

На правах рукописи

Волохов Станислав Григорьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
СОПРЯЖЕНИЙ «СТАЛЬ – СТАЛЬ» ПРИМЕНИТЕЛЬНО К
ФРИКЦИОННЫМ ГАСИТЕЛЯМ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ВЛИЯНИЯ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

05.02.04 – Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск – 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» на кафедре «Трубопроводные транспортные системы», г. Брянск.

Научный руководитель: **Тихомиров Виктор Петрович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Буйносов Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электрическая тяга»
ФГБОУ ВО «Уральский государственный
университет путей сообщения»

Погонышев Владимир Анатольевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Автоматика, физика и
математика» ФГБОУ ВО «Брянский
государственный аграрный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
университет путей сообщения», г. Ростов-на-
Дону

Защита диссертации состоится 01 декабря 2020 года в 16-00 на заседании диссертационного совета Д999.112.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

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

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

В.А. Хандожко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Улучшение показателей трения и изнашивания трибосопряжений может быть реализовано модификацией их структурного состояния, в том числе за счет технологических воздействий различными видами энергий. Поэтому поиск способов управления силой трения взаимодействующих тел путем стороннего энергетического воздействия актуален. Мало изученными являются вопросы, связанные с влиянием магнитного поля на триботехнические показатели пар трения. Одним из направлений триботехнологии является изменение свойств поверхностного слоя при воздействии магнитным полем.

В технике вообще и в подвижном составе в частности, большое распространение получили гасители колебаний на основе сухого трения – фрикционные. Такие гасители колебаний используются в рессорном подвешивании локомотивов и вагонов в силу наличия позитивных качеств, таких как сравнительная простота конструкции, компактность, нетребовательность к сезонному обслуживанию и т.п., что обеспечивает малые затраты на их изготовление и эксплуатацию. Для работы фрикционных гасителей колебаний обычно характерны повышенный износ деталей, ударные нагрузки, возможные заклинивания и значительная нестабильность коэффициента трения, что является причинами снижения общей надежности, в частности шпинтонного узла.

Принципиально новым направлением в совершенствовании динамических показателей работы фрикционных гасителей колебаний является управление силой их сопротивления в зависимости от характеристик колебательных процессов надрессорного строения. Такая возможность возникает при введении в конструктивное решение фрикционных гасителей колебаний магнитного поля с воздействием на зону трения и обратной связью по его величине.

Таким образом, поиск и подтверждение технических решений, направленных на совершенствование работы шпинтонного узла фрикционных гасителей колебаний при его эксплуатации являются весьма актуальными.

В этой связи **целью настоящей работы** является исследование триботехнических показателей пар трения «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний на основе установления закономерностей влияния магнитного поля на процессы их трения и изнашивания.

В соответствии с целью необходимо решить следующие взаимосвязанные **задачи**: – разработка, изготовление оригинальных методик и установок для экспериментальных исследований влияния магнитного поля на триботехнические показатели в условиях подвижного и неподвижного контактов;

– исследование влияния магнитного поля на величину молекулярной составляющей коэффициента трения стальных поверхностей;

– разработка физически обоснованной модели намагниченности элементов пар трения;

– исследование влияния направленности магнитного потока, параллельно оси исследуемого образца (вертикальный магнитный поток) и перпендикулярно к

оси исследуемого образца (горизонтальный магнитный поток), на величину силы и коэффициента трения;

– исследование влияния параметров магнитного поля на процессы трения в условиях подвижного контакта и неподвижного соединения применительно к фрикционным гасителям колебаний;

– оценка влияния магнитного поля на температуру поверхности трения скользящего контакта;

– оценка влияния магнитного поля на процессы изнашивания пар трения скольжения и соединений с натягом применительно к фрикционным гасителям колебаний;

– расчет экономической эффективности от применения результатов исследований.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются пары трения «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний рессорного подвешивания транспортных средств.

Предметом исследования являются оригинальные методики и исследование триботехнических показателей пар трения скольжения и соединений с натягом применительно к фрикционным гасителям колебаний на основе влияния магнитного поля на процессы их трения и изнашивания.

