10	6,13...6,18	6,08	0,05

Таблица 2.2 – Химический состав порошка карбида вольфрама по допускаемым примесям

	Содержание примесей, <i>ppm max</i>											
	<i>Al</i>	<i>As</i>	<i>Ca</i>	<i>Cr</i>	<i>Na</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>K</i>
<i>max</i>	20	20	20	80	20	80	70	20	20	20	100	20
<i>min</i>	10	10	10	40	10	40	40	10	10	10	40	10

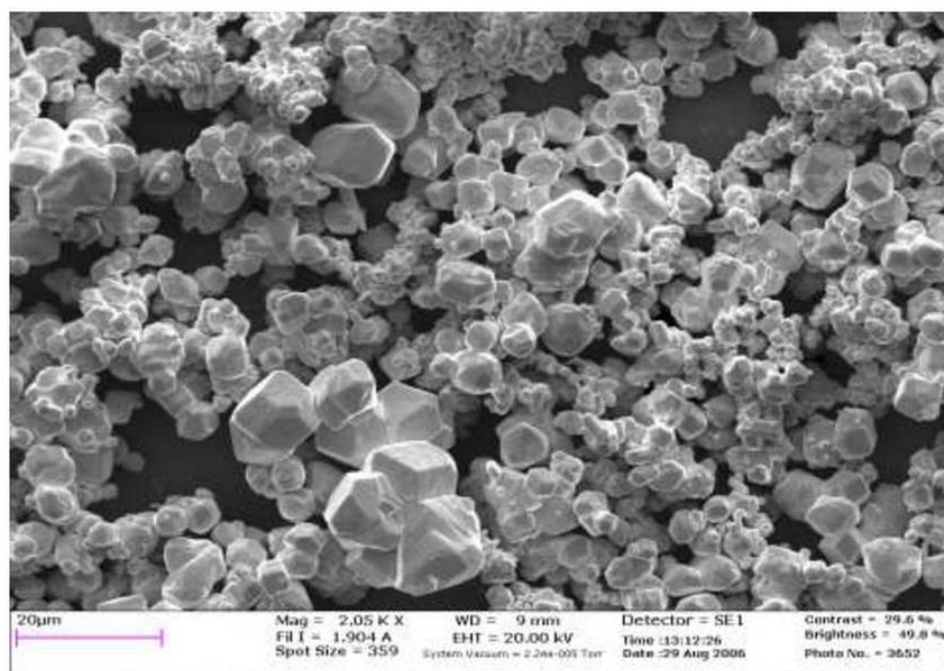


Рисунок 2.2 – Микрофотография частиц порошка вольфрама, x2050

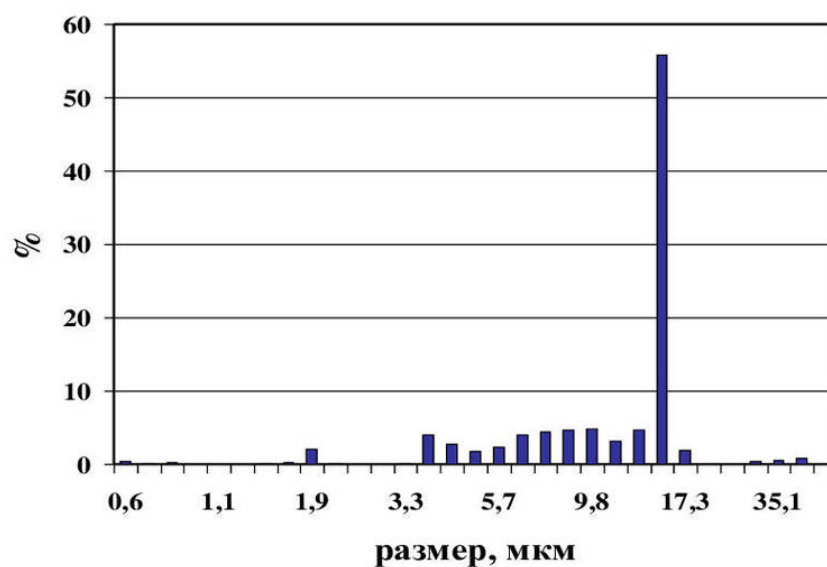


Рисунок 2.3 – Гистограмма распределения частиц порошка вольфрама

Для проведения натурных испытаний использовались реальные детали, в частности, пара трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала переднего моста специального колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач».

На рисунке 2.4 представлена ось сателлита дифференциала.



Рисунок 2.4 – Ось сателлита дифференциала

2.2.2. АСНИ для испытаний цилиндрических поверхностей трения

Испытания на износостойкость проводились по схеме «цилиндрический

образец – индентор» в условиях граничной смазки с использованием АСНИ (автоматизированной системы научных исследований) для проведения испытаний на трение и изнашивание нормализованным методом, созданной в научно-исследовательской лаборатории «НИЛ ТРТ» ФГБОУ ВО БГТУ, на базе серийной машины трения МИ-1М с использованием нагружающего устройства оригинальной конструкции (рисунки 2.5, 2.6).

Условия трения образцов: давление на рабочей поверхности $q = 4,0$ МПа; скорость трения $v = 1,0$ м/с; вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 50А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8.

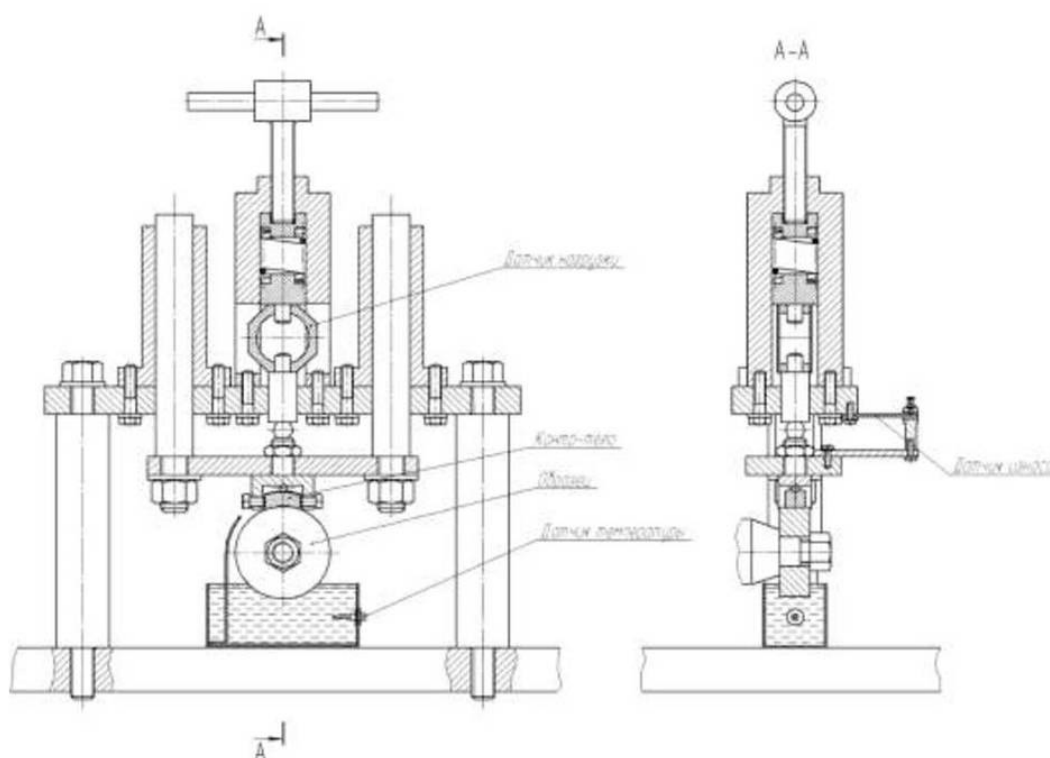


Рисунок 2.5 – Нагружающее устройство



Рисунок 2.6 – Общий вид автоматизированной системы научных исследований на трение и изнашивание (АСНИ)

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств: время приработки t_0 , ч; приработочный износ h_0 , мкм; среднее значение коэффициента трения в период нормального изнашивания $\bar{f}$; отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к $\bar{f}$; среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания $J_h = (h - h_0) / (L - L_0)$, где h , мкм – суммарная величина износа образца за время испытаний, L , мкм – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, L_0 – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки; значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний $J_{h\Sigma} = h / L$.

Для рационализации процесса исследования износостойкости, включающего в себя проведение экспериментов, обработку полученных данных и анализ результатов, был разработан специализированный аппаратно-программный комплекс на базе персонального компьютера. Этот комплекс обеспечивает автоматизацию процесса измерений, визуализацию данных, их запись и обработку в режиме реального времени, что позволяет существенно сократить временные

затраты на проведение исследований, создать базу данных по технологическому обеспечению износостойкости, исключить влияние субъективного фактора и повысить точность получаемых результатов.

Разработанная система позволяет непрерывно контролировать и анализировать следующие параметры в процессе испытаний: нагрузку на образцы, момент трения, суммарный линейный износ и коэффициент трения. Для реализации этих функций система оснащена набором датчиков, усилителей сигнала, платой сбора данных и специализированным программным обеспечением. Общая схема автоматизированной системы представлена на рисунке 2.7.

Измерение момента трения осуществляется с помощью маятникового силоизмерителя в сочетании с фотоимпульсным датчиком. Фотоимпульсный датчик преобразует угол отклонения маятника, пропорциональный моменту трения, в электрический сигнал, который затем регистрируется системой.

Для измерения нагрузки на образцы используется тензодатчик. Конструктивно он выполнен в виде упругого кольца с закрепленными на нем тензорезисторами. При деформации кольца под действием нагрузки изменяется сопротивление тензорезисторов, что позволяет с высокой точностью измерять приложенную силу.

Контроль величины суммарного линейного износа также осуществляется с помощью тензодатчика, но в этом случае он выполнен в виде упругой балки с наклеенными тензорезисторами, соединенными по мостовой схеме. Износ образца приводит к изменению геометрических параметров балки и, как следствие, к изменению сопротивления тензорезисторов, что позволяет точно отслеживать величину износа.

Использование описанного аппаратно-программного комплекса позволяет значительно повысить эффективность исследований в области изнашивания материалов, получать более точные и надежные результаты, а также создавать базы данных, которые могут быть использованы для разработки новых технологий повышения износостойкости.

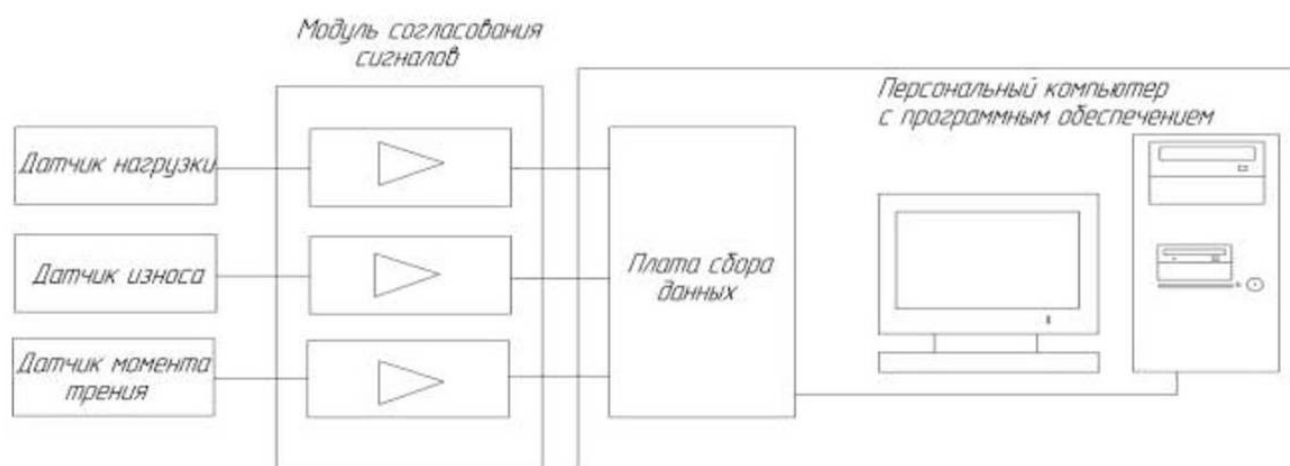


Рисунок 2.7 – Общая схема автоматизированной системы.

В ходе испытаний информация с аналоговых датчиков, усиленная до необходимого уровня, регистрируется платой сбора данных и преобразуется в цифровой формат при помощи встроенного АЦП. Далее данные передаются на ЭВМ для обработки и отображения на мониторе в режиме реального времени. По окончании испытаний программа формирует итоговый отчет

Технические характеристики установки приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики экспериментальной установки

Параметр	Значение
Пара трения	«цилиндрический образец – индентор»
Частота вращения образца, об/мин	425
Нагрузка на индентор, Н	0...500
Погрешность измерения нагрузки, %	± 5
Погрешность измерения момента трения, %	± 5
Погрешность измерения износа, %	± 5
Максимальный момент трения, Н·м	15
Моментомер	маятниковый
Датчик угла маятника моментомера	тензорезисторный
Датчик износа	тензорезисторный
Датчик нагрузки	тензорезисторный

Подготовку и проведение исследований выполняют в следующей последовательности:

1. Образцы после различных технологических методов обработки

промыть и установить на шпинделе машины трения.

2. Заправить смазочным материалом соответствующую емкость для подачи данного материала в зону трения.

3. Подключить все регистрирующие приборы к ПЭВМ через соответствующие разъемы.

4. Включить ПЭВМ и загрузить соответствующее программное обеспечение. Установить в нулевое положение показания датчиков.

5. Запустить машину трения.

6. Произвести нагружение пары трения и регистрацию данных через программно заданные промежутки времени. Длительность испытаний составляет 6...8 часов непрерывной работы, что соответствует порядка 30 км пройденного пути образцом $\varnothing 50\text{мм}$.

2.2.3. Методы измерения параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя

Параметры шероховатости до и после обработки измерялись с помощью автоматизированного *USB* профилографа-профилометра мод. БВ – 7669М, изготовленного ОАО "НИИИзмерения" (Научно-исследовательский и конструкторский институт средств измерения в машиностроении). Его общий вид представлен на рисунке 2.8, а интерфейс пользователя – на рисунке 2.9.

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере *Hardwin XL KB 30 S* (рисунок 2.10). Общие характеристики представлены в таблице 2.4.

Микротвердость измерялась по методу Виккерса. Измерения происходят вдавливанием в испытуемый материал правильной четырехгранной алмазной пирамиды с углом 136° между противоположными гранями.

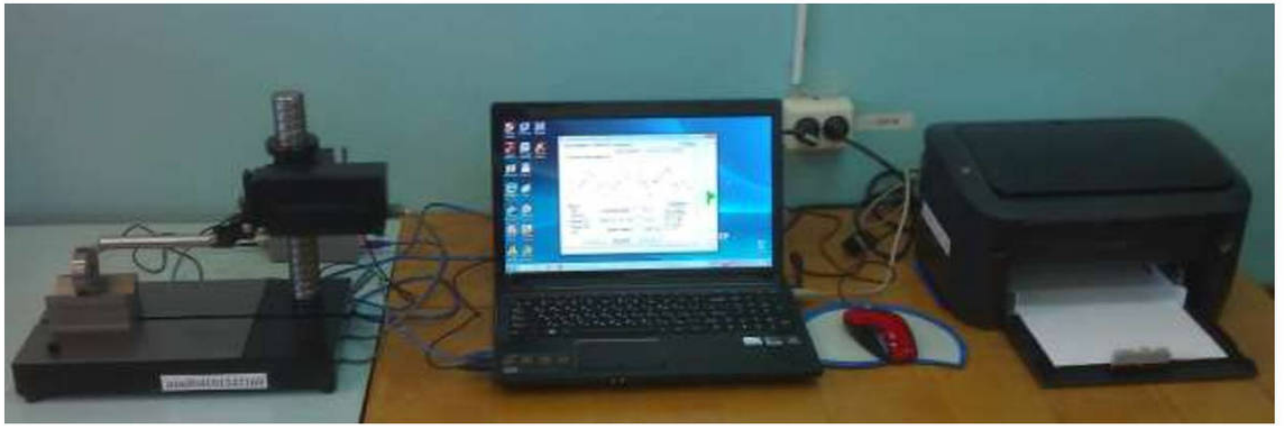


Рисунок 2.8 – Общий вид *USB* профилографа – профилометра мод. БВ – 7669М

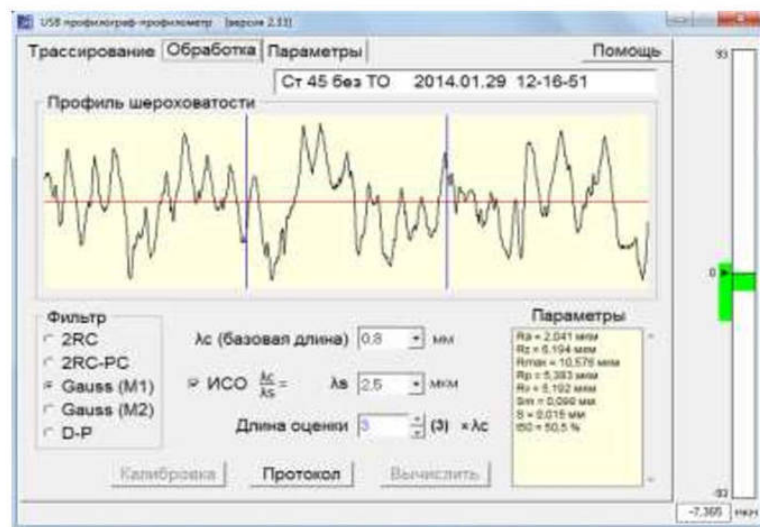


Рисунок 2.9 – Интерфейс пользователя *USB* профилографа-профилометра мод. БВ – 7669М



Рисунок 2.10 – Микротвердомер *Hardwin XL KB 30 S*

Таблица 2.4 – Общие характеристики микротвердомера *Hardwin XL KB 30 S*

Методы	Виккерс, Бринель, Кнуп
Нагрузки, кгс	0,025...10
Максимальная высота образца, мм	400
Вес, кг	125
Габариты, ВхШхГ, мм	950x360x700

2.2.4. Методика исследования химического состава и структуры материала

Микроструктурные исследования и энерго-дисперсионный анализ (содержание элементов) проводились на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения *Zeiss Ultraplus* на базе *Ultra 55*, Германия (*Zeiss Ultraplus Field Emission Scanning Electron Microscope*) (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп сверхвысокого разрешения *Zeiss Ultraplus* на базе *Ultra 55*, Германия

Он предназначен для получения изображений с поверхности, излома или шлифа образца, определение размеров структурных составляющих и локального элементного состава.

Общие основные характеристики: источник полевого электронного пучка с разрешением СЭМ-изображения 1 нм; система электронно-лучевой литографии *Nabity NPGS*; большая вместимость камеры; 5-осевой столик, способный

просматривать и записывать всю 4-дюймовую пластину; детекторы электронов *In-Lens SE*, *In-Lens BSE* и *Everhart-Thornley*; детектор *Oxford 10 мм SDD* для рентгеновского анализа и картирования.

Ultra 55 обеспечивает сверхвысокое разрешение как для вторичных электронов (*SE*) для отображения информации о поверхности, так и для обратно рассеянных электронов (*BSE*) для представления информации о составе.

Детектор *EsB* оснащен встроенной фильтрующей сеткой для повышения качества изображения и не требует дополнительных настроек. Детектор *EsB* менее чувствителен к контрасту краев и эффектам зарядки, что обеспечивает точную визуализацию и измерение границ, частиц и особенностей в сочетании с большой многопортовой аналитической камерой, полностью моторизованным 5-осевым моторизованным эвцентрическим столиком и режимом высокого тока.

Для исследований микроструктуры поверхностного слоя детали используются подготовленные специальным образом микрошлифы по ГОСТ 1778-70.

Дендритное строение связано с определенной химической неоднородностью, выявляемой при травлении образца, подлежащего микроанализу. Если однофазные сплавы состоят из вполне однородных по составу зерен, то это указывает на достижение равновесного состояния [41].

В многофазных сплавах с помощью микроанализа можно определить не только количество, форму и размеры включений отдельных фаз, но и их взаимное распределение [41].

Разные фазы могут образовывать устойчивые формы взаимного распределения, характерные не для одного какого-либо сплава, а для целых групп сплавов, имеющих общие типы превращений, описываемых диаграммой состояния (например, эвтектические и эвтектоидные превращения) [41].

Количество эвтектической или эвтектоидной структуры, а также строение и характер распределения этих структур оказывают большое влияние на свойства сплавов. В частности, свойства стали весьма сильно зависят от количества эвтектоида (перлита) и его строения. Форма перлита в зависимости от характера

термической обработки может быть различной — от грубо пластинчатой до мелкозернистой [41].

Другие сочетания фаз могут зависеть от условий термической и горячей механической обработки; фазы могут быть в виде отдельных включений округлой, пластинчатой или игольчатой формы, а также в виде строк и сетки. Например, хорошо известно, что равномерное распределение карбидов в структуре заэвтектоидной стали обеспечивает высокие механические свойства инструмента, тогда как наличие сетчатого распределения цементита по границам зерен (цементитная сетка) вызывает хрупкость [41].

Пользуясь методами микроанализа, можно также оценить свойства ряда многофазных сплавов и, в частности, чугуна, для которого имеются специальные шкалы, классифицирующие по форме и количеству графит и фосфидную эвтектику.

По площади, занимаемой каждой фазой или структурной составляющей в поле зрения микроскопа, можно в ряде случаев определить количество присутствующих фаз, если известна их плотность. Кроме того, если известен состав каждой из фаз, можно приблизительно определить и состав изучаемого сплава. Такие расчеты только в том случае будут достаточно точными, если присутствующие фазы не слишком дисперсны и находятся в значительном количестве [41].

С помощью микроанализа можно определить структуру сплава не только в равновесном, но и в неравновесном состоянии, что в ряде случаев позволяет установить предшествующую обработку сплава [41].

Изменение структуры от поверхностного слоя к середине изделий указывает на характер нагрева (наличие окисления или обезуглероживания стали) или на применение химико-термической обработки (цементации, азотирования и т. д.) [41].

В электронном микроскопе рассматриваются микрошлифы — специальные образцы металла, имеющие шлифованную и полированную гладкую поверхность, отражающую световые лучи [41].

Предпосылкой для всех металлографических исследований является изготовление шлифов, которые могут быть использованы для микроскопического исследования с помощью светового и электронного микроскопов, для определения микротвердости, а также количественного измерения структурных составляющих и электронно-зондового микроанализа.

Правильное изготовление шлифов имеет чрезвычайно важное значение, поскольку от этого зависит правильность толкования микроструктур. Нельзя заранее предложить оптимальную методику изготовления шлифа, и ни одну из разработанных методик нельзя считать оптимальной.

Основным моментом при изготовлении металлографических шлифов является предотвращение повреждения поверхности шлифа, заключающегося в изменении микроструктуры поверхностного слоя материала в результате деформации или нагрева.

Целью всех стадий изготовления шлифа является последовательное создание поверхности требуемого качества. Таким образом, каждая следующая стадия процесса проводится с целью удаления повреждения поверхности, внесенного предыдущей обработкой.

2.3. Оборудование и технология ИКЭМО цилиндрических поверхностей трения

2.3.1. Установка для ИКЭМО

До настоящего времени карбиды вольфрама наносились на функциональные поверхности в различных жидкофазных процессах (наплавка; лазерное, плазменное, ионное напыление и др.)

Микро- и наноструктурное состояние поверхностей трения формируется в процессе реализации технологии ИКЭМО (формирование износостойкого модифицированного поверхностного слоя, имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением). Основное влияние на износостойкость обработанных поверхностей оказывают

характер распределения и морфология дисперсной упрочняющей фазы (упрочняющий композиционный эффект, реализующийся в результате распада пересыщенных твердых растворов структуры материала).

Эффект упрочнения при электромеханической обработке (ЭМО) достигается благодаря тому, что реализуются высокие скорости нагрева и охлаждения, и достигается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [36, 37, 38].

Технология ИКЭМО реализуется на специальной установке, представляющей собой технологический комплекс, состоящий: из универсального станка (применяемого для механической обработки заготовок) с соответствующими инструментами и приспособлениями для закрепления обрабатываемой детали и подвода электрического тока большой силы и малого напряжения; силового блока для преобразования промышленного электрического тока; блока управления режимами обработки; средств коммутации и подвода смазывающе-охлаждающей технологической среды; блока сопряжения с ПЭВМ.

Общий вид установки для ИКЭМО представлен на рисунке 2.12.

