

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Брянск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Горленко Александр Олегович

Официальные оппоненты: **Албагачеев Али Юсупович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий «Лабораторией узлов трения для
экстремальных условий»
ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А.
Благонравова Российской академии наук»
«ИМАШ РАН» (г. Москва)

Яшин Александр Васильевич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Технология
машиностроения»
Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО
«Владимирский государственный
университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Донской Государственный
Технический Университет», (г. Ростов-на-
Дону)

Защита состоится «21» мая 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.277.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корп. № 4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте: <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/shevtsov-mikhail-yurevich>

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.277.01
доктор технических наук, доцент

Нагоркин Максим Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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».

Эксплуатационные показатели деталей с цилиндрическими поверхностями трения, в частности износостойкость, во многом определяются параметрами качества их поверхностных слоев (отклонения формы, волнистость, шероховатость, физико-механические свойства), которые формируются в процессе производства. Износ находится в прямой зависимости от скоростей, нагрузок, мощностей и режимов эксплуатации машин. В связи с этим, возникает необходимость в совершенствовании методов технологического воздействия на поверхностный слой.

Улучшение эксплуатационных показателей и повышение качества поверхностных слоев цилиндрических поверхностей трения сдерживается в настоящее время отсутствием научно обоснованных методик расчета на изнашивание, выбора и нормирования параметров качества сопрягаемых деталей, а также методов и режимов их упрочняющей и отделочной обработок, в частности по критерию износостойкости.

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.

Следовательно, безусловно актуальными являются исследования, направленные на решение задач по технологическому обеспечению износостойкости пары трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала, на основе выбора рациональных технологических способов обработки по критерию износостойкости. Наиболее перспективной в этом отношении является упрочняющая обработка, с помощью которой представляется возможным осуществлять управляемое технологическое воздействие, с целью обеспечения минимального по величине износа, в частности создание многослойных модифицированных поверхностных слоев, обладающих высокими физико-механическими свойствами и износостойкостью.

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. Сулиммы, 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. Проникина, 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», имплантацией 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 имплантации 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 имплантации 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 исчисления.

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.

2. Возможность технологического повышения износостойкости цилиндрических поверхностей трения, в частности пары трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала, на основе разработанной технологии комбинированной электромеханической обработки (ИКЭМО).

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 натуральных 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности решаемой проблемы, цель, задачи, научная новизна и практическая значимость исследования, положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного подхода к проблеме обеспечения износостойкости цилиндрических поверхностей трения деталей машин. Рассмотрено применение деталей с цилиндрическими поверхностями в узлах трения машин, виды трения и изнашивание цилиндрических поверхностей. Проанализированы современные технологические методы повышения износостойкости цилиндрических поверхностей трения.

Проведенный анализ обзора работ по теме диссертации позволяет сделать следующие выводы:

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. 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 и модифицирование поверхностного слоя, обеспечивающие нужный комплекс триботехнических свойств.

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

4. 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 электрохимическая и лазерная обработки.

Во второй главе приведены методики проведения теоретических и экспериментальных исследований.

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 исчисления.

Проведение теоретических исследований в настоящей работе основано на моделировании процесса контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей с учетом параметров шероховатости и физико-механических свойств.

Целью экспериментальных исследований явились проверка результатов теоретических исследований; сравнение триботехнологических возможностей современных методов упрочнения с методом комбинированной электромеханической обработки.

Экспериментальные исследования проводились как на образцах, так и для реальной пары трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала переднего моста специального колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач».

Испытания на износостойкость проводились 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.

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.

Создание модифицированных поверхностных слоев деталей машин, имплантированных и композиционно упрочненных карбидами вольфрама (технология ИКЭМО) осуществлялось на специальной установке, представляющей собой технологический комплекс, состоящий: из универсального станка (применяемого для механической обработки заготовок) с разработанными и изготовленными оригинальными инструментальной и технологической оснасткой 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 (рисунок 1).