Методы и достоверность исследований. Методологической основой работы является системный подход к изучению поведения фрикционного контакта при наличии воздействия магнитного поля. Методы исследования, теоретические и экспериментальные, базируются на современных представлениях о контактном взаимодействии твердых тел с учетом шероховатости, молекулярно-механической теории трения, современных достижениях поверхностных явлений. Применялась современная система моделирования магнитного поля в конечноэлементном пакете *ANSYS*. Экспериментальные исследования проводилась с использованием и обработкой данных на ПЭВМ. Достоверность полученных результатов достигается: использованием общепризнанных программных комплексов; использованием поверенных измерительных приборов; сопоставлением расчетных и экспериментальных результатов; сравнением результатов исследования с данными, опубликованными другими авторами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработан на основе эксперимента подход к оценке влияния магнитного поля на триботехнические показатели, отличающийся тем, что рассматривается не непосредственное влияние магнитного поля на триботехнические свойства трущихся тел, а на интенсификацию процессов, протекающих в зоне трения (рост оксидных пленок, активных центров, устранение частиц износа из зоны трения), которые способствуют повышению коэффициента трения стальных поверхностей и их износостойкости;

– установлено на основе модели намагничивания различие влияния горизонтального и вертикального магнитных полей на величину силы и коэффициента трения неподвижного контакта.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– разработана верифицированная модель намагниченности, используемая для проектирования опытных образцов и предполагаемых к созданию для их испытаний установок;

– изготовленные автором оригинальные трибометрические установки позволяют получить количественные оценки коэффициента и силы трения при проведении испытаний на трение и изнашивание на образцах, и используются в учебном процессе;

– разработаны методики проведения экспериментов на изготовленных установках с подтверждением метрологических параметров;

– получены результаты влияния магнитного поля на молекулярную составляющую коэффициента трения в условиях скользящего контакта;

– получены результаты влияния магнитного поля на коэффициент и силу трения скользящего контакта, а также на срыв посадки с гарантированным натягом;

– получены результаты влияния магнитного поля на температуру поверхности трения и интенсивность изнашивания в условиях скользящего контакта;

– получены патенты на полезную модель для применяемых в исследованиях экспериментальных установок.

Положения, выносимые на защиту, включают:

– теоретические основы намагничивания металлических пар трения и их применение в инженерных задачах;

– оценку влияния магнитного поля на молекулярную составляющую коэффициента трения;

– оценку влияния магнитного поля на триботехнические показатели скользящего контакта;

– оценку влияния магнитного поля на срыв посадки с гарантированным натягом;

– оценку влияния магнитного поля на температуру в зоне скользящего контакта;

– оценку влияния магнитного поля на интенсивность изнашивания в условиях скользящего контакта.

Личный вклад соискателя. Автором получены лично основные положения, выносимые на защиту.

Реализация результатов. Результаты исследований и стендовые установки нашли широкое применение в учебном процессе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» при подготовке магистров по направлению 15.04.03. – «Прикладная механика».

Апробация работы. Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

- XI Международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (г. Орел, 2013 г.);
- Международной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики» (г. Тула, 2013 г.);
- XII Международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (г. Орел, 2014 г.);
- V Международной научно-практической конференции «Новые горизонты» (г. Орел, 2018 г.)

Публикации. Опубликовано 19 работ по теме диссертации 5 статей в ведущих периодических изданиях из перечня Высшей аттестационной комиссии, 5 публикаций в рецензируемых периодических изданиях, 9 патентов на полезную модель и изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, основных результатов и выводов, списка использованной литературы из 122 наименований и приложения. Работа изложена на 158 страницах основного текста, содержит 89 рисунков, 8 таблиц и 1 приложение. Общий объем работы составляет 175 страниц.

Соответствие паспорту специальности:

- п. 1 «Механические, тепловые, химические, магнитные, электрические явления при трении»;
- п. 3 «Закономерности различных видов изнашивания и поверхностного разрушения»;
- п. 10 «Физическое и математическое моделирование трения и изнашивания».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, цель и задачи исследования, указаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнен анализ состояния вопроса и степени разработанности проблемы.

Настоящее исследование является логическим продолжением работ по вопросам влияния внешних факторов на триботехнические характеристики стальных поверхностей и скользящего контакта И.В. Крагельского, Н.М. Михина, И. Г. Горячевой, М.Н. Добычина, Ю.Н. Дроздова, С.М. Захарова, Э.В. Рыжова, А.В. Чичинадзе, Ю.М. Лужнова, И.П. Н.Б. Демкина, А.И. Свириденка, А.Г. Сулова, Ф. Боудена, Д. Тейбора, Д.Калкера, Дж. Гринвуда, Дж. Вильямсона и др. Ценные результаты по влиянию магнитного поля на подвижные контакты и их трибологические характеристики были получены Р. Хольмом, А.В. Чичинадзе, А.А. Клыпиным, Н.К. Мышкиным, А.С. Ахматовым, Б.В. Дерягиным, Б.И. Костецким, И.В. Крагельским, С.Н. Постниковым, Д.Н. Гаркуновым *S. Hayashi, S. Takahashi, M. Yamamoto* и др. Эти результаты также означают, что возможен контроль триботехнического поведения трибосопряжений с магнитными полями.

Поэтому исследование влияния магнитного поля имеет применение для повышения износостойкости трибосопряжений.