Основные технические характеристики установки:

- Диаметр упрочняемой детали, мм 20...200
- Форма тока:
 - а) синусоидальный (с фазовой отсечкой при регулировании) частотой, Гц 50
 - б) постоянный;
- Диапазон регулирования рабочего тока, кА 0,4...4
- Максимальное напряжение рабочего тока, В (при $I_{max} = 4$ кА) 4
- Управление рабочей силой тока – ручное или программное от ПЭВМ
- Стабильность тока (при колебаниях питающей сети ± 10 %) ± 5 %
- Сила прижатия инструмента, Н: 10...100
- Глубина упрочненного слоя, мм 0,2...2,0
- Максимальная потребляемая мощность, кВт 16

- Напряжение питания, В

380±10 %



Рисунок 2.12 – Общий вид установки для ИКЭМО

Установка предназначена для поверхностного упрочнения и отделочной обработки цилиндрических поверхностей деталей машин, изготовленных из средне-, высокоуглеродистых, легированных сталей и высокопрочного чугуна. Применение переменного тока промышленной частоты (от управляемого источника питания) обеспечивает плавный переход твердости от поверхности к сердцевине, большую глубину упрочнения (до 2 мм), высокую микротвердость упрочненного слоя (до 1000 HV), шероховатость поверхности (без отделочной обработки) в пределах $R_a = 0,8 \dots 3,2$ мкм. Обработка цилиндрических поверхностей постоянным током производится, когда не требуется большая глубина упрочнения (до 0,6 мм), а необходимо значительное уменьшение значений параметров исходной шероховатости (до $R_a = 0,2 \dots 0,4$ мкм).

2.3.2. Инструментальная и технологическая оснастка

При электромеханической обработке для повышения эффективности применяют разнообразные инструменты и технологии. Традиционно используются

пластины и ролики. Пластины функционируют, задействуя принцип трения скольжения, а ролики – трения качения. Однако, исследования демонстрируют перспективность инновационного подхода: использования вращающегося инструмента – ролика с интенсивным охлаждением как внешней поверхности, так и внутренней структуры. Для реализации внутреннего охлаждения ось ролика выполнена полой, образуя систему каналов, по которым циркулирует охлаждающая жидкость (вода). Такая конструкция позволяет значительно снизить тепловую нагрузку на инструмент во время обработки, что приводит к целому ряду преимуществ:

- Эффективное охлаждение минимизирует термическое воздействие на материал инструмента, увеличивая срок его службы.
- Стабильный температурный режим обеспечивает более предсказуемый процесс обработки и повышает качество получаемой поверхности.

При выборе инструмента для электромеханической обработки были проанализированы существующие схемы обработки и инструментальное обеспечение к ним. Учитывая это, была выбрана sdвоенная инструментальная головка.

Конструкция устроена следующим образом (рисунок 2.13).

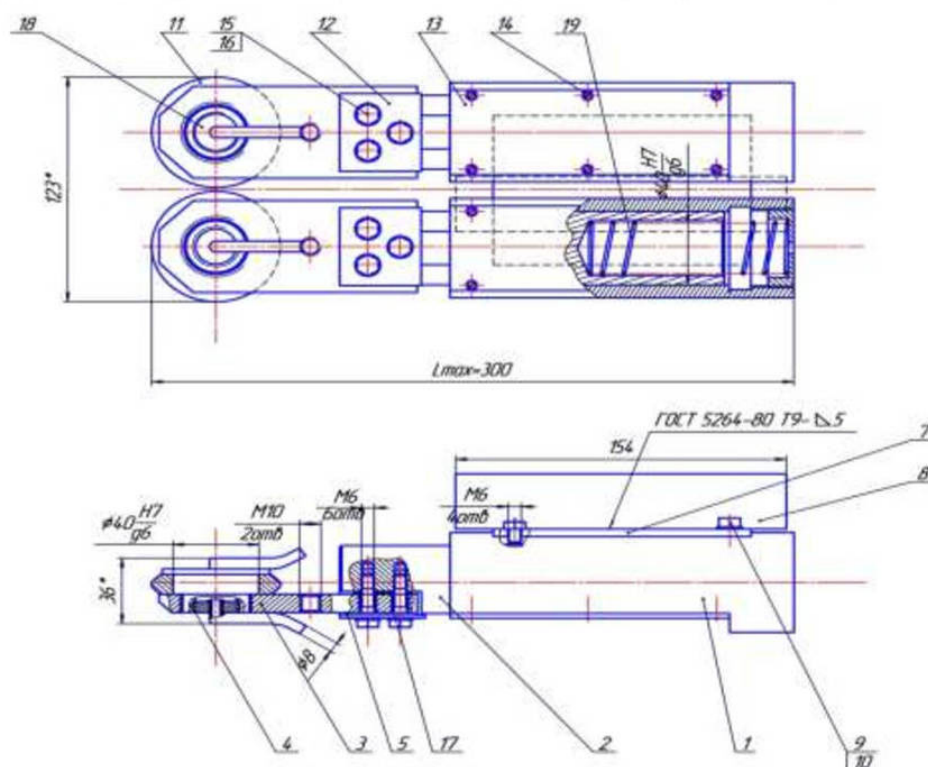


Рисунок 2.13 – Составные части инструментальной оснастки

В корпус поз. 1 устанавливается шток поз. 2 затем к корпусу прикручивается крышка поз. 13. шестью винтами М3 поз. 14. Затем устанавливается пружина поз. 19 и в корпус вкручивается пробка поз. 6. чтобы создать предварительный натяг пружины. Ход штока относительно корпуса составляет 10...15мм. Далее на шток устанавливается токоподводящая шина поз. 3, со вставленными в нее изоляционными втулками поз. 17.; между штоком и токоподводящей шиной а также между токоподводящей шиной и прижимной пластиной поз. 12. устанавливаются изоляционные пластины поз. 5. и прикручивается токоподводящая шина к штоку тремя болтами М6 поз. 15.

Ролик поз. 11. устанавливается на ступицу поз. 4 и ступица прикручивается к токоподводящей шине. Далее в ступицу вкручивается узел охлаждения поз. 18. После сборки двух головок они соединяются пластиной поз. 7.

Общий вид инструмента и оснастки для электромеханической обработки представлены на рисунках 2.14; 2.15.



Рисунок 2.14 – Инструментальная оснастка при электромеханической обработке

Из-за соображений электробезопасности и потери энергии, особенно при обработке крупных деталей, подвод тока был принят через два ролика-электрода. Так как горизонтальное положение роликов не обеспечивает обработку в начале

детали (контактирует только один ролик) и значительно увеличивает ширину инструмента, было выбрано вертикальное расположение роликов.

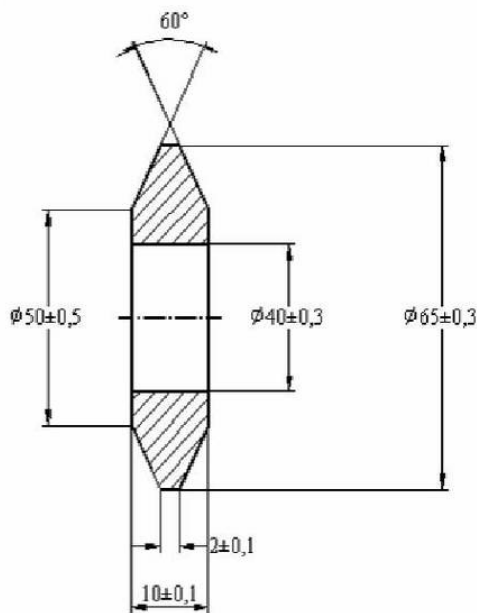


Рисунок 2.15 – Инструмент из псевдосплава для электромеханической обработки

Так как инструмент для упрочнения деталей электромеханической обработкой работает в жестких условиях (высокие температурные и силовые нагрузки), а так же при этом способе воздействия необходима высокая электрическая проводимость материала инструмента, теплопроводность и достаточная твердость и износостойкость контактной поверхности, то наиболее целесообразным является применение в качестве материала инструмента тугоплавких металлов с насыщением объема материалами на основе меди (псевдосплавы). Был применен псевдосплав, который представляет собой пористый «каркас» в виде «губки» из карбида вольфрама, пропитанный медью (рисунок 2.15).

После установки на станок, на трубки узла охлаждения инструментальной оснастки одеваются резиновые шланги, таким образом, чтобы к верхней головке подходил шланг от системы станка, а затем через последовательно соединенные головки охлаждающая жидкость поступала в нижнюю головку и снова в систему охлаждения станка.

Данная конструкция позволяет убрать токоподвод от станка, и не подавать ток через деталь, т.к. головки изолированы друг от друга и от станка. Под напряжением находятся только токоподводящие шины, оси роликов и сами ролики. Направляющие, корпус, резцедержатель, суппорт, шпиндель станка изолированы. Тем самым удастся избежать энергетических потерь в инструментальной оснастке и обеспечить электробезопасность, особенно при обработке крупных деталей.

Значительно уменьшены габаритные размеры, обеспечен удобный подвод воды к ролику. Исключается даже незначительный поворот штока вокруг своей оси за счет применения оригинальной конструкции штока и корпуса: направляющей является цилиндр со снятым сегментом; плоскость, образованная от сегмента, прижимается пластиной и обеспечивает минимальный люфт штока. Эта конструкция может устанавливаться не только на токарных станках для обработки тел вращения, но и на фрезерных и других, т.к. она устроена таким образом, что можно упрочнять плоские и корпусные детали.

Еще одним важным преимуществом является то, что на этой головке могут быть установлены ролики из псевдосплава увеличенного диаметра, для расширения диапазона обрабатываемых деталей и улучшения теплоотвода. В ранее применяемых ролики был увеличен наружный диаметр рабочей поверхности до 70 мм (рисунок 2.13).

Процесс упрочнения заготовки на станке предполагает её надежную фиксацию. Для этого используют патрон, а в отдельных случаях, когда требуется повышенная точность, – центрирование.

Инструмент для упрочнения – ролики-электроды – монтируются в изолированной головке на суппорте станка. Электропроводность обеспечивается медными шинами, соединяющими ролики с источником питания.

Высокие нагрузки при обработке вызывают нагрев и быстрый износ роликов. Для решения этой проблемы используется система охлаждения. Оси роликов выполнены полыми, что позволяет подавать внутрь проточную воду. Источником воды служит централизованная водопроводная сеть или автономная гидростанция.

Помимо охлаждения водой, для повышения эффективности обработки и срока службы инструмента, в зону контакта роликов с заготовкой подается специальная смазывающе-охлаждающая жидкость (СОЖ). СОЖ представляет собой водный раствор электролитов следующего состава: $NaCO_3$ – 0,7%, $NaNO_2$ – 2%, $NaNO_3$ 5%, H_2O – 92,3%. Подача СОЖ осуществляется системой охлаждения станка

Данная установка может использоваться на базе любого токарного или фрезерного станка. Инструмент для ЭМО был изготовлен и испытан на базе универсального станка (применяемого для механической обработки заготовок). Масса головки 9 кг., габариты 300x86x123, ход штоков 15мм., диаметр обрабатываемой детали от 15 мм., прижатие роликов 10...100 Н, диаметр роликов 70 мм. На рисунке 2.16 представлен общий вид разработанной и изготовленной инструментальной оснастки, установленной на токарно-винторезный станок [33, 34].



Рисунок 2.16 – Общий вид инструментальной оснастки, установленной на токарно-винторезный станок.

Основываясь на полученном опыте при создании инструментальной оснастки для электромеханической обработки, была разработана инструментальная оснастка для имплантирования материалов на основе карбида вольфрама. Она также состоит из двух роликов, только вместо псевдосплава применены ролики из жаропрочной и жаростойкой стали (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 – Инструментальная оснастка для имплантирования

Проведя сравнительный анализ жаропрочных и жаростойких сталей, была выбрана сталь 95X18. Сталь 95X18 применяется для изготовления подшипников, втулок, ножей и других деталей с высокой твердостью. Сталь выплавляют в открытых электродуговых или индукционных печах [33, 34].

Микротвердость по Виккерсу в исходном состоянии составляет $HV_{исх} = 240$, а после закалки и низкотемпературного отпуска $HV = 640$.

После изготовления инструментальной оснастки, была проведена тарировка нагружающей пружины инструментальных головок и получен график зависимости прикладываемой нагрузки от перемещения поперечного лимба токарно-винторезного станка. Измерение проводились на динамометре цифровом *PCE FM-200* (рисунок 2.18).

После электромеханического упрочнения, обрабатываемая заготовка подвергалась чистовому шлифованию, с помощью специально разработанной и изготовленной шлифовальной головки, применяемой для установки на токарный станок (рисунок 2.19).



Рисунок 2.18 – Измерение создаваемой нагрузки на инструментальной головке

Она состоит из углошлифовальной машины *PATRIOT* мощностью 1300 Вт с настройкой частоты вращения от 6000...11000 об/мин, прикрепленной к оправке для установки в резцедержатель, и вместо отрезного круга закрепляется шлифовальный круг определенной зернистости [33, 34].

Режимы обработки: $v = 26$ м/с, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,02$ мм.



Рисунок 2.19 – Технологическая оснастка для чистового шлифования образцов.

2.4. Результаты и выводы по второй главе

1. Разработана методика проведения теоретических и экспериментальных исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения и трибологии, современной статистической теории и методологии, теории контактного взаимодействия деталей, молекулярно-механической теории трения, а также на широком применении математических методов исследований и математического аппарата дифференциального и интегрального исчислений.

2. При выполнении работы применялись современные методы оценки параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, химического состава и структуры материала, а также показателей, характеризующих износостойкость.

3. Усовершенствована технология электромеханической обработки, с целью создания модифицированных поверхностных слоев деталей машин, имплантированных и композиционно упрочненных карбидами вольфрама (технология ИКЭМО), что позволяет существенно повысить износостойкость цилиндрических поверхностей трения.

4. Разработана и изготовлена оригинальная инструментальная и технологическая оснастка для реализации процесса ИКЭМО.

3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТАЛЕЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ТРЕНИЯ

В настоящее время разработано множество моделей для анализа взаимодействия деформируемых тел. Значительное количество исследований посвящено контакту номинально плоских поверхностей, в то время как контакт цилиндрических поверхностей изучен в меньшей степени. Существующие методики расчета зачастую не учитывают в полной мере влияние параметров шероховатости и свойств поверхностного слоя, упрощенно представляя контакт цилиндрических поверхностей как контакт плоских. В данной работе представлен подход к моделированию контакта цилиндрических поверхностей, учитывающий параметры шероховатости и физико-механические свойства поверхностного слоя, что позволяет повысить точность расчетов.

3.1. Контактное взаимодействие трущихся цилиндрических поверхностей

В качестве основы для разработки модели контактного взаимодействия была использована модель, предложенная А.О. Горленко, которая изначально была разработана для анализа контакта криволинейных поверхностей при трении [17]. Данная модель была упрощена и преобразована для контакта цилиндрических поверхностей трения типа «вал – втулка». Отличие предлагаемой модели состоит в том, что рассматривается только фактическая площадь контакта цилиндрических поверхностей с учетом физико-механических свойств поверхностного слоя.

В данной работе представлена модель контактного взаимодействия, базирующаяся на анализе скользящего контакта двух цилиндрических поверхностей. Для упрощения моделирования реальные поверхности заменены эквивалентными: гладкой упругой втулкой и валом с приведенными параметрами шероховатости. Модель учитывает как макроскопические упругие деформации

контактирующих тел, так и локальные упругопластические деформации, возникающие в области контакта микронеровностей.

Геометрическое моделирование контактного взаимодействия ограничено рассмотрением характерного участка цилиндрической поверхности. Данный участок представляет собой прямоугольную площадку, расположенную вдоль образующей цилиндра в плоскости, проходящей через его ось. Ширина площадки определяется длиной большей оси эллипса, лежащего в основании эллиптического параболоида, используемого для моделирования шероховатой поверхности. Площадь выделенного участка соотносится с общей площадью геометрического контакта цилиндрических поверхностей посредством масштабного коэффициента (3.1). Предполагается, что контактное взаимодействие на всей поверхности происходит аналогично процессам, моделируемым в пределах выбранного участка [17, 66, 86, 92].

$$K_o = \pi D / (2\sqrt{q R_{max}}), \quad (3.1)$$

где D – диаметр вала; q – один из параметров, определяющих форму поверхности эллиптического параболоида; R_{max} – максимальная высота профиля шероховатости.

На участках геометрической площади контакта моделируется шероховатая поверхность, модель которой представляет собой набор деформируемых под нагрузкой эллиптических параболоидов 2-го порядка, вершины которых имеют определенный закон распределения (рисунок 3.1).

Для этой модели сечения, получаемые от пересечения профиля шероховатости плоскостью, перпендикулярной средней плоскости, будут параболоми 2-го порядка, а плоскостью, параллельной средней плоскости – эллипсами (рисунок 3.2).

Учитывая [17], площадь сечения i -го параболоида на уровне x_i определится выражением

$$P_{ir} = z\pi p_r^2 (h_{ir} - x_r)/h_{ir}, \quad (3.2)$$

где z – коэффициент, учитывающий соотношение длин осей эллиптических параболоидов.

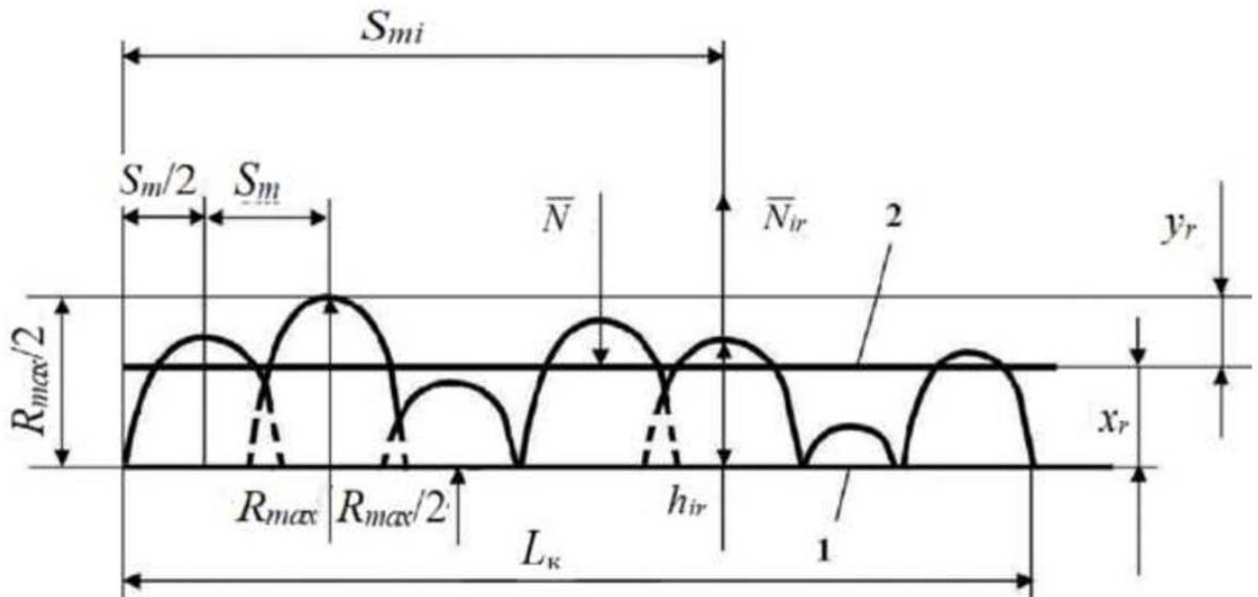


Рисунок 3.1 – Расчетная схема моделирования контакта цилиндрических поверхностей: 1, 2 – соответственно поверхности вала и втулки; L_k – длина площадки контакта; y_r – сближение контактирующих поверхностей; x_r – уровень сечения модели поверхности; h_{ir} – высота i -го выступа модели шероховатой поверхности; S_m – средний шаг неровностей профиля шероховатости по средней линии; N_{ir} – реакция i -го выступа; N – внешняя приложенная сила.

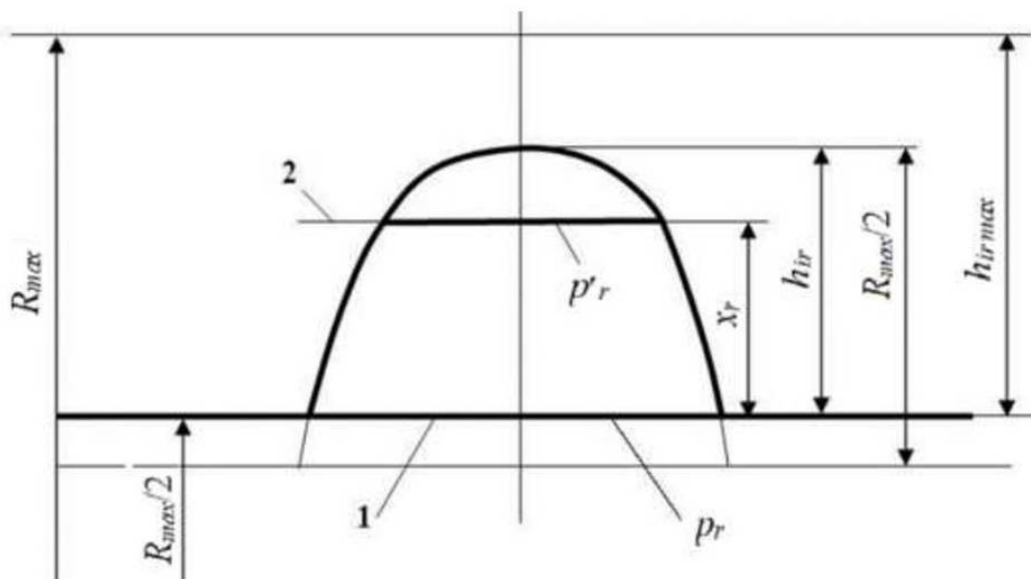


Рисунок 3.2 – Форма выступов модели шероховатой поверхности: 1, 2 – контактирующие поверхности трения; p_r, p'_r – соответственно длины поперечных осей эллипсов на уровне средней плоскости и уровне сечения x_r .

Закон и параметры распределения высот выступов параболоидов находятся, исходя из условия равенства относительных опорных площадей профиля реальной поверхности и модели. Представим функцию плотности распределения высот выступов в виде экспоненциальной функции

$$f(h_r) = \lambda e^{-\lambda(h_r - R_{max}/2)}, \quad (3.3)$$

где λ – параметр распределения.

Учитывая изменение значений высот выступов шероховатости $h_{ir} \in [R_{max}/2; R_{max}]$ (рисунки 3.2, 3.3), будем иметь

$$f(h_r) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda[h_r - R_{max}/2]), & R_{max}/2 \leq h_r \leq R_{max} \\ 0; & h_r < R_{max}/2, h_r > R_{max} \end{cases} \quad (3.4)$$

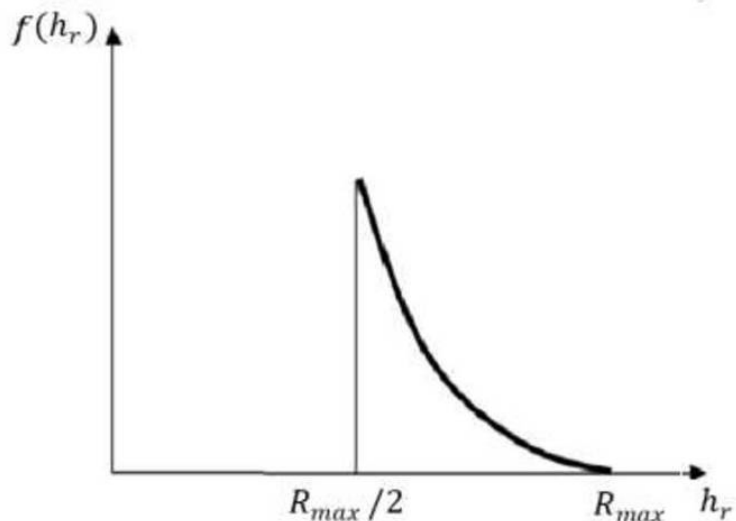


Рисунок 3.3 – Функция плотности распределения высот выступов модели

Тогда функция (закон) распределения высот выступов (рисунок 3.4) будет иметь вид

$$F(h_r) = \int (h_r) dh_r, \quad (3.5)$$

а с учетом формулы (3.3) и пределов изменения значений h_r

$$F(h_r) = \begin{cases} 0; & h_r \leq R_{max}/2 \\ 1 - \exp(-\lambda[h_r - R_{max}/2]); & R_{max}/2 \leq h_r \leq R_{max} \\ 1; & h_r > R_{max} \end{cases} \quad (3.6)$$

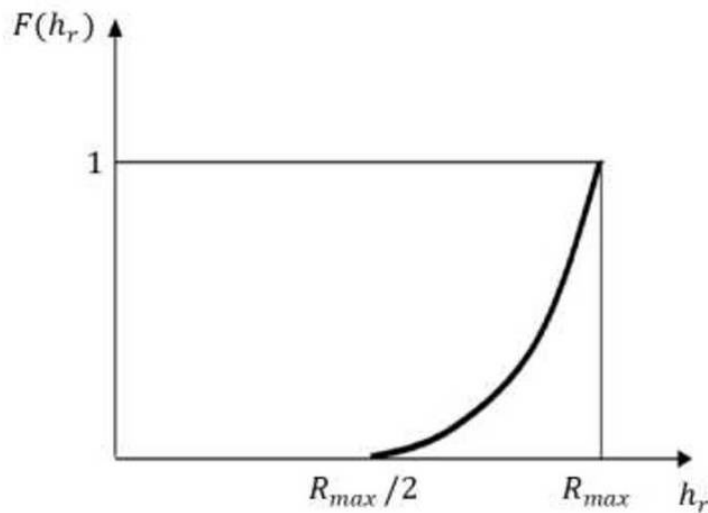


Рисунок 3.4 – Функция (закон) распределения высот выступов модели

Значения высот выступов будут определяться в результате решения уравнения $F(\xi) = \eta$, где η – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0; 1]$, который является областью изменения функции $F(h_r)$.