а)

б)

Рисунок 1 – Установка для ИКЭМО:

а) общий вид; б) инструментальная оснастка

Третья глава посвящена оценке параметров контактного взаимодействия деталей с цилиндрическими поверхностями трения.

Для исследования процессов контактного взаимодействия, трения и изнашивания был предложен подход, позволяющий учитывать влияние шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Моделирование процесса контактного взаимодействия рассмотрено на примере скользящего контакта двух цилиндрических поверхностей, представляемого в виде контакта гладкой упругой втулки и вала с приведенными (эквивалентными) значениями параметров шероховатости. При этом учитываются упругие деформации сопряженных тел, а также упругопластические деформации микронеровностей (рисунок 2).

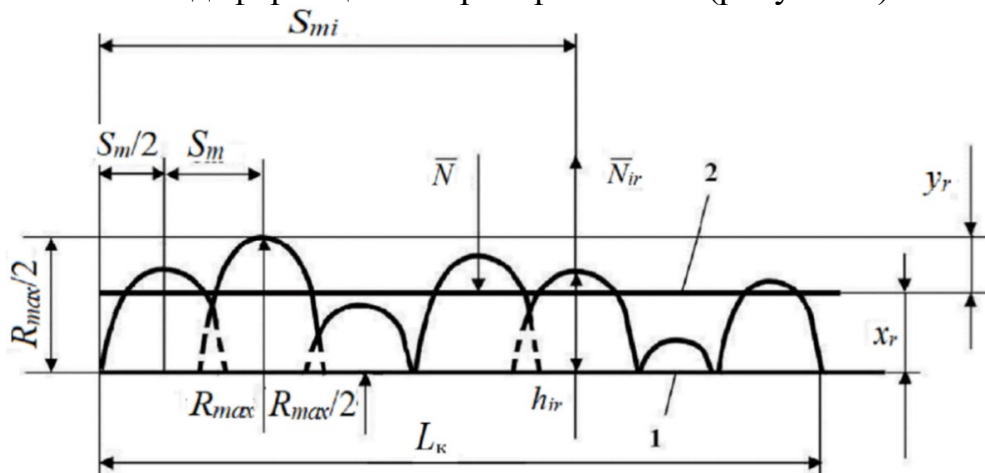


Рисунок 2 – Расчетная схема моделирования контакта цилиндрических поверхностей: 1, 2 – соответственно поверхности вала и втулки; L_k – длина площадки контакта; y_r – сближение контактирующих поверхностей; x_r – уровень сечения модели поверхности; h_{ir} – высота i -го выступа модели шероховатой поверхности;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

Модель шероховатой поверхности представляет собой набор деформируемых под нагрузкой эллиптических параболоидов 2-го порядка, вершины которых имеют определенный закон распределения. Для этой модели сечения, получаемые от пересечения профиля шероховатости плоскостью, перпендикулярной средней плоскости, будут параболоми 2-го порядка, а плоскостью, параллельной средней плоскости – эллипсами.

Закон и параметры распределения высот выступов параболоидов находятся, исходя из условия равенства относительных опорных площадей профиля реальной поверхности и модели

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

где h_{ir} – высота выступов неровностей; R_{max} – максимальная высота профиля шероховатости; λ – параметр распределения; $\eta \in [0; 1]$ – случайная величина.

Расчет параметров контактного взаимодействия сводится к определению величины сближения, при которой образовавшаяся фактическая площадь контакта способна выдержать внешнюю нагрузку.

Параметры, характеризующие контактное взаимодействие цилиндрических поверхностей трения, рассчитываются путем проведения с помощью ЭВМ статистических испытаний модели процесса контактного взаимодействия на основе реализации следующего алгоритма:

1) Ввод исходных данных для двух поверхностей, необходимых для расчета.

2) Определение фактической площади контакта на рассматриваемом участке.