Рассмотрено конструкторско-технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств, а также особенности функционирования фрикционных гасителей колебаний. Опыт эксплуатации фрикционных гасителей колебаний показывает, что они не обеспечивают стабильной силы сопротивления. В результате естественного износа трущихся поверхностей гасителя сила трения может отклоняться от номинального значения на 40 – 50 %.

На сегодняшний день существует множество способов упрочнения поверхностного слоя элементов трибосопряжений с целью повышения их физико-механических и эксплуатационных свойств. Но при наличии источников электропитания на борту машины, эти объекты с незначительной доработкой могут быть превращены в демпфирующие элементы с управляемым трением, что является существенным шагом на пути создания электромеханических (мехатронных) систем.

Основываясь на данном анализе были сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй** главе описаны методики проведения теоретических и экспериментальных исследований, экспериментальные установки, используемые в исследованиях. Изучены пары трения шпинтонного узла фрикционного гасителя колебаний, и основываясь на этих данных, выбраны материалы, образцы и детали.

Для исследования молекулярной составляющей силы трения была спроектирована и изготовлена установка на базе сверлильного станка, основным элементом которой является одношариковый трибометр (рисунок 1). Он содержит обмотку 4 создающую МДС. Полированный шар 1 установлен в алюминиевый корпус 2. Верхняя и нижняя дисковые обоймы 3 накрывают корпус, образуя паз для обмотки электромагнита. Шар зажимается между нижним и верхним образцами 5, в процессе работы зазор между обоймой и образцами составляет 1,5...2 мм.

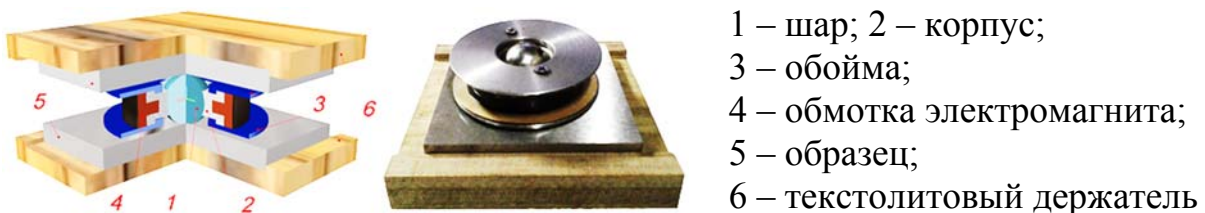


Рисунок – 1. Инденторное устройство одношарикового трибометра

Шар изготовлен из закаленной стали ШХ 15. Плоские образцы прямоугольного сечения обоймы изготовлены стали 45 (твердость 45 HRC, параметр шероховатости $Ra = 0,8$ мкм). Верхний и нижний образцы размещаются в текстолитовых держателях 6, которые обеспечивают магнитную изоляцию. Эксперименты проводились при разных нагрузках на шар $N = (13, 23 \text{ и } 33)$ Н. Сила прижатия образца при намагничивании магнитным полем определяется с помощью динамометра, присоединенного к верхнему образцу.

Для оценки влияния магнитного поля на триботехнические показатели пар трения скольжения, была разработана и изготовлена установка. Схема – пара

трения «палец – диск». За основу была принята конструкция сверлильного станка. Нагрузка и вращение передается через вал станка. Электропитание двигателя осуществляется посредством частотного преобразователя для плавного регулирования частоты вращения диска трения, зажатого в патрон сверлильного станка. На станине сверлильного станка имеется нижний опорный диск, установленный на два подшипниковых узла и имеющий возможность вращения вокруг своей оси. Конструкция нижнего опорного диска позволяет производить установку образцов различного диаметра и формы сечения. Для измерения силы трения на нижний диск через изоляционную прокладку укреплен тензобалка. Устройство снятия показаний подключено к компьютеру. Установка имеет вариативность установки и подключения катушек.

Для оценки характеристик неподвижного соединения при срыве посадки в условиях влияния магнитного поля была разработана и изготовлена установка. Нагрузочным устройством является пресс с ручным приводом и малым контролируемым увеличением давления. В качестве объекта исследования используется образец прессовой посадки (соединение с натягом стержня, изготовленного из стали 40, и втулки, изготовленной из стали 09Г2С).

Образец устанавливается в углубление в нижней части оправки, где втулка упирается в саму оправку, а стержень может беспрепятственно проходить в отверстие при срыве посадки. Нагрузка прессом прикладывается вертикально по оси образца до срыва через регистрирующее устройство – мездозу, а также через центрирующее устройство. Момент срыва посадки и величина нагрузки фиксируются измерительной системой, подключенной к компьютеру. Установка имеет вариативность установки и подключения катушек.

Вариант испытаний с параллельным оси образца (вертикальным) направлением силовых линий магнитного поля. Линии напряженности магнитного поля проходят параллельно оси прессовой посадки. При этом магнитопровод всей установки замкнут на металлический образец двумя железными пластинами по бокам оправки.