Случайная величина ξ имеет плотность распределения, аналогичную $f(h_r)$. Тогда

$$\eta = 1 - \exp(-\lambda[\xi - R_{max}/2]). \quad (3.7)$$

Из формулы (3.7) найдем

$$\xi = R_{max}(0,5 - \ln(1 - \eta)/\lambda). \quad (3.8)$$

С учетом формул (3.6) и (3.8) высоты выступов распределяются следующим образом:

$$h_{ir} = \begin{cases} R_{max}/2; & \eta = 0 \\ R_{max}(0,5 - \ln(1 - \eta)/\lambda); & 0 < \eta < \exp(-\lambda R_{max}/2). \\ R_{max}; & \exp(-\lambda R_{max}/2) \leq \eta \leq 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

Параметр распределения λ , непосредственно влияющий на характер кривой $f(h_r)$ [86, 90], находится, исходя из равенства относительных опорных площадей профиля реальной поверхности $t_p(x_r)$ и модели $\tilde{P}_r(x_r)$ на уровне сечения x_r , при решении уравнения

$$Z \int_{R_{max}/2}^{R_{max}} \left[\tilde{P}_r(x_r) - t_p(x_r) \right]^2 dx_r. \quad (3.10)$$

После интегрирования уравнения (3.10), будем иметь значение λ , определяемое из кубического уравнения

$$0,024\lambda^3 + \frac{0,6b(2^{v+2}-1)}{(v+2)2^{v+2}} + \frac{b(1-2^{v+2})}{(v+2)2^{v+2}} + \frac{1,38b(2^{v+2}-1)}{(v+2)2^{v+2}} = 0, \quad (3.11)$$

решаемого с помощью приближенных методов на ЭВМ.

Площадь сечения i -го параболоида для участков фактической площади контакта с учетом упругих деформаций выступов

$$P_{ir} = z\pi p_r^2(h_{ir} - x_r - y_{уп.r})/h_{ir}, \quad (3.12)$$

где величина упругих деформаций, с учетом [85]

$$y_{уп.r} = (1 - \mu^2)ck\sigma_T P_{ir}/(\pi E). \quad (3.13)$$

Реакция каждого выступа

$$N_{ir} = ck\sigma_T P_{ir}(1 + f^2)^{0,5}, \quad (3.14)$$

где f – коэффициент трения.

Фактическая площадь на рассматриваемом участке контакта определится, как сумма площадей сечений i -х параболоидов, вступивших в контакт

$$P_r = \sum P_{ir}. \quad (3.15)$$

Выступ модели считается вступившим в контакт, если выполняется условие

$$h_{ir} > x_r + y_{уп.r}. \quad (3.16)$$

Определение параметров контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей трения осуществляется посредством статистического моделирования процесса контакта с использованием вычислительных средств. Алгоритм моделирования (рисунок 3.5) состоит из следующих этапов:

1. Инициализация исходных данных, необходимых для проведения расчетов.

На данном этапе вводятся:

- Геометрические характеристики контактирующих деталей, включающие длину контакта и диаметры цилиндрических поверхностей вала и втулки;
- Параметры, отражающие качество поверхностных слоев контактирующих тел, такие как максимальная высота неровностей (R_{max}), среднее арифметическое отклонение профиля (R_a), средний шаг неровностей (S_m), относительная опорная длина профиля (t_m), параметр формы неровностей (b), коэффициент Пуассона (ν), модуль упругости

(E), коэффициент трения (μ), коэффициент адгезионного взаимодействия (c), предел текучести (σ_T), коэффициент упрочнения (k) и др.;

- Эксплуатационные параметры пары трения, в том числе нагрузка и скорость скольжения.

Ввод исходных данных может производиться в ручном режиме, из внешних источников, таких как таблицы Excel или базы данных. Результаты последующих вычислений сохраняются на отдельном листе файла Excel с наименованием "Параметры рассчитанного контакта" для дальнейшего анализа.

2) **Вычисление реальной площади контактного взаимодействия на анализируемом сегменте поверхности. Моделирование топографии шероховатой поверхности осуществляется посредством аппроксимации ее геометрии набором параболоидов. Координаты апексов параболоидов устанавливаются с интервалом, соответствующим усредненному шагу неровностей профиля шероховатости по средней линии S_{mi} . Распределение высот вершин параболоидов h_{ir} определяется на основе принципа эквивалентности опорных площадей профиля реальной поверхности и ее параболоидальной модели.**

Задается некоторая величина сближения y_r , обусловленная уровнем сечения $x_r \in [R_{max}/2; R_{max}]$, (рисунок 3.2), и оценивается выполнение неравенства

$$|(K_o \sum N_{ir} - N)/N| \leq \varepsilon. \quad (3.17)$$

где N – внешняя приложенная сила; ε – погрешность.

Выполнение неравенства (3.17) свидетельствует о том, что найдена величина сближения, при которой сформировавшаяся фактическая площадь контакта способна выдержать внешнюю приложенную нагрузку.

Данный подход обеспечивает адекватное воспроизведение статистических характеристик шероховатости исследуемой поверхности и позволяет с высокой точностью прогнозировать фактическую площадь контакта на рассматриваемом участке при заданных условиях нагружения.

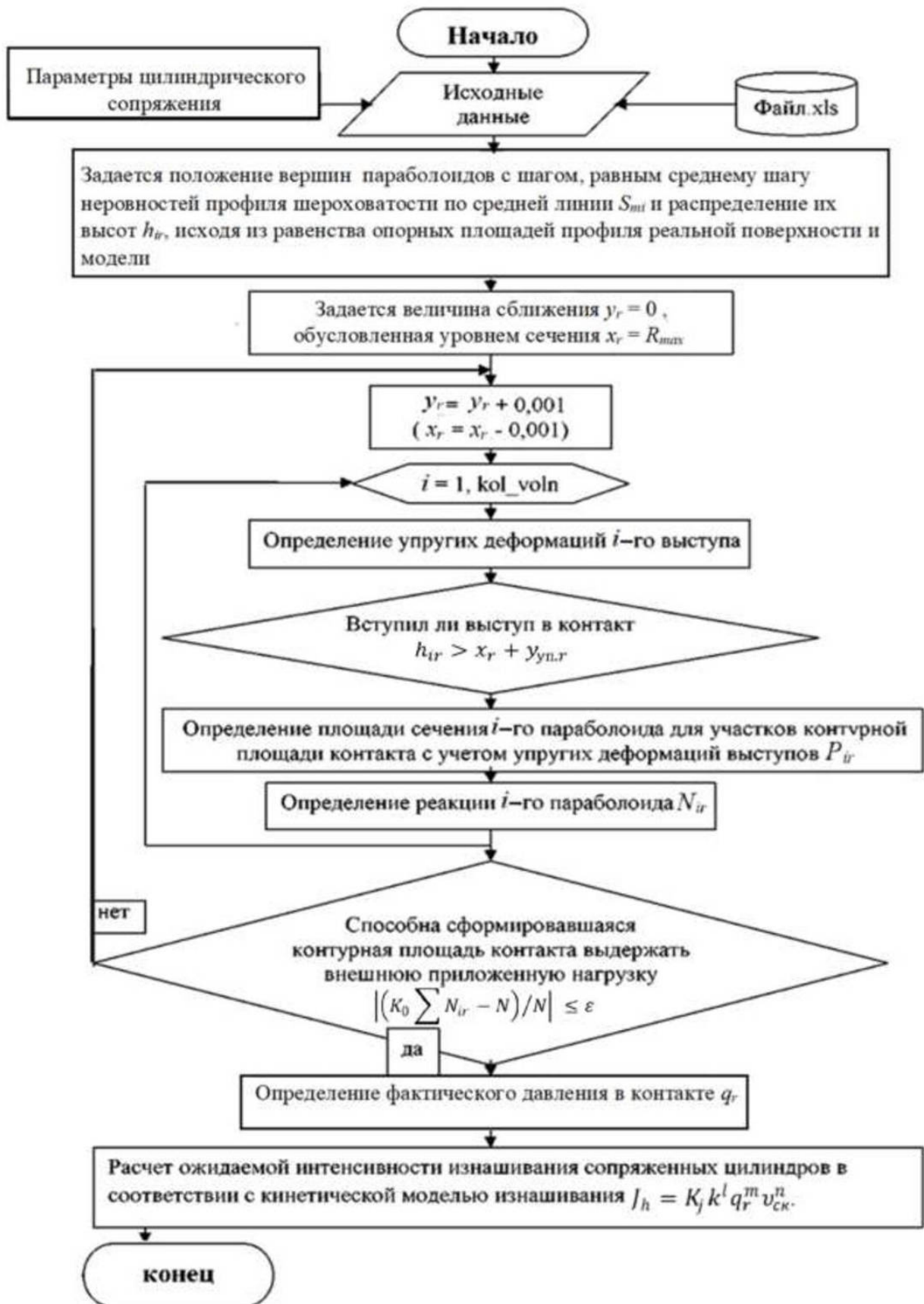


Рисунок 3.5 – Блок-схема разработанной программы

3) Определение фактического давления в контакте.

Фактическое давление в контакте определяется с учетом сформировавшейся фактической площади контакта, способной выдержать внешнюю приложенную нагрузку, и формулы (3.15)

$$q_r = N / (P_r K_o). \quad (3.18)$$

4) Расчет ожидаемой интенсивности изнашивания сопряженных цилиндрических поверхностей трения в соответствии с моделью изнашивания. Сравнительный анализ расчетных и фактических показателей износостойкости подтверждает адекватность и достоверность предложенного подхода к моделированию процессов контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей трения. Это свидетельствует о перспективности использования разработанной модели для прогнозирования ресурса и оптимизации конструктивных параметров узлов трения с цилиндрическими сопрягаемыми поверхностями.

3.2. Модель изнашивания цилиндрических поверхностей трения

В соответствии с методикой проведения теоретических исследований, в качестве модели изнашивания цилиндрических поверхностей трения предлагается кинетическая модель, представляемая в виде

$$J_h = K_j \cdot q_r^l \cdot v_{ск}^m \cdot k^n, \quad (3.19)$$

где J_h – интенсивность изнашивания; K_j – коэффициент изнашивания; q_r – фактическое давление в контакте; $v_{ск}$ – скорость относительного скольжения цилиндрических поверхностей трения; k – коэффициент упрочнения поверхностного слоя; l , m и n – коэффициенты модели.

Выражение (3.19) является моделью изнашивания трущихся цилиндрических поверхностей деталей триботехнических систем, учитывающей параметры качества поверхностного слоя, в частности параметры шероховатости, коэффициент упрочнения и физико-механические свойства, а также условия трения [17, 94].

Скорость относительного скольжения цилиндрических поверхностей трения $v = (\pi D n)/1000$. Коэффициент упрочнения поверхностного слоя $k = HV/HV_{исх}$.

Значения фактического давления в контакте определяются из расчетов на модели контактного взаимодействия (раздел. 3.1, формула (3.18)).

Таким образом, учитывая выражение (3.19), представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия, а также требуемые параметры качества поверхностного слоя сопряженных деталей, в частности параметры шероховатости и коэффициент упрочнения поверхностного слоя.

В этом плане широкими возможностями обладает технология формирования износостойкого модифицированного поверхностного слоя, имплантацией материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением (ИКЭМО.)

При реализации технологии ИКЭМО методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа установлены значения коэффициентов K_j , l , m и n в модели изнашивания (3.19), которая с учетом этих значений принимает вид

$$J_h = 2,10 \cdot 10^{-10} \cdot q_r^{0,15} \cdot v_{ск}^{0,08} \cdot k^{-0,42}. \quad (3.20)$$

При этом значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45 ($HV_{исх} = 220$), варьировались в следующих пределах: $R_a = 1,61 \dots 2,59$ мкм; $R_{max} = 8,16 \dots 14,18$ мкм; $S_m = 122 \dots 171$ мкм; $t_m = 57 \dots 62\%$;

Условия трения образцов: давление на рабочей поверхности q – по плану эксперимента; скорость трения v – по плану эксперимента; вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окупанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 50А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8.

Исходные данные для множественного регрессионного анализа представлены в таблице 3.1. Осуществлялся план эксперимента типа 2^3 .

Таблица 3.1 – Исходные данные для множественного регрессионного анализа

№ опыта	Технологические режимы ИКЭМО			Интенсивность изнашивания $J_h \times 10^{-10}$
	$x_1(q_r)$	$x_2(v_{ск})$	$x_3(k)$	
1	–	–	–	2,22
2	+	–	–	3,41
3	–	+	–	3,30
4	+	+	–	3,62
5	–	–	+	2,44
6	+	–	+	2,79
7	–	+	+	2,63
8	+	+	+	2,98

Технологическими факторами при обработке образцов при реализации технологии ИКЭМО являлись:

- давление в контакте индентора с образцом $x_1(q_r)$, МПа: «–» – 10, «+» – 20;
- скорость скольжения $x_2(v_{ск})$, м/мин (м/с): «–» – 31,4 (0,52), «+» – 62,8 (1,05);
- коэффициент упрочнения поверхностного $x_3(k)$: «–» – 2,2, «+» – 3,5.

На рисунке 3.6. приведены графики зависимостей: $J_h = f(q_r)$; $J_h = f(v_{ск})$; $J_h = f(k)$ при очередном варьировании одной из переменных q_r , $v_{ск}$, k в уравнении регрессии (3.20) Диапазоны изменения переменных соответствуют верхнему и нижнему уровням входных факторов. При изменении одной из переменных значения двух других являются средними из диапазона их изменений: $q_{rcp} = 15$ МПа; $v_{ск,ср} = 47,1$ м/мин; $k_{ср} = 2,85$.

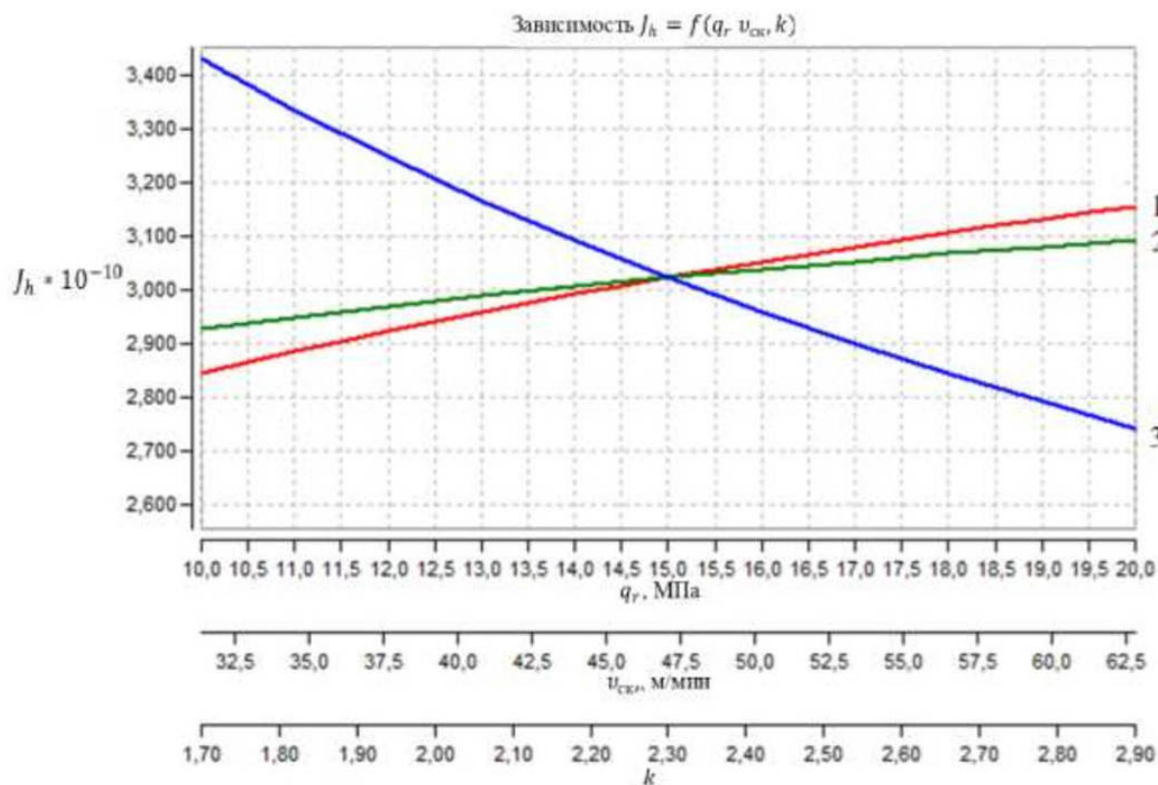


Рисунок 3.6 – Графики зависимостей:

$$1 - J_h = f(q_r); 2 - J_h = f(v_{ск}); 3 - J_h = f(k)$$

На основе теоретических исследований разработан программный комплекс, предназначенный для моделирования контактного взаимодействия и процессов изнашивания цилиндрических поверхностей трения. Программная реализация осуществлена на языке программирования «*Object Pascal*» в интегрированной среде разработки «*LAZARUS*». Программный код включает в себя формализованные алгоритмы, соответствующие применяемым математическим моделям. Для удобства последующего анализа предусмотрена возможность экспорта исходных данных и результатов расчетов в табличном формате в электронную таблицу «*Excel*». Программный комплекс оснащен интуитивно понятным графическим интерфейсом пользователя, обеспечивающим удобство работы с программой.

Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными подтвердило обоснованность и достоверность предложенного подхода к

моделированию процессов изнашивания цилиндрических поверхностей трения. Разработанный метод позволяет осуществлять научно обоснованный выбор технологических методов и режимов обработки с учетом их возможностей путем проведения статистического моделирования на ЭВМ. Это обеспечивает возможность оптимизации технологических процессов изготовления деталей с цилиндрическими поверхностями трения на стадии проектирования.

3.3. Проверка адекватности модели

Была проведена экспериментальная проверка предлагаемой модели на адекватность, что подтвердило правомерность данного подхода к решению задачи обеспечения требуемой износостойкости цилиндрических поверхностей трения.

Триботехнические испытания образцов для различных материалов и технологических методов обработки проводились с применением автоматизированной установки, созданной на базе машины трения МИ-1М, нормализованным методом с использованием нагружающего устройства оригинальной конструкции.

Для сравнительных испытаний износостойкости исследовались наружные цилиндрические поверхности образцов, изготовленных из сталей Р18 и 45.

Условия трения образцов: давление на рабочей поверхности $q = 4,0$ МПа; скорость трения $v = 1,0$ м/с; вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 50А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8.

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств: время приработки t_0 , ч; приработочный износ h_0 , мкм; среднее значение коэффициента трения в период нормального изнашивания f ; отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к f ; среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания $J_h = (h - h_0) / (L - L_0)$, где h , мкм – суммарная

величина износа образца за время испытаний, L , мкм – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, L_0 – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки; значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний $J_{h\Sigma} = h / L$.

Результаты триботехнических испытаний представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты триботехнических испытаний

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для образца			
		Сталь 45, ТО	Сталь Р18, ТО	Сталь 45, ЭМО	Сталь 45, ИКЭМО
Прирабатываемость	t_0 , ч	2,78	5,33	2,27	1,48
	h_0 , мкм	11,5	9,0	6,0	3,2
	f_0/f	1,58	1,36	2,63	1,19
Антифрикционность	f	0,33	0,27	0,19	0,24
Износостойкость	h , мкм	16,1	12,1	7,5	4,6
	$J_h \cdot 10^{-10}$	2,42	3,17	1,12	0,82
	$J_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	5,55	4,18	2,59	2,03

Примечание:

Сталь 45, ТО – объемная закалка и низкотемпературный отпуск ($HV_{исх} = 220$, $HV = 500$); Сталь Р18, ТО – объемная закалка и низкотемпературный отпуск ($HV_{исх} = 230$, $HV = 610$); Сталь 45, ЭМО – электромеханическое упрочнение ($HV_{исх} = 220$, $HV = 680$);

Сталь 45, ИКЭМО – технология обработки ИКЭМО ($HV_{исх} = 220$, $HV = 760$).

На рисунке 3.7 в качестве примера приведены результаты испытаний образца с графиками изменения износа и коэффициента трения в режиме реального времени для стали 45, обработанной методом ИКЭМО. Сравнение результатов триботехнических испытаний образцов нормализованным методом показало, что минимальными значениями времени приработки, износа и интенсивности изнашивания обладает сталь 45 с модифицированной структурой поверхностного слоя, имплантированного карбидами вольфрама, и последующим электромеханическим упрочнением.

Сравнение результатов статистических испытаний предлагаемой модели на ЭВМ и фактических значений интенсивности изнашивания испытываемых

образцов представлены на рисунке 3.8.

Сравнение расчетных и фактических значений параметров износостойкости показало правомерность рассматриваемого подхода к моделированию процессов контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения.

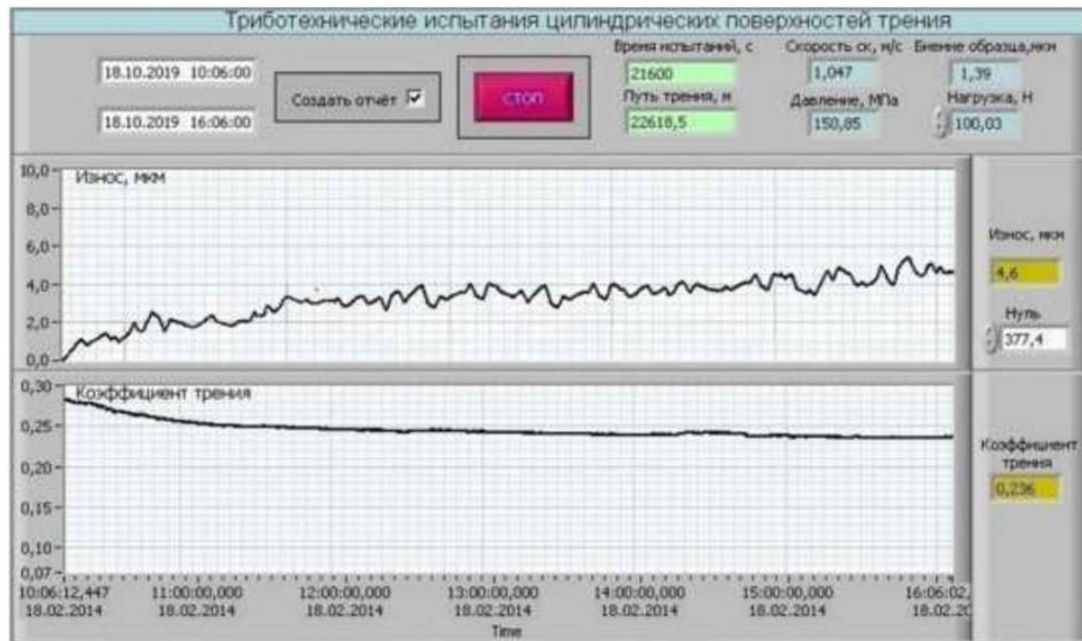


Рисунок 3.7 – Результаты испытаний образца, изготовленного из стали 45, обработанного методом ИКЭМО

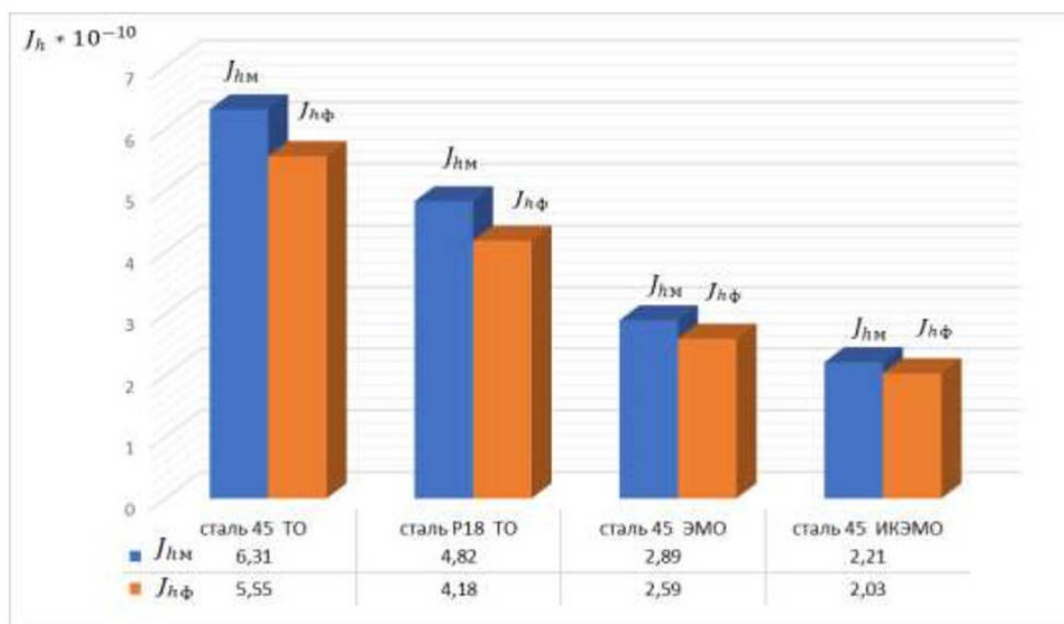


Рисунок 3.8 – Сравнение теоретических и экспериментальных исследований

3.4. Результаты и выводы по третьей главе

1. Предложен новый подход к моделированию контактного взаимодействия цилиндрических трибосопряжений, позволяющий с высокой точностью прогнозировать ключевые параметры контакта, такие как фактическая площадь, сближение поверхностей и контактное давление. Разработанная модель учитывает влияние топографии поверхности, степени деформационного упрочнения и комплекса физико-механических характеристик приповерхностных слоев материала на условия контактирования сопряженных поверхностей.