Задается положение вершин параболоидов с шагом, равным среднему шагу неровностей профиля шероховатости по средней линии S_{mi} и распределение их высот h_{ir} , исходя из равенства опорных площадей профиля реальной поверхности и модели.

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

$$|(K_o \Sigma N_{ir} - N)/N| \leq \varepsilon. \quad (2)$$

где N – внешняя приложенная сила; K_o – масштабный коэффициент, определяющий размеры рассматриваемого участка контакта. ε – погрешность.

Выполнение неравенства (2) свидетельствует о том, что найдена величина сближения, при которой сформировавшаяся фактическая площадь контакта способна выдержать внешнюю приложенную нагрузку.

3) Определение фактического давления в контакте.

Фактическое давление в контакте определяется с учетом сформировавшейся фактической площади контакта

$$q_r = N/(P_r K_o), \quad (3)$$

где P_r – фактическая площадь на рассматриваемом участке контакта.

4) Расчет ожидаемой интенсивности изнашивания сопряженных цилиндрических поверхностей трения в соответствии с моделью изнашивания.

В качестве модели изнашивания цилиндрических поверхностей трения предлагается кинетическая модель, представляемая в виде

$$J_h = K_j \cdot q_r^l \cdot v_{ск}^m \cdot k^n, \quad (4)$$

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 (4) 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. Значения фактического давления в контакте определяются из расчетов на модели контактного взаимодействия (формула (3)).

Таким образом, учитывая выражение (4), 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 ИКЭМО, при реализации которой методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа установлены значения коэффициентов K_j , l , m и n в модели изнашивания (4), которая с учетом этих значений принимает вид

$$J_h = 2,10 \cdot 10^{-10} \cdot q_r^{0,15} \cdot v_{ск}^{0,08} \cdot k^{-0,42}. \quad (5)$$

При этом значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45 ($HV_{исх} = 220$), а также условия трения и изнашивания 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; $t_m = 57 \dots 62\%$; $q_r = 10 \dots 20$ МПа; $v_{ск} = 0,52 \dots 1,05$ м/с; $k = 2,2 \dots 3,5$.

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

В четвертой главе рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением износостойкости поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой.

Для реализации технологии ИКЭМО использовался управляемый источник питания с фазоимпульсным регулированием, позволяющий осуществлять электромеханическую обработку переменным током промышленной частоты. Он выполнен в виде устройства, основными функциональными узлами которого являются силовой питающий трансформатор, тиристорный контактор, программируемый микропроцессорный блок управления.

Исследования, проведенные по выбору режимов комбинированной электромеханической обработкой, обеспечивающей 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_0 , 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 $v_0 = 1,41$ м/мин; 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; $t_m = 48...66\%$; $k = 2,2...3,5$.

Процесс электромеханического упрочнения и внешний вид образца после обработки представлены на рисунке 3.



а)



б)

Рисунок 3 – Установка для ИКЭМО: а) процесс электромеханического упрочнения; б) образец после обработки

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

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований.

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, технологически сложных в получении современных износостойких покрытий.

Сталь 45 для исследований была выбрана, исходя и 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.

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

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 (сталь 20ХН2М) после цементации в 2,82 раза с образцами (сталь Р18) после *ArcPVD* (покрытие системы *Ti-Al-N*) – в 3,80 раза; с образцами (сталь Р18) после *ArcPVD* (покрытие системы *Mo-Cr-N*) – в 3,77 раза; с образцами (сталь Р18) после детонационного напыления (покрытие системы $Al_2O_3-Cr_2O_3$) – в 2,67 раза; с образцами (сталь Р18) после финишного плазменного напыления (покрытие системы *Si-O-C-N*) – в 2,63 раза.

На рисунке 4 в качестве примера 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.