Вариант испытаний с перпендикулярным оси образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля.

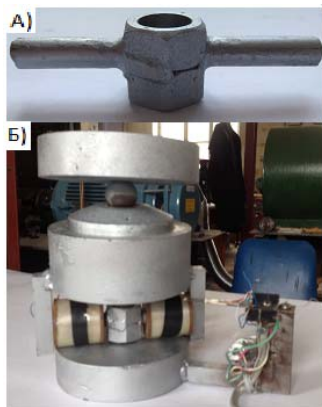


Рисунок – 2. Установка с двумя катушками Б и оправкой А для них

Использовалась оправка (магнитопровод) для установки образца с возможностью закрепления на ней двух катушек индуктивности, (рисунок 2). Это позволило организовать магнитное поле перпендикулярно прессовой посадке (линии контакта стержня с втулкой). При этом были реализованы схемы соединения катушек параллельно и последовательно.

В третьей главе приведены исследование процессов трения металлических тел при решении контактных задач, модель намагничивания в условиях контактного взаимодействия, расчетные характеристики магнитного поля в условиях скользящего контакта и неподвижного соединения.

В процессе контактного взаимодействия при уменьшении значений высотных параметров шероховатости взаимодействующих поверхностей, сила трения возрастает. Согласно двойственной природе трения она состоит из механической составляющей, не зависящей от площади контакта, и молекулярной, зависящей от площади контакта.

$$F_f = F_{\text{мех}} + F_{\text{мол}} = f F_n + \tau A_r,$$

где f – коэффициент трения материалов; τ – удельное сопротивление сдвигу фрикционных связей; A_r – фактическая площадь контакта.

Исследование методом конечных элементов с использованием программного продукта для расчета электромагнитных полей *ANSYS*, что было использовано для проектирования опытных образцов и предполагаемых к созданию для их испытаний установок, позволило получить распределение магнитного поля в инденторном устройстве одношарикового трибометра установки для измерения молекулярной составляющей коэффициента трения (рисунок 3). На рисунке 4 приведены зависимости параметров магнитного поля в зоне контакта инденторного устройства и образца от величины тока, проходящего в обмотке.

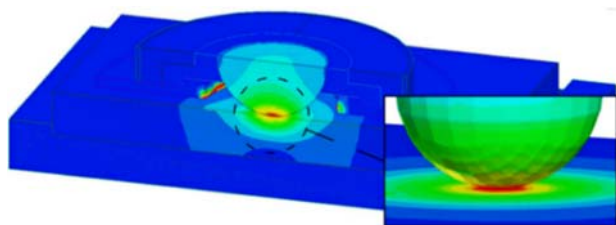


Рисунок – 3. Концентрация магнитного поля в одношариковом трибометре

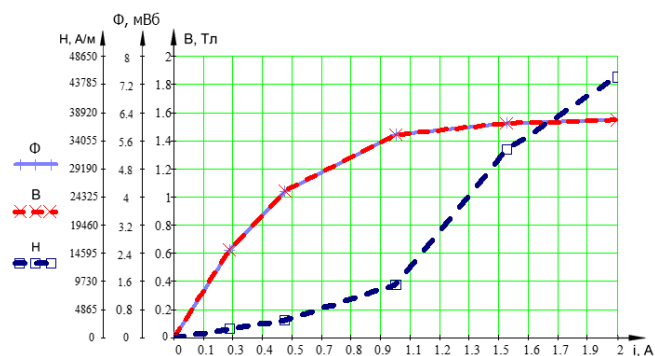


Рисунок – 4. Зависимость параметров магнитного поля от силы тока

При расчете характеристик магнитного поля установки для установки трения скольжения строится геометрия расчетной магнитной цепи (рисунок 5), задаются основные кривые намагничивания стали и магнитные проницаемости, осуществляется построение сетки конечных элементов, проводится намагничивание с постепенным возрастанием силы тока в катушках, определяется градиент распределения магнитного поля в цепи, проводится построение графиков зависимостей магнитной индукции и напряженности магнитного поля от силы тока в катушках. Изменение концентрации магнитного поля в элементах рассчитываемой установки представлено на рисунке 6.

Параметры магнитного поля в элементах рассчитываемой установки представлены на рисунках 7, 8, где обозначены следующие элементы магнитной цепи: В,Н(к)1 – стержень $\varnothing 12\text{мм}$; В,Н(к)2 – верхняя пластина; В,Н(к)3 – стержень $\varnothing 20\text{мм}$; В,Н(к)4 – нижняя пластина.