2. Разработана оригинальная модель изнашивания цилиндрических поверхностей трения, базирующаяся на комплексном учете параметров качества поверхностного слоя (шероховатости, деформационного упрочнения, физико-механических свойств) и условий трибонагружения. Установлено, что применение предложенной модели открывает перспективы целенаправленного обеспечения требуемого уровня износостойкости путем научно обоснованного выбора технологических методов обработки поверхностей с прогнозируемым комплексом геометрических и физико-механических характеристик качества.

3. Экспериментальная апробация разработанных моделей контактного взаимодействия и изнашивания на примере ряда типовых цилиндрических трибосопряжений подтвердила достоверность получаемых расчетных оценок износостойкости и обоснованность новых теоретических подходов к описанию закономерностей контактирования и износа поверхностей с учетом параметров качества поверхностного слоя.

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

4.1. Совершенствование теоретических основ и технологии электромеханического метода упрочнения поверхностей трения деталей машин

Одним из наиболее перспективных направлений новых технологий, позволяющих значительно увеличить износостойкость деталей машин при минимальных энергетических затратах, являются электромеханические методы обработки, основанные на сочетании термического и силового воздействия на поверхность обрабатываемой детали, что приводит к изменению физико-механических и геометрических показателей поверхностного слоя деталей машин и сохранению исходной структуры основной массы материала детали и, как следствие, к повышению износостойкости, динамической прочности, предела выносливости и других эксплуатационных свойств. Кроме того, этот способ позволяет заменить в изделии высоколегированную сталь конструкционной углеродистой или низколегированной сталью, что недоступно для других методов обработки.

Имплантирование материалов на основе карбида вольфрама в процессе электромеханической обработки приводит к дополнительному упрочнению поверхностного слоя материала, что в свою очередь повышает эксплуатационные показатели деталей машин. Порошок карбида вольфрама обладает уникальной величиной удельной поверхности и поверхностной энергии, что позволяет использовать его в качестве мощного структурообразующего вещества в различных сталях, для существенного улучшения их характеристик.

В настоящее время технология электромеханического упрочнения реализуется, в основном, с применением морально устаревших приборов и установок. Современная элементная база позволяет выйти на принципиально новый уровень разработок методов и схем электромеханической обработки, с имплантированием порошка карбида вольфрама и последующим

электромеханическим упрочнением, позволяющих усовершенствовать саму технологию и оборудование на основе применения новых аппаратных средств, и еще более снизить потребляемую мощность.

Основные преимущества технологии ИКЭМО – позволяет обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей деталей, минуя ряд традиционных технологических операций, таких как термическая, термомеханическая обработка, финишная обработка (доводка после термообработки) поверхностей деталей машин и механизмов.

Таким образом, технология ИКЭМО повышает микротвердость поверхностного слоя, за счет образования мелкокристаллической структуры закалки, а армирование карбидом вольфрама повышает контактную прочность, жесткость и микротвердость поверхностного слоя.

После тщательного анализа базовой конструкции и существующих методов ЭМО были выявлены следующие недостатки:

1. Отсутствует охлаждение роликов, применяемых в качестве инструмента для обработки.
2. Материал ролика не обладает достаточной износостойкостью.
3. Большие габаритные размеры инструментальной оснастки.
4. Токоподвод происходит через элементы станка.
5. Невозможность обработки больших деталей.

При электромеханической обработке, как показали теоретико-экспериментальные исследования, проводимые методами планирования экспериментов, наибольшее влияние на качество и эксплуатационные свойства поверхностного слоя оказывают такие режимы электромеханического упрочнения, как плотность тока, скорость обкатывания и давление ролика-электрода на обрабатываемую поверхность.

Общая закономерность при выборе режимов ЭМО состоит в следующем. Чем больше удельное насыщение энергией поверхностного слоя до момента его охлаждения, тем выше его упрочняемость по глубине. Повышение скорости способствует уменьшению глубины упрочнения. Однако, в весьма тонком

поверхностном слое увеличенная скорость может оказаться доминирующим фактором в связи с тепловыделениями от трения, что также происходит с увеличением давления в контакте при малых значениях силы тока. При высоких скоростях нагрева возможно неполное аустенитное превращение, однако под действием высоких давлений структура настолько измельчается, что превращение происходит даже при высоких скоростях. Выбор оптимальных режимов ЭМО представляет значительный практический интерес и зависит от требуемой степени и глубины упрочнения, шероховатости поверхности, закономерностей контактного нагрева, начальной шероховатости, геометрии инструмента, структуры обрабатываемой заготовки, метода электромеханического упрочнения и т.д.

Во всех случаях обработка должна осуществляться при достаточной жесткости технологической системы и отсутствии вибрации. При этом шероховатость рабочей поверхности инструмента должна быть ниже требуемой шероховатости после обработки, а подача – меньше применяемой при механической обработке.

Увеличение радиуса инструмента снижает влияние значения подачи. С увеличением исходной шероховатости повышается степень неоднородности образованной поверхности и увеличивается вероятность отклонения силы деформирования от оптимального значения [30].

Эффект упрочнения ЭМО достигается благодаря тому, что реализуются сверхбыстрые скорости нагрева и охлаждения и достигается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Плотность тока является ключевым параметром, определяющим эффективность процесса ЭМО поверхностных слоев материалов. Варьируя значения плотности тока, можно достичь требуемого уровня упрочнения, характеризуемого соответствующими коэффициентами упрочнения. Помимо повышения износостойкости, ЭМО способствует увеличению сопротивления усталости поверхностного слоя за счет формирования благоприятных остаточных

напряжений сжатия при умеренных температурах и давлениях обработки. Однако, при высоких температурах и значительных давлениях в поверхностном слое могут возникать растягивающие остаточные напряжения, несмотря на мартенситную структуру, что негативно сказывается на пределе выносливости материала [30].

В процессе ЭМО, знак и величина остаточных напряжений определяются комплексным воздействием температурных и силовых факторов на поверхностный слой. Следует отметить, что применение постоянного тока не приводит к повышению сопротивления усталости. Для деталей, подверженных высоким динамическим нагрузкам, особенно в зонах концентрации напряжений, рекомендуется комбинированное применение обработки с током и без тока, что способствует формированию благоприятных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое [30].

Поверхностные слои, обработанные методом ЭМО, демонстрируют повышенную теплостойкость по сравнению с другими видами термообработки. Снижение микротвердости поверхностного слоя практически не наблюдается до температуры отпуска около 300°C , а полное разупрочнение светлой зоны происходит при температурах отпуска свыше 600°C . Интенсивность изменения прочностных свойств поверхностного слоя в процессе старения зависит от режимов ЭМО, причем наиболее интенсивное падение прочности наблюдается у образцов с более высокой исходной твердостью, обработанных по более жестким режимам [30].

Упрочнение поверхностных слоев методом ЭМО способствует повышению их коррозионной стойкости, в частности, фреттингостойкости, особенно в кислых средах. Это обусловлено не только высокой степенью упрочнения, специфической структурой и дисперсностью поверхностного слоя, но и совокупностью благоприятных физико-механических свойств. Существенную роль играют особенности микропрофиля поверхности, связанные с увеличением радиусов закругления микровыступов и впадин, а также с увеличением опорной поверхности, что приводит к снижению контактных давлений. Зависимость фреттингостойкости от плотности тока носит экстремальный характер, что

объясняется развитием усталостных трещин при значительных значениях плотности тока, приводящих к увеличению шероховатости поверхности [30].

В связи с повышением эксплуатационных свойств, электромеханическую обработку целесообразно применять для широкой номенклатуры деталей, работающих в различных условиях трения и изнашивания.

Экономически выгодно использовать для ответственных пар трения не дорогостоящие высокоуглеродистые и высоколегированные стали, а относительно дешевые среднеуглеродистые, на которых можно получить аналогичную микротвердость, чего не позволяют добиться в подобной степени другие методы термообработки и поверхностного упрочнения. В этом состоит преимущество технологии ЭМО. Коэффициент упрочнения достигает $k = 3,5$.

Также на среднеуглеродистых сталях с помощью метода ЭМО можно подготовить поверхности требуемого качества (не уступающие по микротвердости высокоуглеродистым и высоколегированным сталям) перед нанесением высокотвердых нанопокровов.

4.2. Электромеханический метод имплантирования высокотвердых дисперсных частиц с последующим упрочнением поверхностного слоя

Значительная часть рабочих поверхностей деталей машин требует повышения долговечности, лимитированной в большинстве случаев их износостойкостью. В зависимости от требований к рабочей поверхности детали ее электромеханическая обработка может осуществляться переменным или постоянным током.

Технология ЭМО реализуется на специальной установке, представляющей собой технологический комплекс, состоящий: из универсального станка (применяемого для механической обработки заготовок) с соответствующими инструментами и приспособлениями для закрепления обрабатываемой детали и подвода электрического тока большой силы и малого напряжения; силового блока для преобразования промышленного электрического тока; блока управления

режимами обработки; средств коммутации и подвода смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС); блока сопряжения с ПЭВМ.

Технологическая оснастка позволяет использовать технологию ЭМО мобильно, в совокупности с любым универсальным станком, применяемым для механической обработки заготовок. Инструментальная оснастка состоит из двухроликовой головки, закрепляемой в резцедержателе токарно-винторезного станка, и средств коммутации для электромеханической обработки наружных цилиндрических поверхностей.

Для реализации технологии ЭМО использовался управляемый источник питания, позволяющий осуществлять электромеханическую обработку переменным током промышленной частоты и постоянным током.

С помощью данного источника питания можно осуществлять упрочнение и отделочную обработку поверхностей деталей машин, изготовленных из средне-, высокоуглеродистых, легированных сталей и высокопрочного чугуна. Применение переменного тока промышленной частоты (от управляемого источника питания) обеспечивает плавный переход твердости от поверхности к сердцевине, большую глубину упрочнения (до 2 мм), высокую микротвердость упрочненного слоя (до 1000 HV), шероховатость поверхности (без отделочной обработки) в пределах $R_a = 0,8...3,2$ мкм. Упрочнение и отделочная обработка при применении постоянного тока позволяют добиваться высокого качества поверхности, когда не требуется большая глубина упрочнения (до 0,5 мм), а необходимо значительное уменьшение значений высотных параметров исходной шероховатости (для R_a – в 4...10 раз).

Применение данной технологии ЭМО целесообразно для упрочнения и отделочной обработки рабочих поверхностей широкой номенклатуры деталей, работающих в различных условиях трения и изнашивания: сопряжений типа «вал – втулка»; осей, валов и штоков; шеек и галтелей ступенчатых валов; поверхностей деталей, образованных металлизацией, напылением, нанесением покрытий, наплавкой; сопряжений типа «вал – подшипник качения», работающих в условиях

фреттинг-коррозии; прокатных валков; деталей, изготовленных из труднообрабатываемых металлов и сплавов, и др.

Управляемый источник питания переменного тока с фазоимпульсным регулированием (с помощью программируемого микропроцессорного блока управления) выполнен в виде устройства, основными функциональными узлами которого являются силовой питающий трансформатор, тиристорный контактор, блок управления (рисунок 4.1).

Напряжение питающей сети поступает на тиристорный контактор и блок управления. В зависимости от заданной величины тока блок управления формирует импульсы, обеспечивающие необходимый угол отпирания тириستоров контактора. Напряжение с выхода контактора поступает на первичную обмотку силового трансформатора. К вторичной обмотке трансформатора подключается нагрузка. Датчик тока служит для получения сигнала, соответствующего величине выходного тока. Блок управления имеет выход на высший уровень управления (ПЭВМ).



Рисунок 4.1 – Структурно-функциональная схема источника питания

Для реализации процесса электромеханического упрочнения разработан специализированный источник питания, включающий в себя силовой питающий трансформатор, тиристорный контактор и блок управления. В качестве силового

трансформатора применен трансформатор для машин контактной сварки, подключаемый к клеммам шкафа управления посредством гибкого кабеля. Тиристорный контактор открытого исполнения состоит из двух встречно-параллельно включенных тириستоров, элементов управления и разъема для подключения регулятора [36].

Регулирование выходного тока источника питания осуществляется блоком управления, построенным на базе регулятора контактной сварки, путем фазо-импульсного управления углом отпирания тиристоров контактора. Блок управления обеспечивает измерение действующего значения выходного тока (текущего и среднего значений во время нагревов), а также напряжения питающей сети. Информация о параметрах выполняемой программы, значениях тока, напряжении сети, позициях технологического цикла и количестве циклов отображается на жидкокристаллическом индикаторе [36].

Силовой питающий трансформатор, тиристорный контактор и блок управления конструктивно размещены в металлическом шкафу управления. Органы управления, индикации и отображения информации расположены на двери шкафа. Лицевая панель содержит кнопки задания параметров процесса, кнопку «Сброс», жидкокристаллический индикатор, светодиодные индикаторы режимов работы и индикатор напряжения сети. Монтаж шкафа выполнен с использованием обычных и ленточных жгутов, кабельные вводы расположены на нижней стенке. Шкаф управления, имеющий габаритные размеры 600x400x250 мм и массу 32 кг, закреплен вертикально на передвижной стойке для обеспечения мобильности источника питания [36].

В процессе упрочнения на высокоинтенсивных режимах инструмент подвергается значительному тепловому воздействию, приводящему к оплавлению и ускоренному износу ролика. Для эффективного отвода тепла оси роликов выполнены полыми с подводом проточной воды для охлаждения. Охлаждение реализуется с использованием централизованной водопроводной сети или автономной гидростанции. Подача смазывающе-охлаждающей жидкости, представляющей собой раствор электролита (NaCO_3 – 0,7%, NaNO_2 – 2%, NaNO_3

– 5%, H₂O – 92,3%), в ступицы роликов и зону упрочнения осуществляется системой охлаждения станка [36].

На упрочняемую деталь наносится обмазка состоящая из графитного смазочного материала и порошка карбида вольфрама.

Процесс комбинированной электромеханической обработки включает в себя 5 этапов:

1. Механическая обработка детали на металлообрабатывающем станке (чистовое точение).

2. Нанесение обмазки, состоящей из частиц карбида вольфрама и консистентного графитного смазочного материала.

3. Проведение технологического процесса имплантирования высокотвердых дисперсных частиц карбида вольфрама, предусматривающего установку в резцедержатель металлообрабатывающего станка инструментальной оснастки для имплантирования, состоящей из двухроликовой головки с роликами, изготовленными из стали 95X18; настройки скорости и подачи инструмента; давления в зоне контакта ролика-электрода с деталью; мощности установки для ЭМО и силы тока.

4. Проведение технологического процесса электромеханического упрочнения, предусматривающего установку в резцедержатель металлообрабатывающего станка инструментальной оснастки для упрочнения, состоящей из двухроликовой головки с роликами, изготовленными из псевдосплава карбида вольфрама с медью; настройки скорости и подачи инструмента; давления в зоне контакта ролика-электрода с деталью; мощности установки для ЭМО и силы тока, подача охлаждающей жидкости в зону контакта.

5. Проведение процесса чистового шлифования, предусматривающего установку в резцедержатель металлообрабатывающего станка оснастки для чистового шлифования и настройки технологического процесса шлифования.

Исследования, проведенные по выбору режимов электромеханического упрочнения, обеспечивающего наноструктурное состояние модифицированного поверхностного слоя, обладающего высокими параметрами качества и

износостойкости, позволили определить следующие рациональные режимы ИКЭМО.

При формировании имплантированного материалами на основе карбида вольфрама поверхностного слоя:

- плотность тока j , А/мм²: 350...550;
- скорость обработки v_o , м/мин (м/с): 1,41 (0,024)...3,93 (0,065);
- давление инструмента p , МПа: 12,5...25,0;
- подача $S = 0,6$ мм/об.

При электромеханическом упрочнении:

- плотность тока $j = 550$ А/мм²;
- скорость обработки $v_o = 1,41$ м/мин (0,024 м/с);
- давление инструмента $p = 25,0$ МПа;
- подача $S = 0,6$ мм/об.

При этом значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45, после обработки получались в следующих пределах: $R_a = 0,84...2,72$ мкм; $R_{max} = 4,29...16,22$ мкм; $S_m = 100...216$ мкм; $t_m = 48...66\%$; $k = 2,2...3,5$.

Технологический процесс ИКЭМО проходит за один «Установ» детали, что существенно повышает качество изготовления готовой продукции и снижает влияние фактора СПИЗ (станок – приспособление – инструмент – заготовка).

4.3. Процессы формирования микро- и наноструктур поверхностного слоя при ИКЭМО

Микро- и наноструктурное состояние поверхностей трения формируется в процессе электромеханической обработки при создании поверхностных слоев с имплантированными высокотвердыми дисперсными частицами, состоящими из материалов на основе карбида вольфрама.

Основное влияние на износостойкость обработанных поверхностей оказывают характер распределения и морфология дисперсной упрочняющей фазы

(упрочняющий композиционный эффект, реализующийся в результате распада пересыщенных твердых растворов структуры материала). Эффект упрочнения при ЭМО достигается благодаря тому, что реализуются высокие скорости нагрева и охлаждения, и достигается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [39, 40].

Для создания износостойких поверхностных слоев на поверхностях трения деталей машин разработанная технология комбинированной электромеханической обработки включает формирование слоя, имплантированного материалами на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением и чистовым шлифованием обрабатываемой поверхности.

Процесс имплантации показан на рисунке 4.2. Частицы карбида вольфрама внедряются в формируемый модифицированный поверхностный слой, армируя его. Затем на этой же поверхности проводится электромеханическая обработка на упрочняющих режимах (рисунок 4.3).



Рисунок 4.2. Процесс имплантации карбида вольфрама.



Рисунок 4.3. Упрочнение при ЭМО.

После чистового шлифования обработанной поверхности, были проведены замеры диаметра образцов, приведенные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Изменение размеров после обработки

№ образца	Диаметр до обработки, мм	Диаметр после обработки, мм
1	45,17	45,25
2	45,35	45,40
3	45,45	45,46
4	45,15	45,14

В таблице 4.1 номера образцов соответствуют следующим методам обработки:

1. Имплантированный карбидами вольфрама, без электромеханического упрочнения (рисунок 4.4).

3. Имплантированный карбидами вольфрама, с применением двойного электромеханического упрочнения. (рисунок 4.5).

2. Имплантированный карбидами вольфрама с применением электромеханического упрочнения (рисунок 4.6).

4. Имплантированный карбидами вольфрама на оптимальных режимах с применением электромеханического упрочнения (рисунок 4.7).



Рисунок 4.4 – Общий вид образца № 1 (таблица 4.1)



Рисунок 4.5 – Общий вид образца № 2 (таблица 4.1)



Рисунок 4.6 – Общий вид образца № 3 (таблица 4.1)



Рисунок 4.7 – Общий вид образца № 4 (таблица 4.1)

Замеры диаметра образцов после обработки на оптимальных режимах показали, что при реализации технологии ИКЭМО, точность образцов не выходит за пределы качества точности до обработки.

На данную технологию был получен патент на изобретение (RU 2704345 C1) № 2704345 от 28.10.2019 «Способ внедрения в поверхностный слой углеродистых конструкционных сталей карбидов и оксидов тугоплавких металлов комбинированным пластическим деформированием» (Приложение А).

4.4. Результаты и выводы по четвертой главе

1. Разработана технология комбинированной электромеханической обработки (ИКЭМО) для получения износостойкого модифицированного поверхностного слоя, имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением, начиная с обработки заготовки и заканчивая финишной обработкой детали. На данный способ обработки был получен патент на изобретение (RU 2704345 C1).

2. Определены рациональные режимы технологического процесса комбинированной электромеханической обработки (ИКЭМО).

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Сравнительные испытания износостойкости современных твердых антифрикционных покрытий и модифицированных поверхностных слоев трения

Для определения триботехнических показателей были проведены комплексные сравнительные испытания на образцах нормализованным методом, износостойкости конструкционной стали 45 с модифицированной структурой упрочненной поверхности (технология ИКЭМО) и достаточно дорогих и технологически сложных в получении современных износостойких покрытий.

Сталь 45 для исследований была выбрана, исходя из следующих соображений. Использование дефицитных и дорогих легированных конструкционных материалов во всем объеме детали нецелесообразно. Экономически оправдывает себя применение недорогих конструкционных материалов, подвергающихся закалке, при модифицировании поверхностного слоя, обеспечивающего нужный комплекс триботехнических свойств. В этой связи как нельзя лучше подходит Сталь 45.

Триботехнические испытания образцов для различных материалов и технологических методов обработки проводились с применением автоматизированной установки, созданной на базе машины трения МИ-1М, нормализованным методом с использованием нагружающего устройства оригинальной конструкции.

Для сравнительных испытаний износостойкости исследовались наружные цилиндрические поверхности образцов, изготовленных из сталей 20ХН2М, Р18 и 45.

Условия трения образцов: давление на рабочей поверхности $q = 4,0$ МПа; скорость трения $v = 1,0$ м/с; вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 50А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8.

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись

следующие показатели триботехнических свойств: время приработки t_0 , ч; приработочный износ h_0 , мкм; среднее значение коэффициента трения в период нормального изнашивания f ; отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к f ; среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания $J_h = (h - h_0) / (L - L_0)$, где h , мкм – суммарная величина износа образца за время испытаний, L , мкм – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, L_0 – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки; значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний $J_{h\Sigma} = h / L$.

Образцы с покрытиями на основе $Ti-Al-N$, и $Mo-Cr-N$, $Al_2O_3-Cr_2O_3$ и $Si-O-C-N$ были изготовлены в ООО «НПФ «Плазмацентр» (г. Санкт-Петербург).

Описание покрытий и технологий их получения представлены в таблице 5.1.
Таблица 5.1 – Описание покрытий и технологий их получения

№ образца	Технология нанесения покрытия	Используемое оборудование	Материал покрытия	Толщина покрытия, мкм
1	<i>ArcPVD</i> (ионно-плазменное напыление, сталь Р18)	Установка ионно-плазменного напыления с сепарацией плазменного потока ННВ-6,6-И1	Покрытие системы <i>Ti-Al-N</i>	3
2	<i>ArcPVD</i> (ионно-плазменное напыление, сталь Р18)	Установка ионно-плазменного напыления с сепарацией плазменного потока ННВ-6,6-И1	Покрытие системы <i>Mo-Cr-N</i>	3
3	ДН (детонационное напыление, сталь Р18)	Детонационный комплекс «Гранат»	Композиционное керамическое покрытие системы $Al_2O_3-Cr_2O_3$	300
4	ФПУ (финишное плазменное упрочнение, сталь 45)	Комплекс для плазмохимического осаждения покрытий «ТЕСИС-115»	Нанопокрытие системы <i>Si-O-C-N</i>	1

Результаты триботехнических испытаний представлены в таблице 5.2.

Сравнение результатов триботехнических испытаний образцов нормализованным методом показало, что минимальными значениями износа и интенсивности изнашивания обладает сталь 45 с модифицированной структурой

поверхностного слоя, имплантированного карбидами вольфрама, и последующим электромеханическим упрочнением.