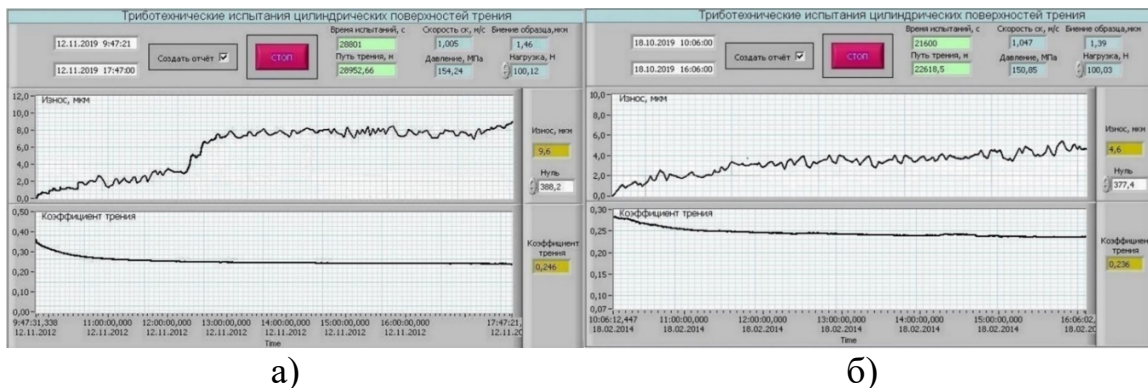


Рисунок 4 – Результаты испытаний образцов:

а) после *ArcPVD* (покрытие системы *Mo-Cr-N*); б) после 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 :

$$J_h = 40,49 \cdot 10^{-10} \cdot j^{-0,42} \cdot v_0^{0,11} \cdot p^{-0,09}, \quad (6)$$

$$R_a = 114,44 \cdot j^{-0,57} \cdot v_0^{-0,69} \cdot p^{-0,05}, \quad (7)$$

$$k = 0,09 \cdot j^{0,53} \cdot v_0^{-0,12} \cdot p^{0,11}. \quad (8)$$

При этом значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45 ($HV_{исх} = 220$), варьировались в следующих пределах: $R_a = 0,84...2,72$ мкм; $R_{max} = 4,29...16,22$ мкм; $S_m = 100...216$ мкм; $t_m = 48...66\%$. 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 промышленное И – 50А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8.

Комбинированная электромеханическая обработка включает в себя два этапа.

На первом этапе происходит имплантирование порошка карбида вольфрама из специальной графитной обмазки, наносимой на поверхность

детали, в процессе обкатывания роликом, изготовленным из стали 95X18, 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 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, микротвердость $HV = 741...812$ (рисунок 5, слой 1), первого нижнего подслоя толщиной 200...250 мкм, микротвердость $HV = 546...633$ (рисунок 5, слой 2), второго нижнего подслоя толщиной 20...40 мкм, микротвердость $HV = 431...525$ (рисунок 5, слой 3) и матрицы, состоящей из нормализованной стали 45, микротвердость $HV = 224...232$.

Слой 1 (рисунок 5) 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. Слой 2 (рисунок 5) 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 6).

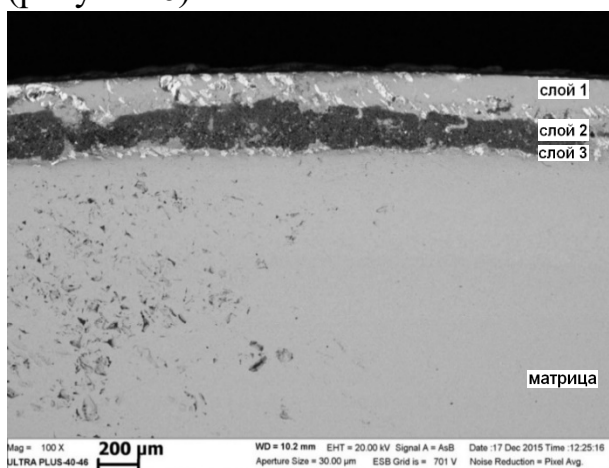


Рисунок 5 – Структура поверхностного слоя, упрочненного карбидом вольфрама, $\times 100$