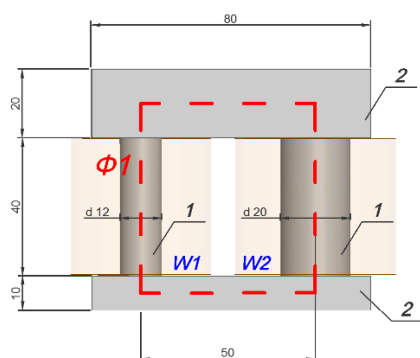


Рисунок – 5. Расчетная магнитная цепь

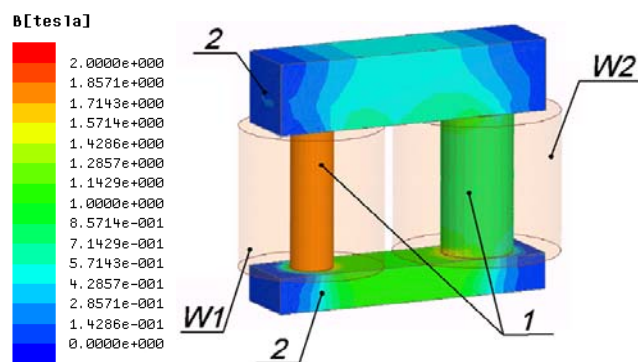


Рисунок – 6. Концентрация магнитного поля

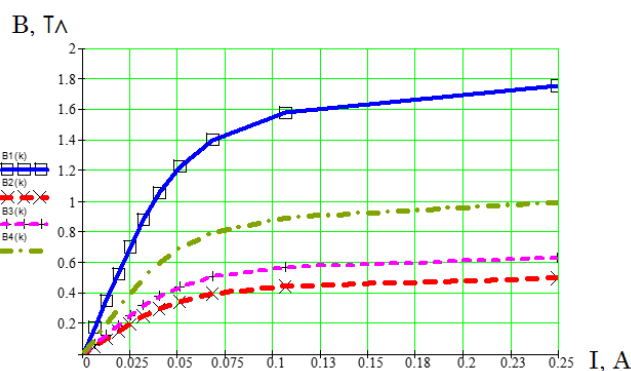


Рисунок – 7. Зависимость магнитной индукции от силы тока $B(k)$

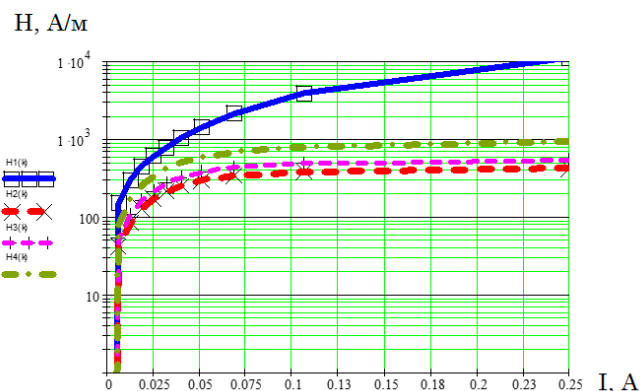


Рисунок – 8. Зависимость напряженности магнитного поля от силы тока $H(k)$

Исследование методом конечных элементов с использованием программного продукта для расчета электромагнитных полей *ANSYS* позволило получить также распределение магнитного поля установки для исследования силы срыва посадки с натягом.

Было исследовано влияние магнитного поля на молекулярную составляющую силы трения. После проведения цикла опытов при разных нагрузках без магнитного поля были повторены опыты при тех же нагрузках, но при воздействии магнитного поля с разной напряженностью. Целью этих испытаний являлось установление влияния магнитного поля на величину молекулярной составляющей силы трения стальных поверхностей. Молекулярная составляющая силы трения в рассматриваемом диапазоне, как показали экспериментальные исследования, не зависит от контактных давлений.

Приложение магнитного поля приводит к росту силы трения по сравнению с силой трения без магнитного поля. Эксперименты показали нелинейную зависимость силы трения от силы тока, причем в пределах изменения силы тока наблюдается максимум силы трения, соответствующий диапазону 3...4 А.

Было исследовано влияние магнитного поля на триботехнические показатели пар трения скольжения применительно к фрикционным гасителям колебаний. На рисунке 9 приведены осциллограммы реализации процесса трения при разных контактных нагрузках на палец 160, 190, 250 кПа, и соответствующие им расчетные величины силы и коэффициента трения.

стабилизирующего фактора для силы и коэффициента трения и возможность его использования в технических решениях в исследованном диапазоне.

Для исследования влияния магнитного поля на срыв посадки с гарантированным натягом была изготовлена партия образцов. В качестве объекта исследования *неподвижного соединения* использовалось соединение с натягом стержня и втулки.

На рисунке 11 приведены графики срыва посадки без магнитного поля и с подводом магнитного поля различными способами.