Таблица 5.2 – Результаты триботехнических испытаний

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для образца					
		сталь 20ХН2М, цементация	Сталь Р18, ArcPVD, Ti-Al-N	Сталь Р18, ArcPVD, Mo-Cr-N	Сталь Р18, ДН, Al ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃	Сталь Р18, ФПУ, Si-O-C-N	Сталь 45, ИКЭМО
Прирабатываемость	t_0 , ч	0,80	0,58	0,75	1,35	0,33	1,48
	h_0 , мкм	1,75	1,3	1,5	2,0	0,9	3,2
	f_0/f	1,23	1,42	1,46	1,36	4,75	1,19
Антифрикционность	f	0,40	0,32	0,25	0,11	0,04	0,24
Износостойкость	h , мкм	7,78	9,7	9,6	5,26	6,9	4,6
	$J_h \cdot 10^{-10}$	2,31	3,12	3,09	2,19	2,16	0,82
	$J_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	2,69	3,35	3,32	2,67	2,38	2,03

На рисунках 5.1 – 5.6 приведены результаты испытаний образцов с графиками изменения износа и коэффициента трения в режиме реального времени с применением АСНИ для проведения испытаний на трение и изнашивание нормализованным методом.

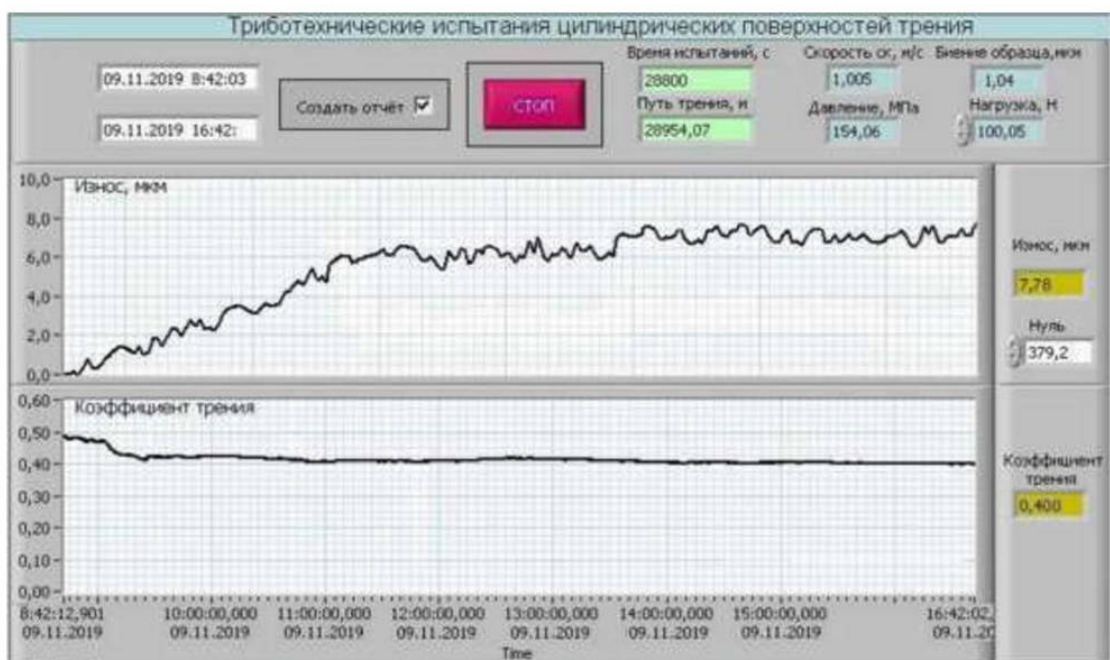


Рисунок 5.1 – Результаты испытаний образца после цементации

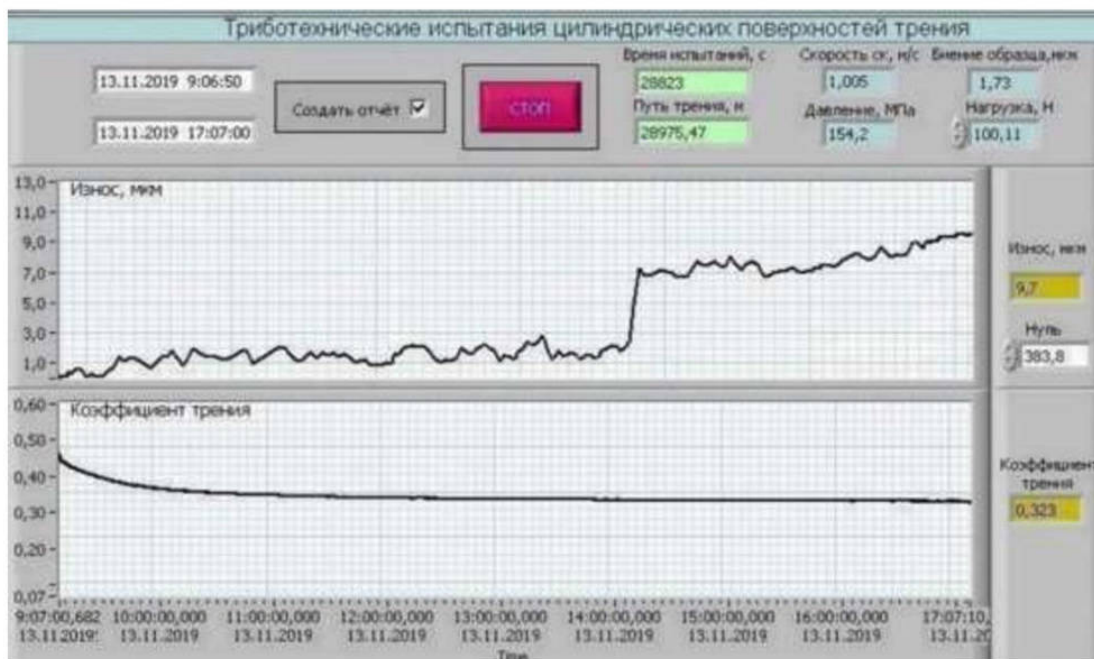


Рисунок 5.2 – Результаты испытаний образца после *ArcPVD* (покрытие системы *Ti-Al-N*)

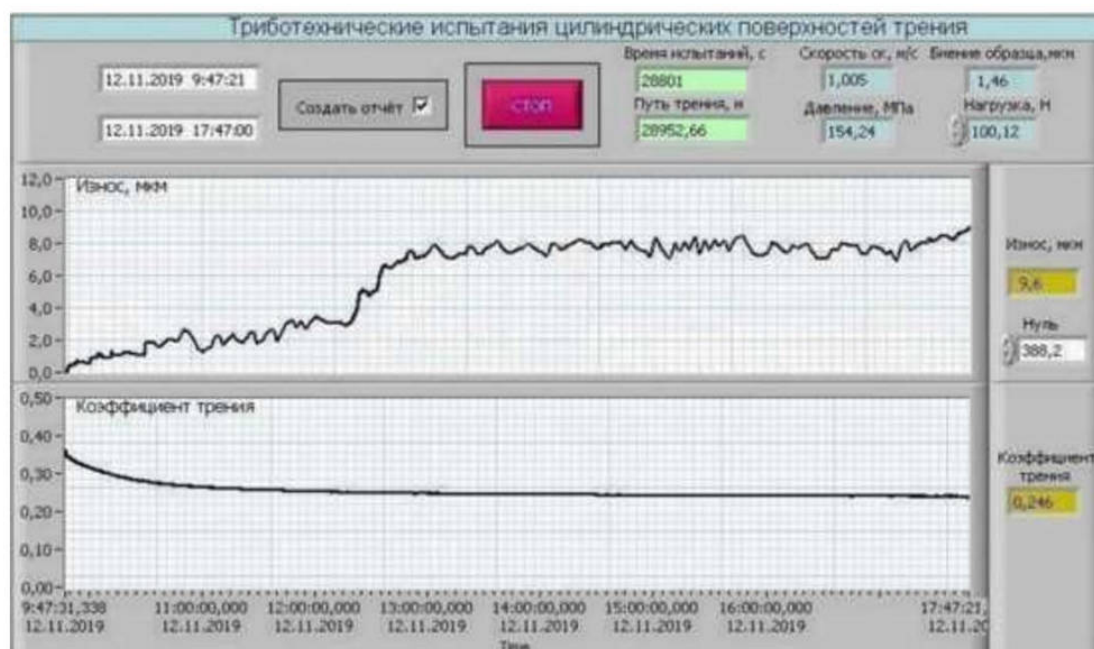


Рисунок 5.3 – Результаты испытаний образца после *ArcPVD* (покрытие системы *Mo-Cr-N*)

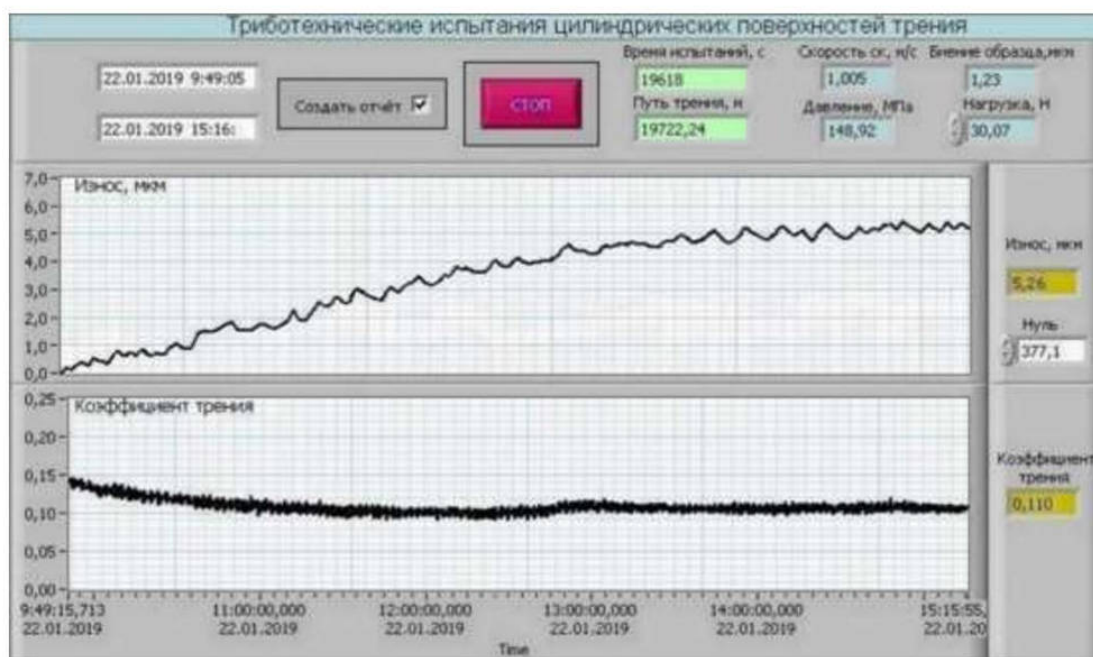


Рисунок 5.4 – Результаты испытаний образца после ДН (покрытие системы $Al_2O_3-Cr_2O_3$)

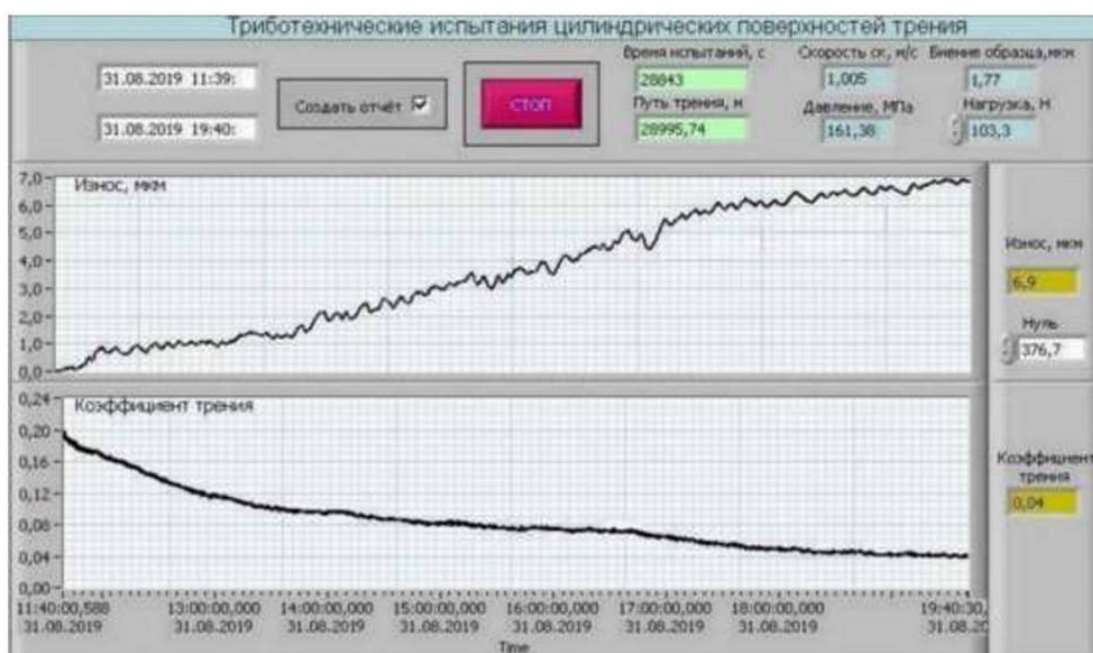


Рисунок 5.5 – Результаты испытаний образца после ФПУ (покрытие системы $Si-O-C-N$)

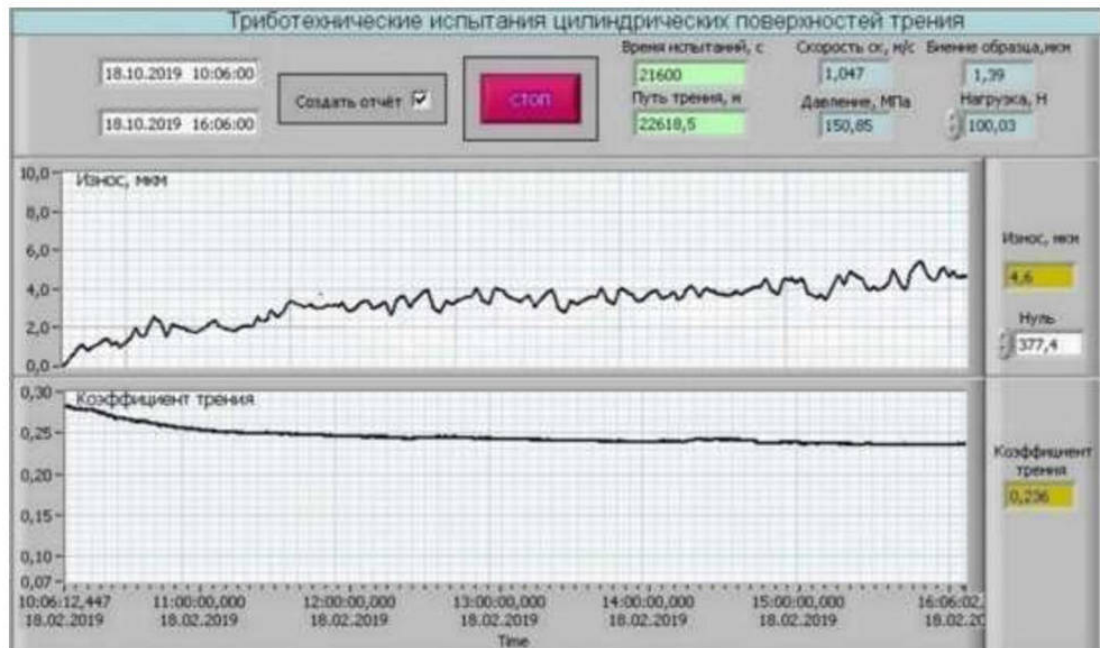


Рисунок 5.6 – Результаты испытаний образца после ИКЭМО

5.2. Исследования влияния режимов ИКЭМО на качество и износостойкость обрабатываемых поверхностей

Широкими возможностями при обеспечении требуемой интенсивности изнашивания цилиндрических поверхностей трения, а также требуемых параметров качества поверхностного слоя сопряженных деталей, в частности параметров шероховатости и коэффициента упрочнения, обладает технология формирования износостойкого модифицированного поверхностного слоя, имплантацией материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением (ИКЭМО.)

При реализации технологии ИКЭМО методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа получены следующие зависимости между режимами ИКЭМО и интенсивностью изнашивания J_h , параметром шероховатости R_a , коэффициентом упрочнения поверхностного слоя k :

$$J_h = 40,49 \cdot 10^{-10} \cdot j^{-0,42} \cdot v_0^{0,11} \cdot p^{-0,09}, \quad (5.1)$$

$$R_a = 114,44 \cdot j^{-0,57} \cdot v_0^{-0,69} \cdot p^{-0,05}, \quad (5.2)$$

$$k = 0,09 \cdot j^{0,53} \cdot v_0^{-0,12} \cdot p^{0,11}. \quad (5.3)$$

При этом значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45 ($HV_{исх} = 220$), варьировались в следующих пределах: $R_a = 0,84 \dots 2,72$ мкм; $R_{max} = 4,29 \dots 16,22$ мкм; $S_m = 100 \dots 216$ мкм; $t_m = 48 \dots 66\%$. Условия трения образцов: давление на рабочей поверхности $q = 4,0$ МПа; скорость трения $v = 1,0$ м/с; вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 50А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8.

Исходные данные для множественного регрессионного анализа представлены в таблице 5.3. Осуществлялся план эксперимента типа 2^3 .

Таблица 5.3 – Исходные данные для множественного регрессионного анализа

№ опыта	Технологические режимы ИКЭМО			Интенсивность изнашивания $J_h \times 10^{-10}$	Параметр шероховатости R_a , мкм	Коэффициент упрочнения k
	$x_1(j)$	$x_2(v_0)$	$x_3(p)$			
1	–	–	–	2,77	2,72	2,56
2	+	–	–	2,34	2,03	3,22
3	–	+	–	3,01	1,54	2,18
4	+	+	–	2,61	1,15	2,75
5	–	–	+	2,70	2,51	2,61
6	+	–	+	2,03	2,65	3,45
7	–	+	+	2,92	1,45	2,44
8	+	+	+	2,46	0,84	3,04

Технологическими факторами при обработке образцов, изготовленных из стали 45, при формировании имплантированного материала на основе карбида вольфрама поверхностного слоя являлись:

- плотность тока $x_1(j)$, А/мм²: «–» – 350, «+» – 550;
- скорость обработки $x_2(v_0)$, м/мин (м/с): «–» – 1,41 (0,024), «+» – 3,93 (0,065);
- давление инструмента $x_3(p)$, МПа: «–» – 12,5; «+» – 25,0;
- подача $S = 0,6$ мм/об.

Технологическими факторами при электромеханическом упрочнении

образцов являлись:

- плотность тока $j = 550 \text{ А/мм}^2$;
- скорость обработки $v_o = 1,41 \text{ м/мин}$ ($0,024 \text{ м/с}$);
- давление инструмента $p = 25,0 \text{ МПа}$;
- подача $S = 0,6 \text{ мм/об.}$

На рисунке 5.7. приведены графики зависимостей: $J_h = f(j)$; $J_h = f(v_o)$; $J_h = f(p)$ при очередном варьировании одной из переменных j , v_o , p в уравнении регрессии (5.1) Диапазоны изменения переменных соответствуют верхнему и нижнему уровням входных факторов. При изменении одной из переменных значения двух других являются средними из диапазона их изменений: $j_{\text{ср}} = 450 \text{ А/мм}^2$; $v_{o\text{ср}} = 2,67 \text{ м/мин}$; $p_{\text{ср}} = 18,75 \text{ МПа}$.

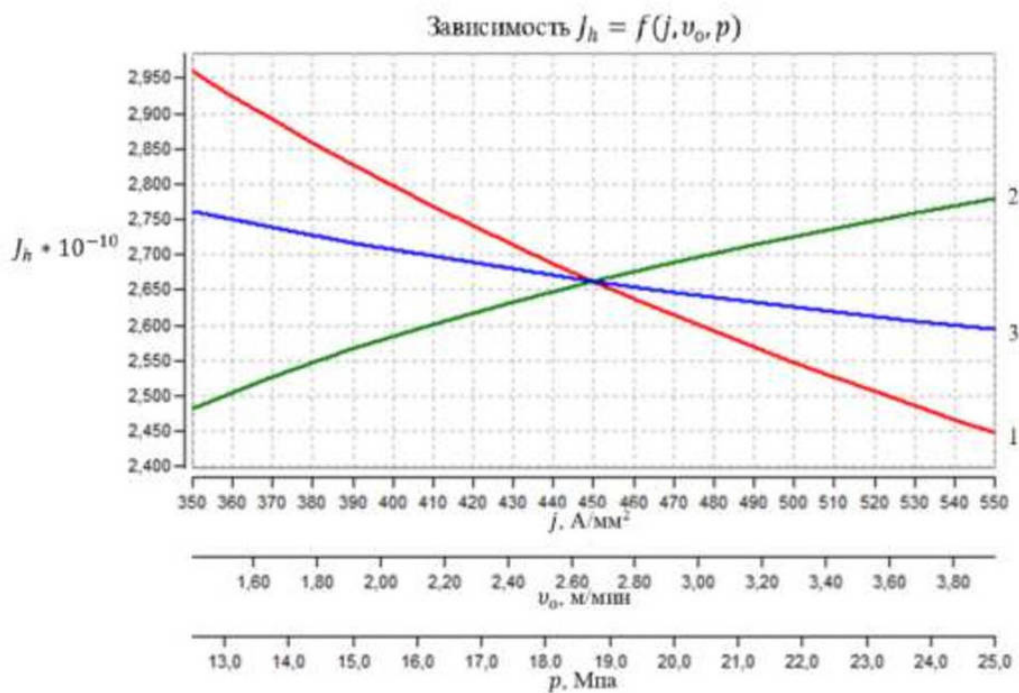


Рисунок 5.7 – Графики зависимостей:

$$1 - J_h = f(j); 2 - J_h = f(v_o); 3 - J_h = f(p)$$

На рисунке 5.8. приведены графики зависимостей: $R_a = f(j)$; $R_a = f(v_o)$; $R_a = f(p)$ при очередном варьировании одной из переменных j , v_o , p в уравнении регрессии (5.2) Диапазоны изменения переменных соответствуют верхнему и

нижнему уровням входных факторов. При изменении одной из переменных значения двух других являются средними из диапазона их изменений:
 $j_{\text{ср}} = 450 \text{ А/мм}^2$; $v_{\text{оср}} = 2,67 \text{ м/мин}$; $p_{\text{ср}} = 18,75 \text{ МПа}$.

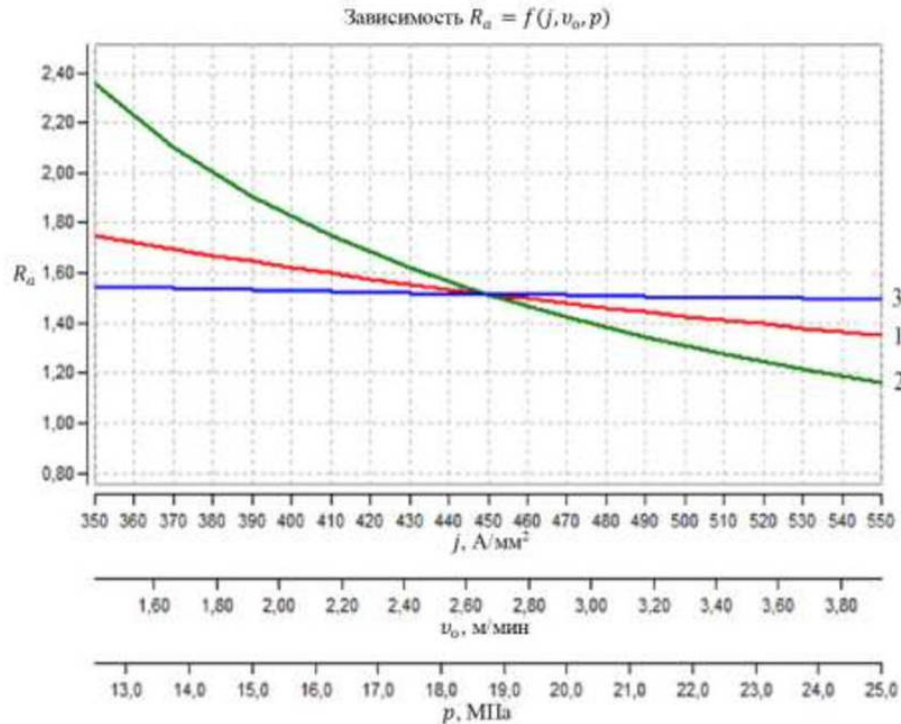


Рисунок 5.8 – Графики зависимостей:

$$1 - R_a = f(j); 2 - R_a = f(v_0); 3 - R_a = f(p)$$

На рисунке 5.9. приведены графики зависимостей: $k = f(j)$; $k = f(v_0)$; $k = f(p)$ при очередном варьировании одной из переменных j , v_0 , p в уравнении регрессии (5.3) Диапазоны изменения переменных соответствуют верхнему и нижнему уровням входных факторов. При изменении одной из переменных значения двух других являются средними из диапазона их изменений:
 $j_{\text{ср}} = 450 \text{ А/мм}^2$; $v_{\text{оср}} = 2,67 \text{ м/мин}$; $p_{\text{ср}} = 18,75 \text{ МПа}$.