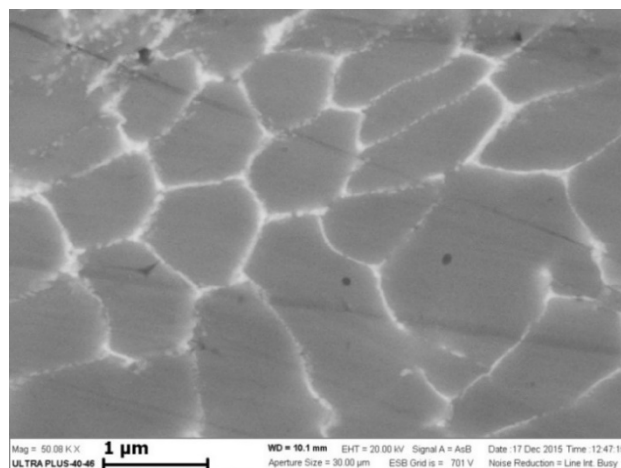


Рисунок 6 – Ячеистая структура переохлажденного аустенита в слое 2, сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен, $\times 50800$

При этом 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), который намного тоньше слоя 1, но также насыщен частицами карбида вольфрама.

В главе 6 приведены рекомендации по использованию результатов исследований и расчет экономической эффективности.

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

Результаты исследований были применены к паре трения «сателлит – ось сателлита» дифференциала переднего моста специального колесного шасси грузового автомобиля типа «Тягач» (рисунок 7).

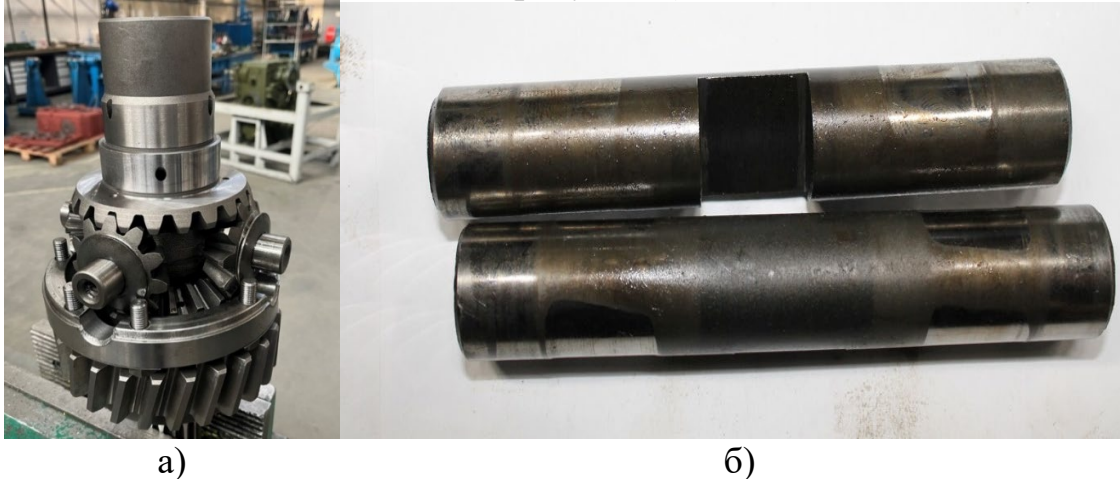


Рисунок 7 – Пара трения «сателлит – ось сателлита» в узле трения:
а) дифференциал переднего моста; б) оси сателлитов

По заводской технологии сателлит изготавливается из стали 35ХМНЛ с $HV = 580$ (после цементации), ось сателлита изготавливается из стали 18ХГТ (после цементации) с $HV = 450$ и имеет крестообразную форму.