Показано, что при воздействии магнитного поля *с параллельным оси образца (вертикальным) направлением силовых линий магнитного поля* при одной катушке происходит увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля на 13,7%, а коэффициента трения на 13,3%. При воздействии магнитного поля *с перпендикулярным оси образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля* при параллельном подключении двух катушек происходит увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля на 21,6%, а коэффициента трения на 21%. При воздействии магнитного поля *с перпендикулярным оси образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля* при последовательном подключении двух катушек происходит увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля на 27,5%, а коэффициента трения на 28,9%.

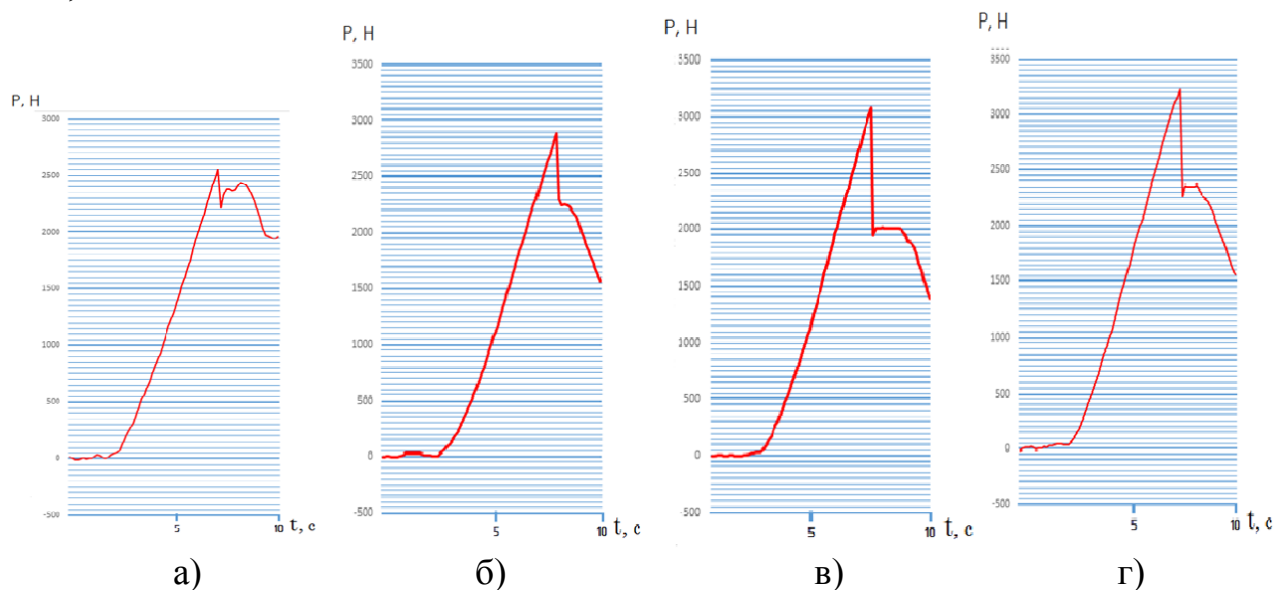
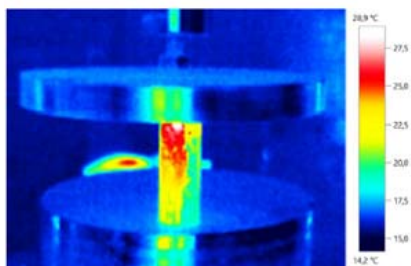


Рисунок – 11. Срыв посадки вариационного ряда образцов

В четвертой главе приведены результаты оценки температурного режима в условиях трения скольжения, влияния магнитного поля на процессы изнашивания.

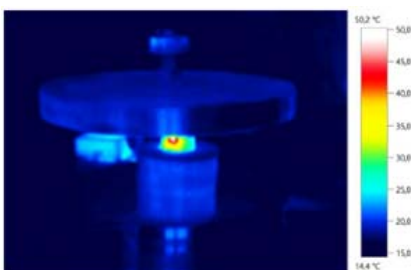
Измерение температурного режима в зоне фрикционного контакта определялось с помощью тепловизора *Testo 875* и рассчитывалось в соответствии с моделью Эшби. Повышение температуры было измерено в условиях постоянной скорости скольжения и нагрузке (рисунок 12).



Без магнитного поля ($T_{max} = 28,9^{\circ}\text{C}$)



Изменения во времени силы трения



При магнитном поле ($T_{max} = 50,2^{\circ}\text{C}$)



Изменения во времени силы трения

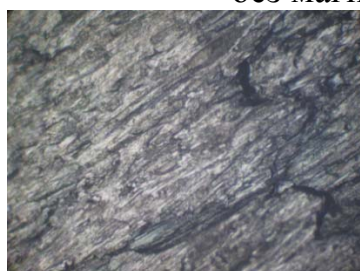
Рисунок – 12. Измерение температуры при постоянной скорости и нагрузке

Магнитное поле оказывает влияние на процессы, связанные с его взаимодействием с заряженными частицами, интенсифицируя процесс повышенного образования активных центров на поверхности трения, что приводит к росту сопротивления относительно движению.