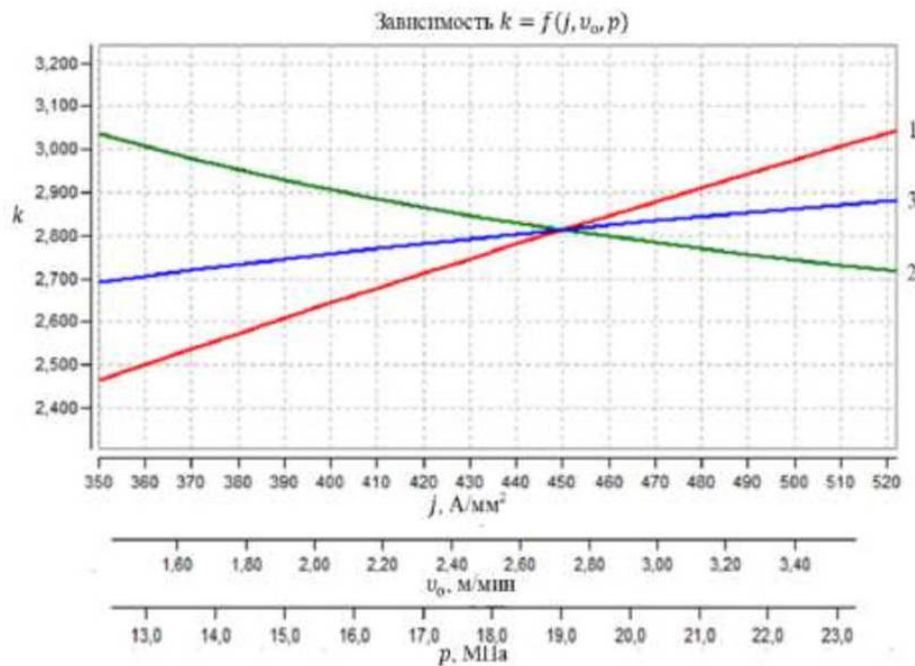


Рисунок 5.9 – Графики зависимостей:

$$1 - k = f(j); 2 - k = f(v_0); 3 - k = f(p)$$

5.3. Исследования влияния ИКЭМО на структурное состояние поверхностного слоя

В настоящее время интенсивно развиваются синерготехнологии [42], которые включают в себя не только аддитивные технологии по классификации стандарта *ASTM*, но и традиционные упрочняющие технологии, например, индукционный нагрев, плазменное напыление, поверхностное модифицирование, ионная имплантация и др. [91, 92].

Основной задачей синерготехнологий является обеспечение самоорганизации поверхностных явлений при последовательном формировании структур функциональных поверхностных слоев различных материалов или градиентных структур, и управление свойствами этих структур при разнообразном физическом высокотемпературном и силовом воздействии.

При этом ключевым элементом самоорганизации поверхностных явлений является устойчивое и стабильное формирование слоя определенной толщины с заданной структурой или фазовым составом, обеспечивающим требуемый

комплекс служебных свойств. Одним из ключевых вопросов является вопрос о процессах структурообразования в формирующемся слое.

В настоящей работе исследован фазовый состав и процессы формирования градиентных структур в модифицированном поверхностном слое, получаемых в высокоэнергетических процессах имплантирования материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением (ИКЭМО) [15, 38, 40, 42].

Функциональная поверхность трения углеродистой стали 45 обрабатывается порошком карбида вольфрама (размер частиц до 9 мкм) по технологии ИКЭМО

Порошок карбида вольфрама изготовлен на заводе тугоплавких металлов ЗАО "Компания "ВОЛЬФРАМ" (г. Унеча, Брянская область), по спецификации немецкой фирмы *ElementSixGmbH*.

Комбинированная электромеханическая обработка включает в себя два этапа.

На первом этапе (режим «высокотемпературная пластическая деформация») происходит имплантирование порошка карбида вольфрама из специальной графитной обмазки, наносимой на поверхность детали, в процессе перекатывания ролика, изготовленного из стали 95X18, по поверхности детали под определенной нагрузкой. Частицы карбида вольфрама, перемешиваясь с пластически деформируемым металлом, внедряются в процессе деформации в формируемый модифицированный поверхностный слой.

На втором этапе (режим «высокотемпературное термическое упрочнение») применяется ролик, изготовленный из псевдосплава карбида вольфрама с медью, для обеспечения сочетания высоких температур и давлений, под воздействием которых в момент электрического импульса происходит аустенизация поверхностного слоя стали в зоне контакта ролика и обрабатываемой поверхности. При этом углерод из обмазки в твердофазном процессе высокотемпературного насыщения, диффундирует в поверхностные слои детали, повышая содержание углерода в аустените. Карбиды вольфрама частично растворяются в аустените до предела его насыщения вольфрамом.

В результате обработки в модифицированном поверхностном слое формируется трехслойная градиентная структура, состоящая из упрочненного слоя толщиной (180...220) мкм (рисунок 5.10, слой 1), первого нижнего подслоя толщиной (200...250) мкм (рисунок 5.10, слой 2), второго нижнего подслоя толщиной (20...40) мкм (рисунок 5.10, слой 3) и матрицы, состоящей из нормализованной стали 45.

Микроструктурные исследования проводились на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения *Zeiss Ultraplus* на базе *Ultra 55*, Германия (*Zeiss Ultraplus Field Emission Scanning Electron Microscope*).

Слой 1 (рисунок 5.10) представляет собой смесь частиц карбида вольфрама WC в стальной основе. Следовательно, в процессе имплантирования происходит пластическое перемешивание карбида вольфрама в объеме стали в твердофазном состоянии.

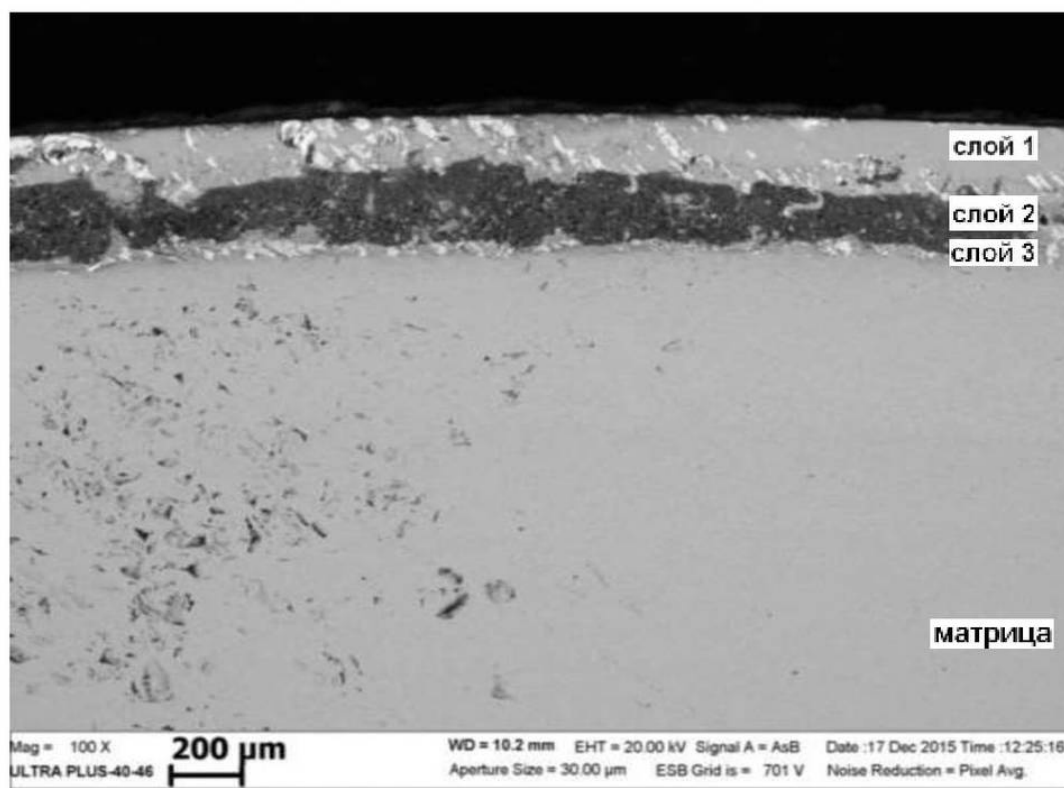


Рисунок 5.10 – Структура поверхностного слоя, упрочненного карбидом вольфрама, $\times 100$

Слой 2 (рисунок 5.10) представляет собой слабонасыщенный вольфрамом феррит, по границам зерен которого выделяется сетка карбида вольфрама. Следовательно, в процессе имплантирования и упрочнения, в слое 2 выделяется максимальное количество энергии, которое переводит систему в метастабильное состояние с последующим образованием ячеистой структуры (рисунок 5.11).

Данные ячеистые структуры имеют ярко выраженное эвтектическое строение, однако, сетка состоит из нитевидных кристаллов карбида вольфрама чередующихся с изолированными глобулярными высокодисперсными частичками карбида вольфрама (менее 1 мкм). Причем, сами нити эвтектической сетки состоят из коагулировавших дисперсных глобулей карбида вольфрама, образуя в целом, единую композиционную структуру.

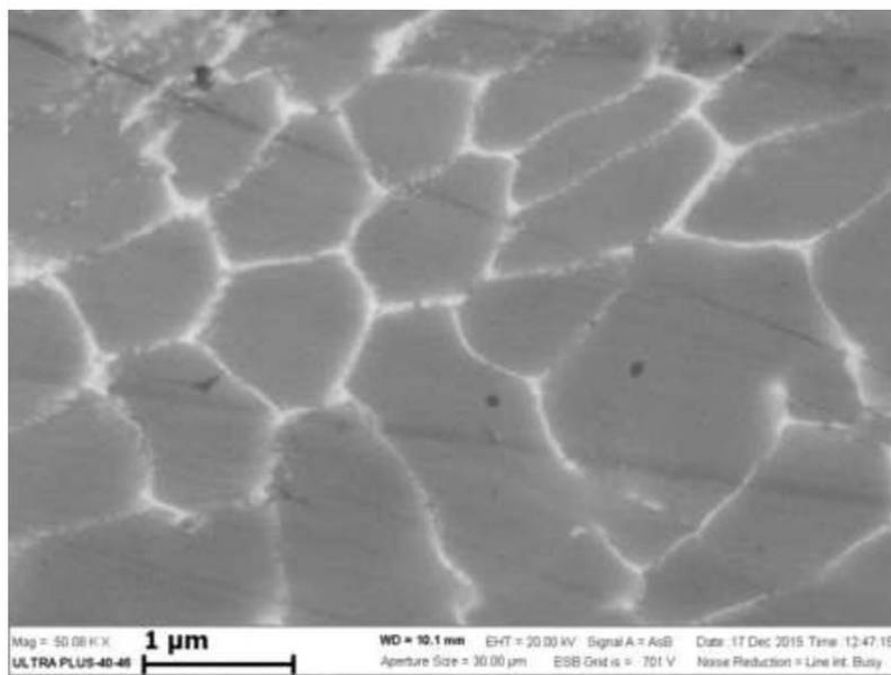


Рисунок 5.11 – Ячеистая структура переохлажденного аустенита в слое 2 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен), x50800

В соответствии с известной диаграммой $Fe - W$, температура слоя 2 в процессе обработки превышает температуру $1060^{\circ}C$, соответствующую перитектоидной реакции. В этих температурных условиях протекает полиморфное

превращение железа с образованием аустенита и растворением карбида вольфрама в аустените

Аналогичная структура наблюдается при переходе слоя 2 в слой 3 (рисунок 5.10), который намного тоньше слоя 1, но также насыщен частицами карбида вольфрама.

На рисунке 5.12 показана укрупненная микроструктура слоев 1 и 2, а в таблице 5.4 представлен результат энерго-дисперсионного анализа слоев.

Следовательно, в процессе имплантирования, в режиме «высокотемпературное пластическое деформирование» происходит интенсивное пластическое перемешивание частиц карбида вольфрама в объеме стали в твердофазном состоянии и их частичное растворение в аустените.

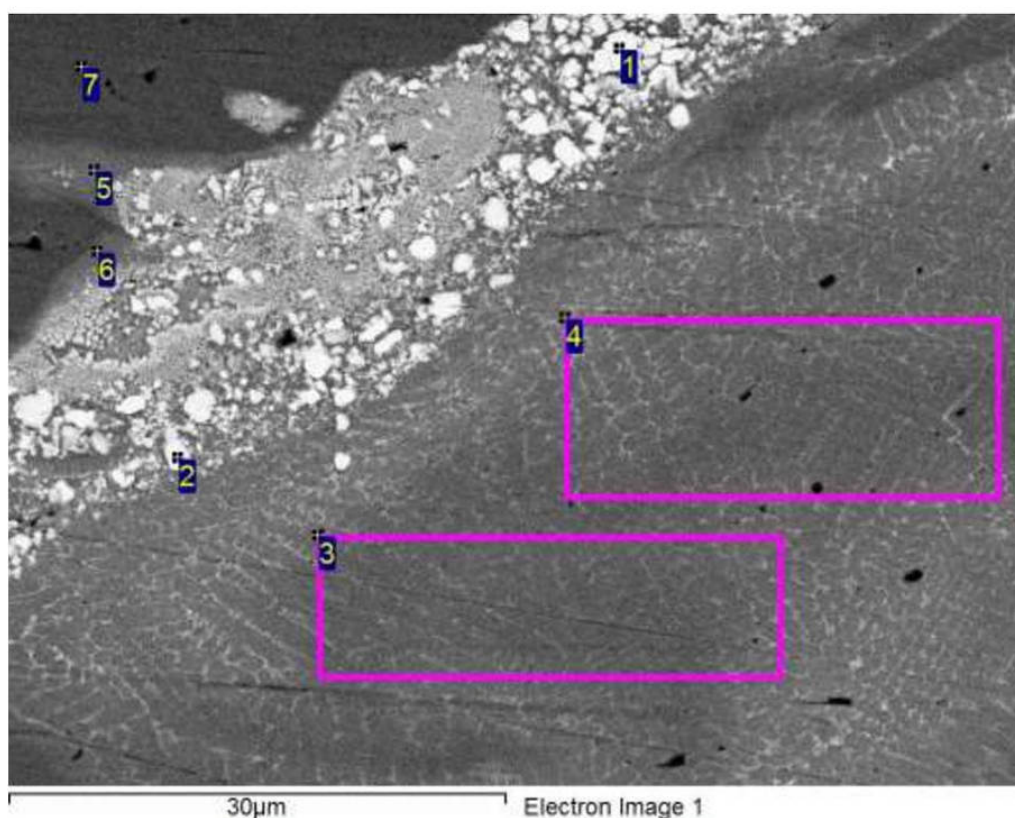


Рисунок 5.12 – Микроструктура слоя 1(частицы карбида вольфрама) и слоя 2 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен), x250

Таблица 5.4 – Энерго-дисперсионный анализ к рисунку 5.12, масс.%

Точки	<i>C</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>W</i>	<i>Total</i>
1	16,8	-	4,0	-	-	79,2	100,0
2	7,6	-	6,4	14,7	-	71,3	100,0
3	3,3	-	84,2	-	2,9	9,6	100,0
4	3,6	-	83,6	-	2,7	10,1	100,0
5	15,1	0,6	71,5	-	4,0	8,8	100,0
6	11,8	0,7	76,9	-	2,1	8,5	100,0
7	11,3	0,6	88,1	-	-	-	100,0

В таблице 5.4 присутствуют элементы *Cr* и *Cu*. Их появление связано с использованием различных роликов. В режиме «высокотемпературное пластическое деформирование» используется ролик, изготовленный из стали 95X18, и хром из ролика частично диффундирует в карбид вольфрама (точка 2, рисунок 5.12). В режиме «высокотемпературное термическое упрочнение» используется ролик, изготовленный из псевдосплава карбида вольфрама с медью, и медь, находящаяся в псевдосплаве в несвязанном состоянии с ролика переходит в твердый раствор аустенита (точки 3 – 6, рисунок 5.12).

На рисунке 5.13 показана укрупненная микроструктура слоя 2, а в таблице 5.5 представлен результат энерго-дисперсионного анализа слоя.

Энерго-дисперсионный анализ и характер структурообразования показывает, что в режиме «высокотемпературное термическое упрочнение», в момент прохождения силового электрического импульса в сочетании с максимальной нагрузкой деформирования на ролик, в слое 2 выделяется максимальное количество энергии, которое переводит систему в метастабильное состояние с последующим образованием ячеистой структуры (рисунок 5.10).

Таким образом, при имплантировании порошка карбида вольфрама в сталь 45, методом комбинированной электромеханической обработки, температура в активной зоне превышает уровень температуры перитектоидной реакции в 1060⁰С в системе *Fe – W*. Максимальной границей нагрева стали при термосиловом воздействии при имплантировании можно считать границу до 1300⁰С. Как следствие, в структуре стали образуется ячеистый переохлажденный аустенит с сеткой карбида вольфрама по границам зерен, что идентично структуре литой

быстрорежущей стали со сложной карбидной эвтектикой, напоминающей ледебурит и располагающейся также по границам зерен аустенита.

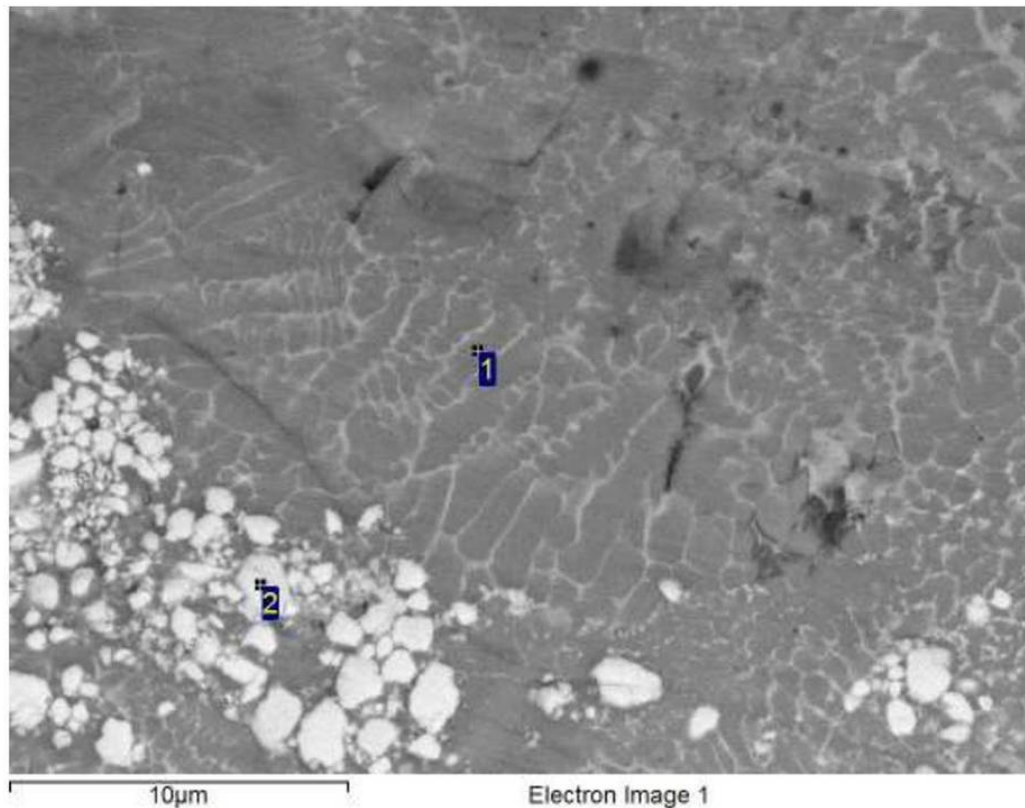


Рисунок 5.13 – Микроструктура слоя 2 (сетка карбида вольфрама) и частицы карбида вольфрама, x5030

Таблица 5.5 – Энерго-дисперсионный анализ к рисунку 5,13, масс. %

Точки	C	Fe	Cr	Cu	W	Total
1	13,5	68,3	-	6,2	12,0	100,0
2	14,5	9,1	4,2	3,2	69,0	100,0

В отдельных областях структуры, при переходе от слоя 1 к слою 2 (рисунок 5.12), обнаружены необычные структурные образования вблизи скоплений крупных частиц порошка карбида вольфрама (рисунок 5.14). Данные структуры имеют ярко выраженное эвтектическое строение, однако, состоят из нитевидных кристаллов карбида вольфрама, чередующихся с изолированными глобулярными частицами карбида вольфрама высокой степени дисперсности (рисунок 5.15). Причем, сами нити состоят из коагулировавших мельчайших

глобулей карбида вольфрама.

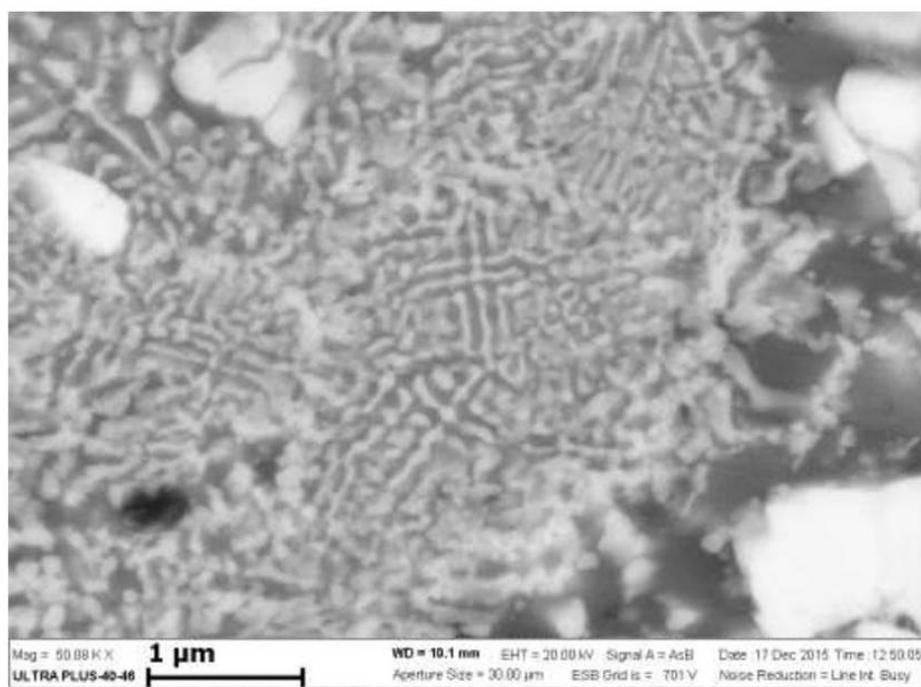


Рисунок 5.14 – Структура эвтектического типа и глобулярные кристаллы карбида вольфрама в переходных зонах упрочненного слоя в модифицированном слое стали 45, x50800

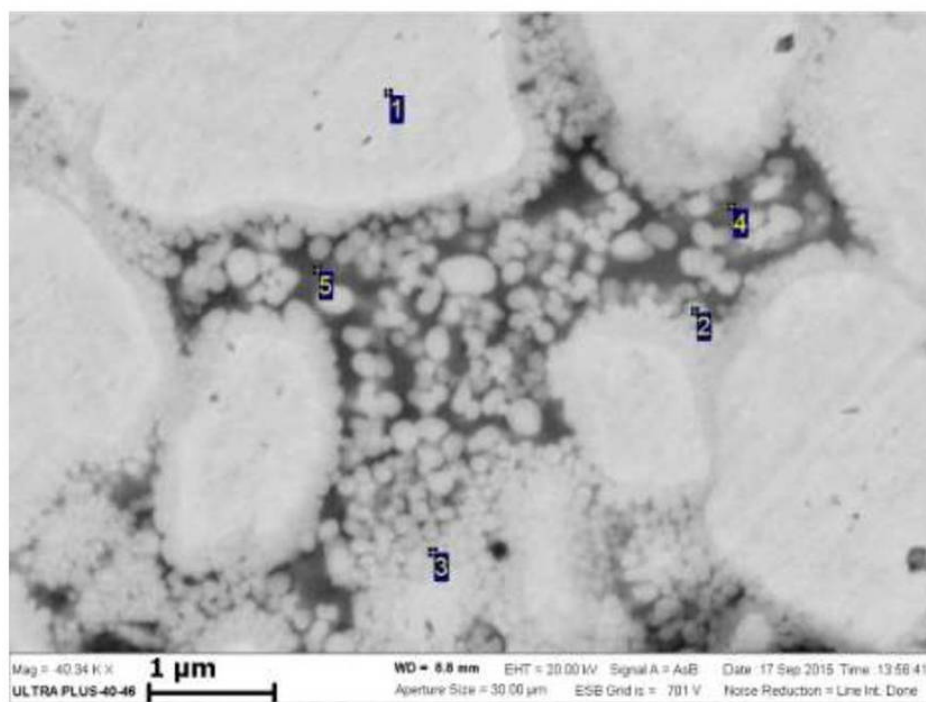


Рисунок 5.15 – Кристаллы глобулярной формы по границам частиц карбида вольфрама, x40340

В таблице 5.6 приведен энерго-дисперсионный анализ глобулярных структур к рисунку 5.15.