Сталь 18ХГТ, в связи с недостаточной ее износостойкостью, была заменена сталью 45 с изменением конфигурации заводской детали на разъемные 2 оси сателлита, и изготовлены опытные образцы осей сателлитов. После чего проводилось модифицирование поверхностного слоя (технология ИКЭМО).

Сравнительные испытания износостойкости пары трения «сателлит – ось сателлита» (заводская технология и ИКЭМО), проводились на стенде для испытаний переднего моста, созданном на АО «Брянский автомобильный завод». 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. Имеется акт проведения заводских испытаний. Оценка относительного увеличения ресурса пары трения «сателлит – ось сателлита» показала, что при обработке по заводской технологии относительный ресурс сопряжения примерно в 2 раза меньше, чем при реализации технологии ИКЭМО.

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.

Расчет экономического эффекта проводился методом функционально-стоимостного анализа, расчетный период составил 5 лет. При годовой программе производства дифференциала в сборе 300 шт. и себестоимости изготовления дифференциала в сборе 132660,81 руб. (в ценах 2024 г.), ожидаемый экономический эффект от результатов исследований за расчетный период (5 лет), составил более 65 млн руб.

В заключении приведены основные результаты проведенного диссертационного исследования.

В рекомендациях и перспективах дальнейшей разработки темы изложены пункты, касающиеся: усовершенствования моделей контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения, технологии комбинированной электромеханической обработки; расширения области применения и перспектив внедрения полученных результатов при реализации технологии ИКЭМО.

В приложениях приведены патент на изобретение, акт проведения заводских испытаний, дипломы и сертификаты участия в научных мероприятиях.

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 имплантацией 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 имплантацией 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. Разработаны технологические рекомендации. Установлено, что 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, более, чем в 2 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Горленко, А.О. Контактное взаимодействие и изнашивание стальных деталей с цилиндрическими поверхностями трения / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов, Д.А. Болдырев // *Сталь*. – 2024. – № 10. – С. 34 – 41.
2. Горленко, А.О. Оценка параметров контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения / А.О. Горленко, Е.В. Агеев, М.Ю. Шевцов // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2024. – № 28(3). – С. 10 – 24.
3. Горленко, А.О. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2024. – № 3(153). – С. 12 – 21.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Горленко, А.О. Повышение износостойкости деталей машин комбинированной электромеханической обработкой / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // *Вестн. БГТУ*. – 2018. – № 11 (72). – С. 18 – 25.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

Патенты:

1. Патент (RU 2704345 С1) № 2704345 от 28.10.2019 «Способ внедрения в поверхностный слой углеродистых конструкционных сталей карбидов и оксидов тугоплавких металлов комбинированным пластическим деформированием»

Публикации в других изданиях:

1. Горленко, А.О. Технология повышения износостойкости цилиндрических поверхностей трения имплантацией материалов на основе карбида вольфрама / А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов // *Время научного прогресса: сб. науч. трудов 14-й Междунар. науч-техн. конф.* – Волгоград: Издательство Научное обозрение 2023. – 64 с. – С. 7 – 24.
2. Горленко, А.О. Упрочнение поверхности углеродистой стали порошком карбида вольфрама пластическим деформированием / А.О. Горленко, С.В. Давыдов, М.Ю. Шевцов //

Проблемы прикладной механики: материалы Междунар. конф. – Брянск: БГТУ, 2021. – 214 с. – С. 201 – 209.

3. 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.

4. 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.

5. A.O. Gorlenko, M.Y. Shevtsov. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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. – 101 p. – pp 56 – 61.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. A.O. Gorlenko, M.Y. Shevtsov. 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.

14. 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.

Подписано в печать 12.03.2025. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл.печ. л. 1. Тираж 120 экз. Заказ № 1. Бесплатно

АО «Брянский автомобильный завод»

241050, г. Брянск, ул. Сталелитейная, д.1

Копирально-множительная лаборатория.