После проведения ряда экспериментов с целью визуального выявления тенденции влияния магнитного поля на зону сопряжения исследуемых образцов в условиях трения скольжения, было проведено их фотографирование на электронном микроскопе «ММР-2», с большим увеличением (рисунки 13, 14).



Рисунок – 13. Микрофотографии стальной поверхности трения после приработки без магнитного поля по схеме «палец – диск» (x125)



x125



x 250

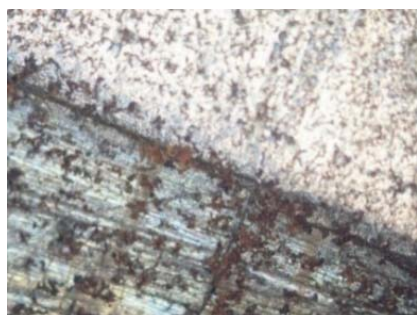


x 500

Рисунок – 14. Микрофотографии приработанной поверхности при воздействии на пару трения скольжения магнитного поля (при разном увеличении)

Несколько образцов после проведения ряда экспериментов по срыву посадки с натягом, подверглось разрезу по плоскости сопряжения «стержень – втулка». В зоне сопряжения «стержень – втулка» без воздействия магнитного поля ярко выражена граница их раздела (рисунок 15). В зоне сопряжения «стержень – втулка» при воздействии магнитного поля наблюдается локальное отсутствие выраженной границы раздела.

На пятнах контакта магнитное поле увеличивает рост числа активных центров за счет выхода дислокаций на поверхность контакта. Увеличение площади физического контакта, приводит к упрочнению фрикционных связей и росту коэффициента трения.



Без магнитного поля (x100)



С магнитным полем (x200)

Рисунок – 15. Шлифы контактной области соединения с натягом

Было исследовано влияние магнитного поля на изнашивание подвижных сопряжений. Результаты испытаний на изнашивание пальца (схема «палец – диск») представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Износ (весовой) и интенсивность изнашивания I_m как отношение весового износа к пути трения образцов.

	Вес	Износ весовой	Время испытания	Интенсивность изнашивания
Без воздействия магнитного поля	128,75 г. 127,95 г.	0,8 г.	60 мин.	$I_m = 2,65 \cdot 10^{-4}$ г/м
При воздействии магнитного поля	128,51 г. 128,06 г.	0,45 г.	60 мин	$I_m = 1,77 \cdot 10^{-4}$ г/м

Влияние магнитного поля приводит к тому, что частицы износа выносятся из зоны трения, тем самым снижая интенсивность изнашивания за счет исключения режущего и пропахивающего действия частиц износа, которые могут находиться в зоне трения. Также, как показало профилографирование исходной шероховатости после воздействия магнитного поля в условиях трения скольжения, при воздействии магнитного поля радиусы закругления вершин выступов увеличиваются, что приводит к снижению интенсивности изнашивания.

В пятой главе приведены расчет экономической эффективности от применения результатов исследований, а также использование результатов работы в научных исследованиях и в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены новые научно обоснованные технические решения, заключающиеся в разработанном подходе к оценке влияния магнитного поля на триботехнические показатели пар трения, установлении на основе модели намагничивания различия влияния горизонтального и вертикального магнитных полей на величину силы и коэффициента трения неподвижного контакта, имеющие существенное значение для развития технических систем, заключающееся в повышении триботехнических показателей фрикционных гасителей колебаний подвижного состава транспортных средств.

1. Разработаны методики и оригинальные установки для экспериментальных исследований оценки влияния магнитного поля на величину коэффициента трения. Проведен расчет намагниченности элементов пар трения для спроектированных установок. Было выявлено, что намагничивание зоны трения опытных образцов находится в стабилизированном магнитном потоке.

2. Установлено, что влияние магнитного поля на молекулярную составляющую коэффициента трения (в рассматриваемом диапазоне его значений) не зависит от давления. Выявлено, что магнитное поле при его возбуждении током катушки в диапазоне от 1,5 до 6,0 А изменяется, с максимумом при величине тока от 3 до 4 А и влияет на процессы трения. Показана зависимость момента трения от силы тока имеет экстремум, который наблюдается при разных нагрузках (13, 23 и 33 Н).

3. Выявлена особенность влияния магнитного поля на трение скольжения при варьировании нагрузкой на образцы и силой тока в катушках с разными схемами их подключения. Получены осциллограммы сравнения коэффициентов трения пары «сталь – сталь» в диапазоне давлений от 0,16 до 0,25 МПа и силы тока от 0 до 8 А.