Таблица 5.6 – Энерго-дисперсионный анализ к рисунку 5,15, масс. %

Точки	C	Fe	W	Total
1	36,17	-	63,83	100,00
2	38,50	7,11	53,39	100,00
3	38,90	4,08	57,02	100,00
4	40,07	21,71	35,22	100,00
5	38,26	22,90	35,69	100,00

Особенностью данной структуры является своеобразная карбидная «бахрома» из глобулярных, близких к шаровидной форме дисперсных частиц карбида вольфрама по фазовой поверхности частиц карбида вольфрама (рисунок 5.15, зона 1), причем, более мелкие частицы карбида вольфрама покрыты карбидной «бахромой» в несколько слоев (рисунок 5.15, зоны 2 и 3).

Необычно и выделение значительно более крупных карбидных глобулей в переохлажденном аустените (рисунок 5.15, зоны 4 и 5).

Микротвердость слоев измерялась на микротвердомере мод. *Hardwin XL KB 30 S*. Измерение диагоналей отпечатков проводилось на микроскопе металлографическом инвертированном мод. Метам ЛВ-34 с применением автоматизированной системы анализа «Микро-Анализ View». В таблице 5.7 приведены значения микротвердости для многослойной упрочненной градиентной структуры износостойкой поверхности.

Таблица 5.7 – Микротвердость поверхностного слоя стали 45, упрочненного карбидом вольфрама

Микротвердость слоев, HV			
Слой 1	Слой 2	Слой 3	Матрица
741...812	546...633	431...525	224...232

5.4. Сравнительный анализ возможностей технологии ИКЭМО по сравнению с другими современными технологическими методами.

Сравнение результатов триботехнических испытаний образцов нормализованным методом показало (разделы 3.3, 5.1), что минимальными значениями износа и интенсивности изнашивания обладает имплантированный карбидами вольфрама поверхностный слой с последующим электромеханическим упрочнением (технология ИКЭМО).

Кривые износа для образцов с покрытием систем $Ti-Al-N$, $Mo-Cr-N$ и $Si-O-C-N$ характеризуются ускоренным ростом износа после износа покрытия. Кривая износа для образца после ИКЭМО более стабильна.

По результатам триботехнических испытаний установлено, что интенсивность изнашивания образцов, с имплантированным карбидами вольфрама поверхностным слоем и последующим электромеханическим упрочнением стали 45, в период нормального изнашивания меньше по сравнению: с образцами:

- с образцами (сталь 45) после ТО – в 2,95 раза;
- с образцами (сталь P18) после ТО – в 3,87 раза;
- с образцами (сталь 20ХН2М) после цементации в 2,82 раза;
- с образцами (сталь P18) после $ArcPVD$ (покрытие системы $Ti-Al-N$) – в 3,80 раза;
- с образцами (сталь P18) после $ArcPVD$ (покрытие системы $Mo-Cr-N$) – в 3,77 раза;
- с образцами (сталь P18) после ДН (покрытие системы $Al_2O_3-Cr_2O_3$) – в 2,67 раза;
- с образцами (сталь P18) после ФПУ (покрытие системы $Si-O-C-N$) – в 2,63 раза.
- с образцами (сталь 45), упрочненными ЭМО – в 1,37 раза;

Результаты испытаний образцов, обработанных с применением вышеописанных технологий представлены в разделах 3.3, 5.1.

5.5. Результаты и выводы по пятой главе

1. Методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа получены зависимости между режимами ИКЭМО и интенсивностью изнашивания J_h , параметром шероховатости R_a , коэффициентом упрочнения поверхностного слоя k .

2. Модификация поверхности трения стали за счет образования на ней поверхностного слоя, имплантированного и композиционно упрочненного карбидами вольфрама, наряду с формированием подслоя, состоящего из ячеистого переохлажденного аустенита, стабилизированного вольфрамом и армированного сеткой из карбида вольфрама, состоящей из агрегатированных наноразмерных частиц карбида вольфрама, методом ИКЭМО позволяет существенно повысить износостойкость поверхностей трения, что подтверждается триботехническими испытаниями.

3. Установлено, что одним из наиболее перспективных технологических методов, обеспечивающих износостойкость цилиндрических поверхностей трения, является разработанная технология комбинированной электромеханической обработки. Триботехнические испытания образцов нормализованным методом показали, что минимальными значениями износа и интенсивности изнашивания обладает имплантированный карбидами вольфрама поверхностный слой с последующим электромеханическим упрочнением (технология ИКЭМО), по сравнению с другими современными технологическими методами, в том числе нанесения износостойких антифрикционных покрытий.

6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

6.1. Технологические возможности и рекомендации по применению технологии ИКЭМО

Технология ИКЭМО основана на сочетании термического и силового воздействий, что приводит к изменению физико-механических и микрогеометрических показателей поверхностного слоя деталей, изготовленных из средне-, высокоуглеродистых, легированных сталей и высокопрочного чугуна (повышению твердости и прочности, снижению высотных параметров шероховатости и т.д.), позволяет повысить (в 1,5 – 3 раза) эксплуатационные показатели обрабатываемых деталей (износостойкость, контактную жесткость и прочность, предел выносливости, теплостойкость, фреттингостойкость).

Технологическая оснастка, состоящая из двухроликовой головки, закрепляемой в резцедержателе, и средств коммутации, позволяет использовать технологию ИКЭМО мобильно, в совокупности с любым токарным станком.

К улучшенным показателям технологии ИКЭМО относятся: электробезопасность; материало- и энергоемкость; мобильность и удобство эксплуатации; диапазон регулирования режимов обработки (плотности тока, скорости обработки, давления инструмента); выходные параметры процесса ЭМО (параметры микрогеометрии поверхности детали, физико-механические свойства, глубина упрочнения и др.).

Метод ИКЭМО может применяться для цилиндрических и сферических ответственных деталей автомобилей, а также для ходовых винтов станков, глобоидных червяков рулевого управления автомобиля, цилиндрических и конических резьбовых соединений (с метрической и трубной резьбой); вырубных пуансонов; поверхностей деталей, образованных металлизацией, напылением, нанесением покрытий, наплавкой, наваркой.

Эффективно применение технологии ИКЭМО таких деталей, работающих в

условиях фреттинг-коррозии, как сопряжения «вал – подшипник качения», «корпусная деталь – подшипник качения», где происходят относительные микроперемещения вследствие вибраций и приложения ударных нагрузок в процессе эксплуатации машин. Таким же воздействием подвергаются детали автотракторных, строительных и горных машин.

Применение технологии ИКЭМО целесообразно для цилиндрических поверхностей трения диаметром 20...200 мм, изготовленных из средне- и высокоуглеродистых сталей, в том числе легированных и инструментальных.

С целью получения высокого качества поверхностного слоя целесообразно применять следующие рациональные режимы ИКЭМО.

При формировании имплантированного материалами на основе карбида вольфрама поверхностного слоя:

- плотность тока j , А/мм²: 350...550;
- скорость обработки v_o , м/мин: 1,41...3,93;
- давление инструмента p , МПа: 12,5...25,0;
- подача $S = 0,6$ мм/об.

При электромеханическом упрочнении:

- плотность тока $j = 550$ А/мм²;
- скорость обработки $v_o = 1,41$ м/мин;
- давление инструмента $p = 25,0$ МПа;
- подача $S = 0,6$ мм/об.

6.2. Реализация результатов исследования применительно к паре трения «сателлит – ось сателлита»

Результаты исследований были применены к паре трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала переднего моста специального колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач».

По заводской технологии сателлит изготавливается из стали 35ХМНЛ с

$HV = 580$ (после цементации), ось сателлита дифференциала переднего моста колесного шасси изготавливается из стали 18ХГТ с $HV = 450$ (после цементации) и имеет крестообразную форму (рисунки 6.1, 6.2).



Рисунок 6.1 – Пара трения «сателлит – ось сателлита» в сборе



Рисунок 6.2 – Дифференциал переднего моста.

Сталь 18ХГТ, в связи с недостаточной ее износостойкостью, была заменена

сталью 45 с изменением конфигурации заводской детали на разъемные 2 оси (рисунок 6.3), и изготовлены опытные образцы осей сателлитов. После чего проводилось модифицирование поверхностного слоя, имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением.

Параметры качества поверхностного слоя оси сателлита представлены в таблице 6.1.



Рисунок 6.3 – Ось сателлита дифференциала.

Таблица 6.1 – Параметры качества поверхностного слоя оси сателлита.

Деталь пары трения и метод ее упрочнения	Параметры качества поверхностного слоя				
	R_a , мкм	R_p , мкм	R_{max} , мкм	S_m , мкм	t_m , %
Ось сателлита (заводской вариант)	1,6	4,9	8,8	40	52
Ось сателлита с ИКЭМО	1,4	4,3	11,0	139	59

Проводились сравнительные испытания износостойкости пары трения «сателлит – ось сателлита». В качестве технологических методов обработки цилиндрической поверхности рассматривались оригинальная технология изготовления оси сателлита (заводской вариант) и технология ИКЭМО.

Сравнительные испытания износостойкости проводились на стенде для

испытаний переднего моста специального колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач», созданном на АО «Брянский автомобильный завод». На рисунке 6.4 представлен общий вид стенда, а на рисунке 6.5 – его кинематическая схема.



Рисунок 6.4 – Общий вид стенда для испытаний

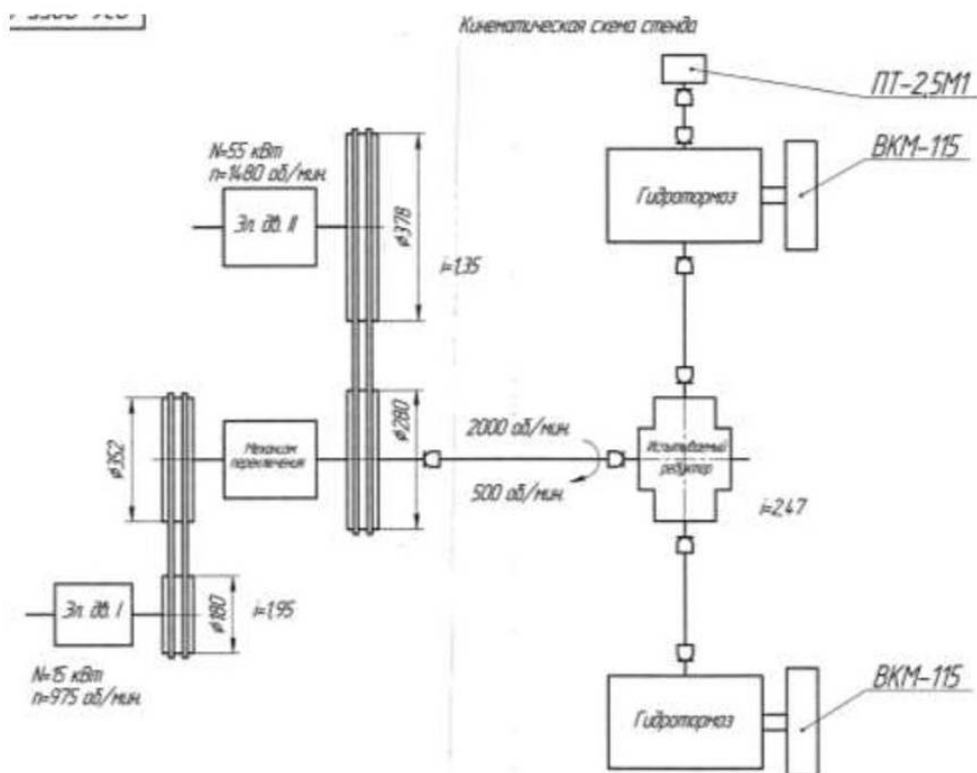


Рисунок 6.5 – Кинематическая схема стенда для испытаний

Было собрано 2 дифференциала с осями сателлитов, изготовленными из стали Л30 по заводской технологии, и осями сателлитов разрезного типа с применением технологии ИКЭМО. Далее каждый дифференциал был установлен в редуктор моста и проведены испытания согласно заводской инструкции. После цикла испытаний, узел подвергался разборке для измерения износа сопряжения.

Результаты сравнительных испытаний износостойкости данной пары трения представлены на рисунке 6.6.

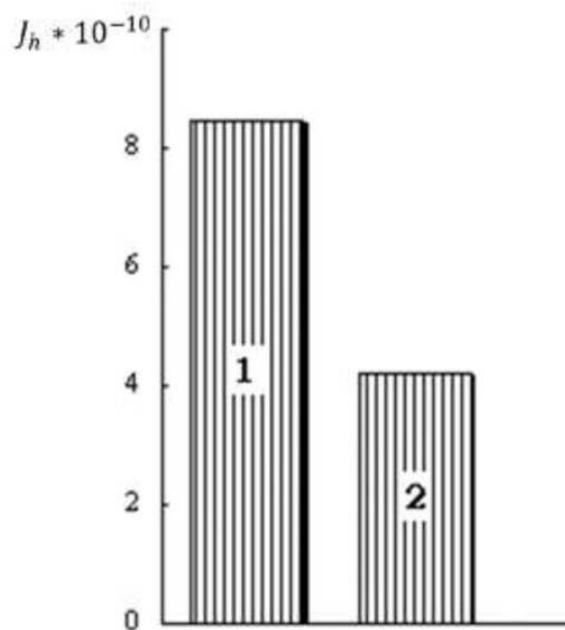


Рисунок 6.6 – Интенсивность изнашивания пары трения «сателлит – ось сателлита»: 1 – заводской вариант, 2 – технология ИКЭМО

Интенсивность изнашивания пары трения «сателлит – ось сателлита» по заводской технологии составила $J_{h1} = 8,46 \cdot 10^{-10}$, а изготовленной с применением технологии ИКЭМО $J_{h2} = 4,08 \cdot 10^{-10}$.

Результаты испытаний показывают, что при реализации технологии ИКЭМО интенсивность изнашивания пары трения «сателлит – ось сателлита» уменьшается в 2,07 раза по сравнению с заводским вариантом. Акт проведения заводских испытаний представлен в приложении Б.

Была проведена оценка относительного увеличения ресурса данного

сопряжения при реализации технологии ИКЭМО по сравнению с заводским вариантом обработки.

Относительный нормальный износ в сопряжении

$$h' = h/[h], \quad (6.1)$$

где $[h]$ – величина допустимого износа сопряжения.

Тогда при достижении величины износа, равной допустимой, $h = [h]$, $h' = 1$. Относительный ресурс работы до достижения допустимого износа пары трения

$$T = 1/J'_h, \quad (6.2)$$

где $J'_h = J_{h1}/J_{h2} \quad (6.3)$

Подставляя полученные в результате испытаний значения в формулы (6.3) и (6.2), будем иметь для соответствующих вариантов

$$J'_h = 2,07; \quad T_1 = 0,48 \text{ и } T_2 = 1 \quad (6.4)$$

С учетом формулы (6.4), на рисунке 6.7 представлено относительное увеличение ресурса пары трения «сателлит – ось сателлита» по результатам испытаний.

Из рисунка 6.7 следует, что при обработке по заводской технологии относительный ресурс сопряжения примерно в 2 раза меньше, чем при реализации технологии ИКЭМО.

Ресурс до замены дифференциала, при относительном его увеличении путем реализации технологии ИКЭМО, по сравнению с заводским вариантом, повышается в 2,07 раза.

Пробег автомобиля до замены дифференциала составляет 60 тыс. км. При реализации технологии ИКЭМО, пробег шасси до замены дифференциала составит 124 тыс. км, что соответствует повышению ресурса более, чем в 2 раза.

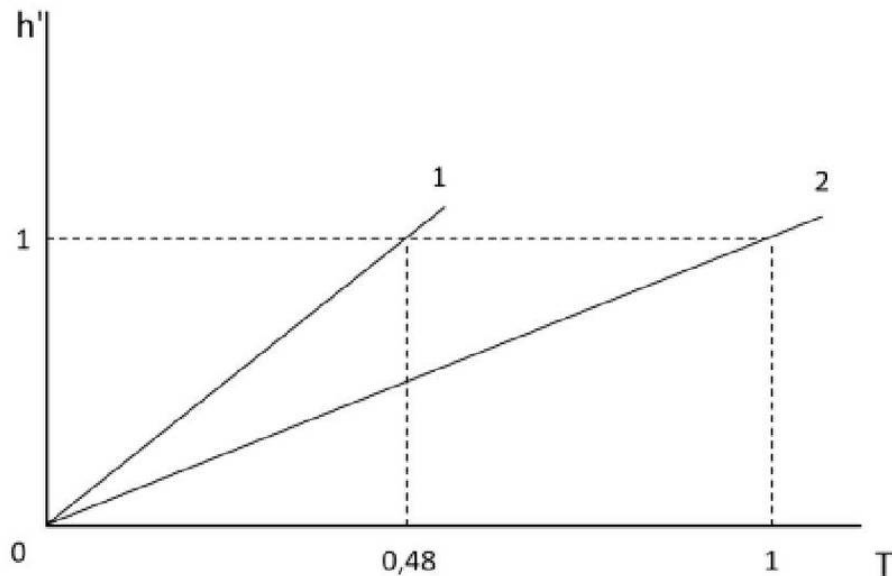


Рисунок 6.7 – Относительное увеличение ресурса пары трения «сателлита – ось сателлита»: h' , T – соответственно относительные величины допустимого износа и ресурса пары трения; 1 – заводской вариант, 2 – технология ИКЭМО

6.3. Расчет экономической эффективности

Был рассчитан экономический эффект от результатов исследований, за счет повышения ресурса пары трения «сателлит – ось сателлита», являющейся лимитирующей по ресурсу дифференциала, а следовательно, за счет снижения производства выпускаемых запасных частей.

При отказе или выработке ресурса пары трения «сателлит – ось сателлита», имеется необходимость замены дифференциала на новый.

Расчет экономического эффекта проводился методом функционально-стоимостного анализа, расчетный период составил 5 лет.

Данные для расчета:

- годовая программа производства дифференциала в сборе – 300 шт.;
- годовая программа производства осей сателлитов – 600 шт.;
- себестоимость изготовления дифференциала в сборе (в ценах 2024 г.) – 132660,81

руб.

Затраты предприятия за расчетный период, в связи с добавлением в технологический процесс изготовления оси сателлита операции ИКЭМО.

$$З_T = \sum_{t_H}^{t_K} З_t, \quad (6.5)$$

где $З_t$ – затраты за каждый год расчетного периода.

Затраты за каждый год расчетного периода (5 лет) после внедрения результатов исследований с 2024 по 2028 гг. определяются как

$$З_t = C_{\Pi} N \alpha_t, \quad (6.6)$$

где C_{Π} – полная себестоимость операции ИКЭМО оси сателлита; N – годовая программа производства осей сателлитов; α_t – коэффициент приведения к расчетному году, принят в соответствии с [92].

$$C_{\Pi} = C_T + Ц_T, \quad (6.7)$$

где $Ц_T$ – цеховые расходы ($Ц_T = 500\%$ от C_T); C_T – технологическая себестоимость операции ИКЭМО.

$$C_T = M + З_o + Н_з + P_o + P_{и}, \quad (6.8)$$

где M – стоимость сырья и материалов ($M = 0$); $З_o$ – основная заработная плата рабочего; $Н_з$ – начисления на заработную плату ($Н_з = 30,2\%$ от $З_o$); P_o – расходы на содержание и эксплуатацию оборудования ($P_o = 215\%$ от $З_o$); $P_{и}$ – расходы на специальный инструмент и приспособления ($P_{и} = 0$).

$$З_o = (1,4 t_{шт} C_{ТС}) / 60, \quad (6.9)$$

где $t_{шт}$ – штучное калькуляционное время операции ИКЭМО, $t_{шт} = 60$ мин; $C_{тс}$ – часовая тарифная ставка рабочего, $C_{тс} = 388,12$ руб/ч.

$$З_o = (1,4 \cdot 60 \cdot 388,12) / 60 = 543,37 \text{ руб.}$$

Тогда технологическая себестоимость операции ИКЭМО оси спутника с учетом формулы (6.8)

$$C_t = 543,37 + 0,302 \cdot 543,37 + 2,15 \cdot 543,37 = 1\,875,71 \text{ руб.}$$

Полная себестоимость операции ИКЭМО оси спутника с учетом формулы (6.7)

$$C_{п} = 1\,875,71 \text{ руб} + 5 \cdot 1\,875,71 = 11\,254,26 \text{ руб.}$$

Затраты по годам с учетом формулы (6.6) определяются следующим образом. Ресурс дифференциала при относительном его увеличении, путем реализации технологии ИКЭМО, по сравнению с заводским вариантом повышается в 2,07 раза. В связи с этим, вместо 600 осей спутников необходимо 290 шт. (экономия 310 осей спутников).

$$\text{Затраты за 2024 г. } З_t = 11\,254,26 \cdot 290 \cdot 0,9021 = 2\,944\,215,70 \text{ руб.}$$

$$\text{Затраты за 2025 г. } З_t = 11\,254,26 \cdot 290 \cdot 0,8264 = 2\,697\,150,93 \text{ руб.}$$

$$\text{Затраты за 2026 г. } З_t = 11\,254,26 \cdot 290 \cdot 0,7513 = 2\,452\,044,41 \text{ руб.}$$

$$\text{Затраты за 2027 г. } З_t = 11\,254,26 \cdot 290 \cdot 0,6830 = 2\,229\,131,28 \text{ руб.}$$

$$\text{Затраты за 2028 г. } З_t = 11\,254,26 \cdot 290 \cdot 0,6209 = 2\,026\,453,31 \text{ руб.}$$

Затраты за расчетный период с учетом (6.5) составят

$$З_T = 12\,348\,995,63 \text{ руб.}$$

Стоимостная оценка затрат приведена в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Затраты и результаты от внедрения исследований по годам

		2024	2025	2026	2027	2028
Затраты, тыс. руб.	$З_t$	2 944,22	2 697,15	2 452,04	2 229,13	2 026,45
	$З_T$	12 349,00				
Результаты, тыс. руб.	P_t	18 549,36	16 992,79	15 448,55	14 044,14	12 767,21
	P_T	77 802,05				

Результаты предприятия за расчетный период, за счет снижения производства выпускаемых запасных частей (экономии производства дифференциалов)

$$P_T = \sum_{t_n}^{t_k} P_t, \quad (6.10)$$

где P_t – результаты за каждый год расчетного периода.

Результаты за каждый год расчетного периода (5 лет) после внедрения результатов исследований с 2024 по 2028 гг. определяются как

$$P_t = C_d N \alpha_t, \quad (6.11)$$

где C_d – стоимость дифференциала в сборе; N – годовая программа производства дифференциалов; α_t – коэффициент приведения к расчетному году, принят в соответствии с [75].

Результаты по годам с учетом формулы (6.11) определяются следующим образом.

Ресурс дифференциала при относительном его увеличении, путем реализации технологии ИКЭМО, по сравнению с заводским вариантом повышается в 2,07 раза. В связи с этим, вместо 300 дифференциалов необходимо 145 шт. (экономия 155 дифференциалов).

Результаты за 2024 г. $P_t = 132660,81 \cdot 155 \cdot 0,9021 = 18\,549\,364,09$ руб.

Результаты за 2025 г. $P_t = 132660,81 \cdot 155 \cdot 0,8264 = 16\,992\,788,47$ руб.

Результаты за 2026 г. $P_t = 132660,81 \cdot 155 \cdot 0,7513 = 15\,448\,550,32$ руб.

Результаты за 2027 г. $P_t = 132660,81 \cdot 155 \cdot 0,6830 = 14\,044\,136,65$ руб.

Результаты за 2028 г. $P_t = 132660,81 \cdot 155 \cdot 0,6209 = 12\,767\,210,02$ руб.

Результаты за расчетный период с учетом (6.5) составят

$$P_T = 77\,802\,049,55 \text{ руб.}$$

Стоимостная оценка результатов приведена в таблице 6.2.

Экономический эффект за расчетный период

$$\mathcal{E}_T = P_T - Z_T \quad (6.12)$$

Экономический эффект за расчетный период (5 лет) в ценах 2024 г. составляет

$$\mathcal{E}_T = 77\,802,05 - 12\,349,00 = 65\,453,05 \text{ тыс. руб.}$$

6.4. Результаты и выводы по шестой главе

1. Применение технологии ИКЭМО позволяет повысить ресурс пары трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала переднего моста специального колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач», по сравнению с заводским вариантом, в 2,07 раза.

2. Экономический эффект от результатов исследований за расчетный период (5 лет), за счет повышения ресурса пары трения «сателлит – ось сателлита», являющейся лимитирующей по ресурсу дифференциала переднего моста, а, следовательно, за счет снижения затрат на производства выпускаемых запасных частей, составляет более 65 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе представлены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, направленные на повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения, в частности пары трения «сателлит – ось сателлита», на основе получения модифицированного поверхностного слоя имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением, имеющие существенное значение для развития страны. Полученное решение отличается от имеющихся применением новых моделей контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения, а также разработанной технологии комбинированной электромеханической обработки.

2. Разработана технология комбинированной электромеханической обработки (ИКЭМО) и определены рациональные режимы для получения износостойкого модифицированного поверхностного слоя имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением, начиная с обработки заготовки и заканчивая финишной обработкой детали. На данный способ обработки получен патент на изобретение (RU 2704345 C1).

3. Разработана модель процесса контактного взаимодействия, позволяющая определять характеристики контактного взаимодействия трущихся цилиндрических поверхностей: *фактическую* площадь контакта, сближение контактирующих поверхностей, *фактическое* давление; с учетом параметров шероховатости, *коэффициента упрочнения* и физико-механических свойств поверхностного слоя.

4. На основе предложенной модели изнашивания, учитывающей параметры качества поверхностного слоя, в частности параметры шероховатости, *коэффициент упрочнения* и физико-механические свойства, а также условия трения, представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность

изнашивания цилиндрических поверхностей трения применением технологии ИКЭМО.

5. Сравнение расчетных и фактических значений параметров износостойкости свидетельствует о высокой адекватности моделей процессов контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения.

6. Методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа получены зависимости между режимами ИКЭМО и интенсивностью изнашивания J_h , параметром шероховатости R_a , коэффициентом упрочнения поверхностного слоя k . Установлено, что доминирующим технологическим параметром ИКЭМО является плотность тока.

7. Модификация поверхности трения стали за счет образования на ней поверхностного слоя, имплантированного и композиционно упрочненного карбидами вольфрама, наряду с формированием подслоя, состоящего из ячеистого переохлажденного аустенита, стабилизированного вольфрамом и армированного сеткой из карбида вольфрама, состоящей из агрегатированных наноразмерных частиц карбида вольфрама, методом ИКЭМО позволяет существенно повысить износостойкость поверхностей трения, что подтверждается триботехническими испытаниями.

8. Установлено, что одним из наиболее перспективных технологических методов, обеспечивающих износостойкость цилиндрических поверхностей трения, является разработанная технология комбинированной электромеханической обработки. Триботехнические испытания образцов нормализованным методом показали, что минимальными значениями износа и интенсивности изнашивания обладает имплантированный карбидами вольфрама поверхностный слой с последующим электромеханическим упрочнением (технология ИКЭМО), по сравнению с другими современными технологическими методами, в том числе нанесения износостойких антифрикционных покрытий.

9. Применение технологии ИКЭМО позволяет повысить ресурс пары трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала переднего моста специального

колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач», по сравнению с заводским вариантом, в 2,07 раза.

10. Экономический эффект от результатов исследований за расчетный период (5 лет), за счет повышения ресурса пары трения «сателлит – ось сателлита», а следовательно, за счет снижения затрат на производство выпускаемых запасных частей, составляет более 65 млн руб.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. В перспективе предполагается усовершенствовать модель контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей трения, с целью учета не только параметров шероховатости, но и параметров волнистости и макроотклонений.
2. В предложенной модели изнашивания предполагается сделать акцент на контурную площадь контакта, определяющую несущую способность профиля, с учетом параметров шероховатости, волнистости и макроотклонений контактирующих поверхностей трения.
3. Совершенствование технологии комбинированной электромеханической обработки, может быть направлено на процессы получения износостойких модифицированных поверхностных слоев, композиционно упрочненных не только карбидами вольфрама, но и на основе других мелкодисперсных материалов высокой твердости, в том числе и на наноуровне.
4. Методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа предполагается получить зависимости между режимами ИКЭМО и износостойкостью, параметрами качества поверхностного слоя, для износостойких модифицированных поверхностных слоев, образованных на основе различных мелкодисперсных материалов высокой твердости.
5. Целесообразно расширить область полученных результатов применения технологии ИКЭМО, для более широкой номенклатуры деталей различных узлов трения машин.
6. Перспективно внедрение технологии ИКЭМО на различных машиностроительных предприятиях, в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Албагачиев, А. Ю. Триботехническая диагностика / Албагачиев А. Ю., Ставровский М. Е., Сидоров М. И., Кравченко И. Н., Галиновский А. Л., Рагуткин А. В. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 292 с.
2. Бирюков Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
3. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. – М., Машиностроение, 1968. – 543 с.
4. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. – М.: Машиностроение, 1981. – 191 с.
5. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1977. – 407 с.
6. Бреки А. Д., Яхимович В. А., Чулкин С. Г., Москалец А. А., Шульгин И. А., Седакова Е. Б., Барабанщиков Ю. Г., Кутепов С. Н., Кузовлева О. В. Эмпирическая математическая модель изменения фактической площади контакта металлов в зависимости от пути трения // Чебышевский сборник - №5, 2022. С. 188 - 197.
7. Бурыкин В.В., Хандожко А.В., Горленко А.О. Технология изготовления и повышение стойкости вырубных пуансонов// Технологическое повышение надежности и долговечности деталей машин и инструментов. – Брянск, 1990. – С. 110-116.
8. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 127 с.
9. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. – Киев: Техника, 1982.– 181 с.
10. Галушкин А.И. Современные направления развития нейрокомпьютерных технологий в России//Открытые системы. – 1997. – № 4.– С. 25-28.

11. Гарбар И.И. О структуре и строении поверхностных слоев сопряженных материалов трущихся пар//Трение и износ. – 1990. – Т. 11. – № 4. – С. 581-593.
12. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985.–424 с.
13. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безысходность). – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
14. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций: Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
15. Горленко А.О. Обеспечение качества деталей машиностроительного производства электромеханической обработкой (ЭМО) // Сборник трудов междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и опыт обеспечения качества в производстве и образовании». - Тула, 2001. С. 219 - 222.
16. Горленко А.О. Повышение износостойкости кулачковых поверхностей трения//Повышение качества машин, технологической оснастки и инструментов: Юбилейный сб. науч. труд, посвященный 70-летию БГТУ, 1999. – С. 62-66.
17. Горленко А.О. Технологическое повышение износостойкости деталей с криволинейными поверхностями трения//Справочник. Инженерный журнал. – 2000. – № 2. – С. 7-9.
18. Горленко А.О. Электромеханические методы обработки// Машиностроение. Энциклопедия / Ред. Совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технология изготовления деталей машин Т. III-3 / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др./Под. общ. ред. А.Г. Суслова, 2000. – С.356-361.
19. Горленко А.О., Инютин В.П., Руденков Г.Г. Технологическое повышение износостойкости деталей трибосопряжений электромеханической обработкой // Сб. науч. тр. междунар. конф.-выставки. «Состояние и перспективы развития дорожного комплекса». – Брянск, 2001. – Вып. 2. – С. 90 - 91.
20. Горленко А.О., Симкин А.З. Повышение долговечности деталей дифференциала 1,5 тонного грузового автомобиля // Проблемы повышения

качества, надежности и долговечности деталей машин и инструментов. – Брянск, 1992. – С. 5-10.

21. Горленко А.О., Сухарев С.О. Новые схемно-технические решения для реализации электромеханического упрочнения деталей машин // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе, 9-15 сент., 2002 г.: В 3 т. – Донецк, 2002. – Т.1. – С. 123 - 128.

22. Горленко, А.О. Аспекты природы изнашивания / А.О. Горленко, С.В. Давыдов, В.П. Тихомиров, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2023. – № 27(1). – С. 8 – 24

23. Горленко, А.О. Импульсная электромеханическая обработка / А.О. Горленко, О.А. Горленко // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2011. – № 6 (06). – С. 21 – 25.

24. Горленко, А.О. Обработка поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Технология машиностроения и материаловедение: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – №2. – 127 с. – С. 33 – 38.

25. Горленко, А.О. Повышение износостойкости деталей машин имплантацией материалов на основе карбида вольфрама / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Молодежь и системная модернизация страны: Сб. науч. статей 2-й Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых в 4 т. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. – Т. 4. – 385 с. – С. 129 – 134.

26. Горленко, А.О. Повышение износостойкости деталей машин комбинированной электромеханической обработкой / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Вестн. БГТУ. – 2018. – № 11 (72). – С. 18 – 25.

27. Горленко, А.О. Повышение износостойкости деталей машин порошком карбида вольфрама пластическим деформированием / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ – 2020): сб. статей 12-й Междунар. науч.-техн. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. – 428 с. – С. 84 – 90.

28. Горленко, А.О. Повышение износостойкости поверхностей трения

стальных деталей машин электромеханическим упрочнением / А.О. Горленко, С.В. Давыдов, М.Ю. Шевцов, Д.А. Болдырев // Сталь. – 2019. – № 11. – С. 53 – 57.

29. Горленко, А.О. Повышение износостойкости поверхностей трения углеродистых и легированных сталей имплантацией наноразмерных, высокотвердых дисперсных частиц / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов, Д.А. Болдырев // Сталь. – 2022. – № 3. – С. 28 – 33.

30. Горленко А.О. Повышение эксплуатационных свойств деталей машин электромеханической обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 2 (116). С. 27-35.

31. Горленко А.О. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 3(153). – С. 12 – 21

32. Горленко, А.О. Повышение качества поверхностного слоя методом комбинированной электромеханической обработки / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Современные материалы, техника и технологии. – 2018. – № 5 (20). – С. 14 – 27.

33. Горленко, А.О. Совершенствование технологии получения износостойкого поверхностного слоя комбинированной электромеханической обработкой / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Молодежь и XXI век – 2018: материалы VIII Междунар. молодежной науч. конф. в 5 т. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – Т. 5. – 267 с. – С. 123 – 129.

34. Горленко, А.О. Технологическое оборудование для комбинированной электромеханической обработки / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Машиностроение: инновационные аспекты развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – СПб: СПбФ НИЦ МС, 2018. – №1. – 136 с. – С. 43 – 46.

35. Горленко, А.О. Технологическое повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения / А.О. Горленко, В.П. Матлахов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 5. – С. 20 – 26.

36. Горленко, А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электромеханической обработке / А.О. Горленко // Вестн. БГТУ. – 2011. – № 3. – С.

4 – 8.

37. Горленко, А.О. Упрочнение поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2018. – № 4(63). – С. 9 – 16.

38. Горленко, А.О. Формирование в поверхности трения деталей машин градиентных износостойких структур с помощью комбинированной электромеханической обработки / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – Т. 22. – 136 с. – № 5(80). – С. 24 – 35.

39. Горленко, А.О. Формирование износостойкого поверхностного слоя в углеродистых сталях на основе карбида вольфрама комбинированной электромеханической обработкой / А.О. Горленко, С.В. Давыдов, М.Ю. Шевцов, Д.А. Болдырев // Сталь. – 2019. – № 3. – С. 57 – 60.

40. Горленко, А.О. Формирование износостойкого поверхностного слоя с помощью, усовершенствованной комбинированной электромеханической обработки / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. трудов 6-й Междунар. науч-техн. конф. в 2 т. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – Т. 1. – 314 с. – С. 158 – 169.

41. Гольчевский В.Ф. Теоретические основы решения практических задач автотехнической экспертизы. / Власов Ф.М., Несмеянов А.А., Чепурных Н.К., Седов Д.В., Думнов С.Н. // Базовые основы теории автотехнических экспертиз Иркутск, 2014.- Т.1 Часть 1- 360с.

42. Давыдов, С.В. Износостойкая поверхность трения углеродистой стали, упрочненная порошком карбида вольфрама / С.В. Давыдов, А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // Технология машиностроения и материаловедение: материалы Междунар. науч-практ. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №1. – 153 с. – С. 71 – 80.

43. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.

44. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
45. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
46. Дифференциал: распределяем крутящий момент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://autoleek.ru/transmissija/differencialy-i-mufty/differencial-raspredelyaem-krutyashhiy-moment>.
47. Домбровский Г.Г. Электроимпульсное упрочнение чистовых инструментов /Новое в электрофизической и электрохимической обработке материалов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1972. – С. 201-202.
48. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
49. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
50. Дроздов Ю.Н., Усов С.Б. Использование комбинированных технологических методов обработки для повышения износостойкости деталей машин//Вестник машиностроения. – 1985. – № 10. – С. 9-10.
51. Земсков, А. В. Основы механики контактного взаимодействия деформируемых тел : учебное пособие / А. В. Земсков, Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков. — Москва : МАИ, 2022. — 87 с.
52. Каменских, А. А. Реализация решения задач механики контактного взаимодействия в прикладном пакете ANSYS : учебное пособие / А. А. Каменских, М. Л. Бартоломей. — Пермь : ПНИПУ, 2017. — 65 с.
53. Качество машин: Справ.: В 2 т. / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – Т.1. – 256 с.
54. Кершенбаум В.Я. Механическое формирование поверхностей трения. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
55. Комбалов, В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов : справочник / В. С. Комбалов ; под

редакцией К. В. Фролова, Е. А. Марченко. — Москва : Машиностроение, 2008. — 384 с.

56. Контактно-силовое взаимодействие деталей цилиндропоршневой группы : учебное пособие / Н. В. Бышов, С. Н. Борычев, А. А. Симдянкин [и др.]. — Рязань : РГАТУ, 2017. — 137 с.

57. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1978. — 528 с.

58. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.

59. Кузнецов, В. П. Технологии формирования и методы исследования наноструктурированного поверхностного слоя конструкционных материалов : учебное пособие / В. П. Кузнецов, А. С. Скоробогатов. — Екатеринбург : УрФУ, 2020. — 188 с.

60. Куксенова, Л. И. Методы исследования поверхностных слоев при трении : учебное пособие / Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, С. А. Герасимов. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. — 75 с.

61. Курасов, В. С. Испытания автомобилей и тракторов : учебное пособие для вузов / В. С. Курасов, В. М. Погосян, В. В. Драгуленко. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 84 с.

62. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. — М.: Машиностроение, 1971. — 264 с.

63. Макаров, Е.С. Межосевые дифференциалы и блокировки мостов / Е.С. Макаров, Е.Ф. Чубенко // Интеллектуальный потенциал вузов — на развитие дальневосточного региона России и стран АТР: материалы XIII международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 15-28 апреля 2011 г. — Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2011. — С. 50-52.

64. Машиностроение. Энциклопедия Т. III-3. Технология изготовления деталей машин. / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров, Б.М. Базров, В.И.

Аверченков, А.О. Горленко и др.; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2000. – 840 с. – С. 356- 361.

65. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-3. Надежность машин/ В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1998. – 592 с.

66. Михин А.Н. Зависимость сближения между шероховатыми поверхностями контактирующих тел от нагрузки при упругом контакте//Трение и износ. – 1990. – Т.11. – № 2. – С. 328-331.

67. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. – М.: Машиностроение, 1977. – 221 с.

68. Надежность машиностроительной продукции: Практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 328 с.

69. Основы механики контактного взаимодействия и разрушения : учебное пособие / Е. В. Матвеева, М. А. Васечкин, М. Е. Литвинов, Л. Б. Лихачёва. — Воронеж : ВГУИТ, 2023. — 51 с

70. Парриш П. и др. Обработка поверхности и надежность материалов / П. Парриш, Х. Херглотц, Дж. Хадсон и др. – М.: Мир, 1984. – 192 с.

71. Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента : учебное пособие / В. П. Табаков, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев, А. А. Верещака. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ульяновск : УлГТУ, 2023. — 227 с.

72. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.

73. Радин Ю.А., Суслов П.Г. Безысность деталей машин при трении. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. – 229 с.

74. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник/Под общ. ред. В.М. Великанова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1990. – 421 с.

75. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник/Под общ. ред. В.М. Великанова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1990. – 421 с.
76. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
77. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – Киев: Наук. думка, 1984. – 272 с.
78. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 184 с.
79. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Улашкин А.П. Комплексный параметр для оценки состояния поверхности трения//Трение и износ.– 1980. – Т. 1. – № 3. – С. 436-439.
80. Санников А.А. Надежность машин. Трибология и триботехника в оборудовании лесного комплекса: Учебное пособие/А.А. Санников, Н.В. Куцубина, А.М. Витвинин. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006. - 145 с.
81. Слободюк, А. П. Методы и технические средства испытаний сельскохозяйственной техники: практикум : учебное пособие / А. П. Слободюк. — Белгород : БелГАУ им.В.Я.Горина, 2019. — 108 с.
82. Справочник технолога / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Б.М. Базров, А.П. Бабичев, П.Ю. Бочкарев, А.О. Горленко и др.; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2019. – 800 с.– С. 391 – 398.
83. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, А.О., А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков, В.Ф. Безъязычный, А.О. Горленко и др.; под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т.2. – 944 с.– С. 553-562.
84. Сугак Е.В.: Прикладная теория надежности. Практикум. Учебное пособие для вузов— Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 312 с.
85. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

86. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
87. Суслов А.Г., Горленко А.О. Электромеханическая обработка/ Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – Т.2. – С. 553-562.
88. Суслов А.Г., Горленко А.О., Сухарев С.О. Повышение износостойкости деталей машин электромеханической обработкой // Современные материалы, технологии, оборудование и инструменты в машиностроении: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Киев: 2000. – С. 82 - 83.
89. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
90. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов, С.Г. Бишутин, И.В. Говоров, А.О. Горленко и др. // под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с – С. 25 – 54.
91. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко, А.О. Горленко, А.Н. Прокофьев, А.В. Тотай, О.Н. Федонин; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с. – С. 148 – 197.
92. Суслов, А.Г. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко, В.Б. Ильицкий, А.В. Тотай, А.В. Хандожко, А.О. Горленко и др. // под ред. А.Г. Суслова. – М.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2022. – 552 с – С. 19 – 97; 241 – 268; 338 – 349; 517 – 533.
93. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Машиностроение, 1979. – 560 с.
94. Тихомиров В.П. Имитационное моделирование контактного взаимодействия деталей машин с шероховатыми поверхностями//Трение и износ. – 1990. – Т.11. – № 4. – С. 609-614.

95. Тихомиров В.П., Измеров М.А., Кузнецов С.В., Горностаева А.Г. - Трение металл-металлических поверхностей // Научные технологии в машиностроении - 2022г. №3

96. Трение и изнашивание механизмов, смазочные материалы : учебно-методическое пособие / С. А. Поляков, Л. А. Андриенко, В. В. Лычагин, Е. М. Кулешова. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. — 52 с.

97. Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. - М.: Машиностроение, 1978. - Кн. 1 - 400 с.

98. Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под ред. И.В.Крагельского, В.В. Алисина. - М.: Машиностроение, 1979. - Кн. 2 - 358 с.

99. Федоров В.П., Кельнер А.А. Автоматизированная система определения параметров шероховатости поверхностей деталей машин// Измерительная техника. – 1987. – № 12. – С. 23-24.

100. Хворостухин Л.А. и др. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением/ Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1980. – 63 с.

101. A. O. Gorlenko, S. V. Davydov, M. Yu. Shevtsov. Surface hardening of carbon steel with tungsten carbide powder by plastic deformation / Proceedings International Conference «Problems of Applied Mechanics» // Melville, New York. – 2021. – Vol. 2340. – pp. 070001-1 – 070001-8.

102.A.O. Gorlenko, M. Yu. Shevtsov, D. A. Boldyrev. Improving Wear Resistance for Friction Surfaces of Carbon and Alloyed Steels via Implanting Nanosized Particles // Steel in Translation. – 2022. – Vol. 52. – № 3. – pp. 28 – 33.

103.A.O. Gorlenko, M.Y.Shevtsov. Developing endurance of sliding surfaces by tungsten carbide introduction // Science and world. International scientific journal. – Volgograd: Publishing House «Scientific survey», 2017. – № 8 (48) . – 139 p. – pp 39 – 42.

104.A.O. Gorlenko, M.Y.Shevtsov. Improving technology combined electromechanical processing // Journal of Advanced Research in Technical Science. –

North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2018. – Issue 9-1. – 100 p. – pp 56 – 61.

105.A.O. Gorlenko, M.Y.Shevtssov. Increase of wear-resistance friction surface by implanted materials based on tungsten carbide // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2017. – Issue 5. – 68 p. – pp 15 – 23.

106. A.O. Gorlenko, M.Y.Shevtssov. Modification of friction surfaces of parts of machines combined by electromechanical treatment // Topical areas of fundamental and applied research XVI. – North Charleston, USA: SC LCR, CreateSpace, 2018. – Vol. 2 – pp 69 – 74.

107.A.O. Gorlenko, S.V. Davidov, M. Yu. Shevtsov, D. A. Boldyrev. Creation of a Wear-Resistant Tungsten-Carbide Surface Layer on Carbon Steels by Implantation and Electromechanical Machining // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 49. – № 3. – pp. 212 – 216.

108.A.O. Gorlenko, S.V. Davidov, M. Yu. Shevtsov, D. A. Boldyrev. Wear-Resistance Increase of Friction Surfaces of Steel Machine Parts by Electro-Mechanical Hardening // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 49. – № 11. – pp. 800 – 805

109. Bowden P.P., Tabor D. Friction. An introduction to Tribology. -London. Heinemann, 1973. - 178 p.

110.Chang, W.R. An Elastic-Plastic Model for Contact of Rough Surfaces / W.R. Chang, I. Etsion, D.B. Bogy// Transaction of the ASME, ser.F. -1988. -№1. - pp.49-57.

111.Hisacado, T. On the Mechanism of Contact between Solid Surfaces (4th report)./ T. Hisacado, Bull. JSME, 1970, vol. 13, N 55, p. 129-139.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Патент на изобретение



Акт проведения заводских испытаний

АО «Брянский автомобильный завод»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального
директора / Главный конструктор Геращенко В.И.
2024

АКТ № _____

от «27» _____ 2024

проведения триботехнических испытаний

Комиссия в составе:

заместителя начальника МСЦ Махлаенко С.А.,
заместителя главного конструктора Прахова В.П.,
заместителя главного технолога Широкова Н.В.,
начальника ОТК Волохова Г.Е.,

составила настоящий акт о том, что в период с 14.05.2024 по 24.05.2024 на АО «БАЗ» проводились испытания редукторов переднего моста 6306-2300010-01 специального колесного шасси, согласно инструкции ИИЗ7.184.03.249-2013.

Первый вариант редуктора был изготовлен по стандартной технологии АО «БАЗ».

Во втором варианте редуктора была изменена технология изготовления осей сателлитов. Оси сателлитов были изготовлены из стали 45Х с изменением конфигурации заводской детали на две разъемные оси сателлитов. Была осуществлена дополнительная упрочняющая комбинированная электромеханическая обработка поверхностей трения осей сателлитов. Эта обработка заключается в создании модифицированного поверхностного слоя, имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением (далее – ИКЭМО).

Сравнительные испытания износостойкости проводились на стенде для испытаний переднего моста специального колесного шасси, созданном на АО «БАЗ». По результатам испытаний, интенсивность изнашивания пары трения

«сателлит – ось сателлита» по заводской технологии составила $J_{h1} = 8,46 \cdot 10^{-10}$, а изготовленной с применением технологии ИКЭМО $J_{h2} = 4,08 \cdot 10^{-10}$.

Результаты испытаний показывают, что при реализации технологии ИКЭМО интенсивность изнашивания пары трения «сателлит – ось сателлита» уменьшается в 2,07 раза по сравнению с заводским вариантом.

На основании вышеизложенного, комиссия считает, что триботехнические испытания редукторов переднего моста 6306-2300010-01, изготовленных по заводской технологии и с измененной технологией изготовления осей сателлитов, с применением технологии ИКЭМО, признаются прошедшими положительно.

Члены комиссии:

Заместитель начальника МСЦ _____ Махлаенко С.А.

Заместитель главного конструктора _____ Прахов В.П.

Заместитель главного технолога _____ Широков Н.В.

Начальник ОТК _____ Волохов Г.Е.

Дипломы и сертификаты участия в научных мероприятиях



БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ДИПЛОМ

за III место

в VI научно-практической конференции
«Новые горизонты» с международным участием,
посвященной 90-летию БГТУ

выдан

аспиранту кафедры «Автомобильный транспорт»

Шевцову Михаилу Юрьевичу

г. Брянск, 21 марта 2019 года

Ректор ФГБОУ ВО «БГТУ»



О.Н. Федонин



БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ДИПЛОМ ФИНАЛИСТА

награждается

ШЕВЦОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

за участие в программе

**«УЧАСТНИК МОЛОДЕЖНОГО
НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОГО КОНКУРСА»
(«УМНИК»)**



г. Брянск 2 ноября 2017 года

Ректор университета

Региональный представитель
Фонда содействия инновациям
по Брянской области



Федосин О.Н.

Скляшев В.М.

научно-издательский центр
"Академический"

ДИПЛОМ

За активное участие в работе
XVI Международной научно-практической конференции
"Актуальные направления фундаментальных
и прикладных исследований"
30-31 июля 2018 г. North Charleston, USA

награждаются

Горленко Александр Олегович
Шевцов Михаил Юрьевич

31 июля 2018г.

Председатель ООНР
н.-и.ц. "Академический"
к.ф.-м.н., доц. Моисеев Е.В.