Установлено, что увеличение давления на образец и силы тока в магнитной катушке при скользящем контакте приводит к стабилизации и достижению максимума коэффициента трения в диапазоне режимов проведенных испытаний. Можно обоснованно предположить, что указанные параметры ведут к повышенной диссипации энергии при трении.

4. Установлено влияние магнитного поля на величину силы срыва прессовой посадки с гарантированным натягом. Для проведенной вариативности установки катушек и соответствия направлений воздействия магнитного поля по оси образца присутствует устойчивая тенденция увеличения силы срыва посадки с натягом и соответствующего коэффициента трения.

5. Увеличение давления и тока в магнитной катушке ведет к стабилизации и достижению максимума коэффициента трения. Можно обоснованно предположить, что указанные параметры ведут к повышенной диссипации энергии при трении.

6. Влияние магнитного поля приводит к росту коэффициента трения и, как следствие, к повышению температуры на контакте. Теоретическая оценка и экспериментальная проверка температурного режима на скользящем контакте с использованием тепловизора показали почти двойной рост температуры. При этом

экспериментально подтверждена применимость модели Эшби (*Ashby*) для расчета повышения температуры трения.

7. Экспериментально подтверждено, что продукты износа в виде оксидных частицы черного цвета под действием магнитного поля выносятся из зоны трения. Это объясняется тем, что оно оказывает влияние на процессы, связанные с взаимодействием магнитного поля с заряженными частицами, интенсифицируя в данном случае процесс повышенного образования активных центров на поверхности трения, что приводит к не только увеличению числа дислокаций и их перераспределению, но также изменению расположения и взаимодействия точечных дефектов кристаллической решетки. Интенсификация выхода дислокаций на стальную деформируемую поверхность касания, приводящая к росту количества активных центров, способствует формированию фрикционных молекулярных связей.

8. Сравнение микроструктуры поверхности после испытаний на изнашивание показывает, что после приработки при воздействии магнитного поля качество поверхности лучше по сравнению с испытаниями без магнитного поля (отсутствуют ярко выраженные следы пропахивания), что объясняется выводом из зоны трения под действием магнитного поля частиц износа.

9. Экспериментально подтверждено, что в зоне сопряжения деталей посадки с натягом без воздействия магнитного поля ярко выражена граница их раздела. При воздействии магнитного поля наблюдается локальное отсутствие выраженной границы раздела. Это объясняется тем, что на пятнах контакта магнитное поле увеличивает активные центры, их количество и насыщение со временем выхода дислокаций. Внешнее электромагнитное поле способствует росту этого числа активных центров за счет выхода дислокаций на поверхность контакта, а увеличение площади физического контакта приводит к упрочнению фрикционных отношений и росту коэффициента трения.

10. Как показали испытания на изнашивание при скользящем контакте, интенсивность изнашивания при воздействии магнитного поля меньше на 49,7%, чем при испытаниях без воздействия магнитного поля. Уменьшение интенсивности изнашивания связано с удалением частиц износа из зоны трения при воздействии внешнего магнитного поля, а также с увеличением радиусов закругления вершин выступов шероховатости при воздействии магнитного поля.

11. Расчет экономической эффективности показал, что согласно данным, приведенным в расчетах, модернизация конструкции буксового узла с реализацией воздействия магнитным полем уменьшит стоимость жизненного цикла рассматриваемой части этого узла на 19...42% за счет сокращения затрат на плановые ремонты. При этом уменьшение среднегодовых затрат применительно к десяти вагонному электропоезду ЭР2 на период продленного срока его службы составит 41...74 тыс. руб./год.

**Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях,
рекомендованных ВАК РФ**

1. Воробьев, В.И. Влияние электрического тока и магнитного поля на коэффициент сцепления колеса с рельсом / В.И. Воробьев, В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, С.Г. Волохов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 6 (302). – С. 137 – 142.
2. Космодамианский, А.С. Анализ и систематизация систем электропривода тягового подвижного состава / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, С.Г. Волохов // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2013. – № 2 (41). – С. 46 – 53.
3. Измеров, М.А. Закон распределения пятен в задачах механики дискретного контакта / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров, В.И. Воробьев, С.Г. Волохов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 6 (308). – С. 21 – 27.
4. Тихомиров В.П., Влияние магнитного поля на триботехнические показатели неподвижных соединений применительно к фрикционным гасителям колебаний / В.П. Тихомиров, А.О. Горленко, С.Г. Волохов, М.А. Измеров // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2020. – № 10 (95). – С.4 – 11.
5. Тихомиров В.П., Влияние магнитного поля на триботехнические показатели пар трения скольжения применительно к фрикционным гасителям колебаний / В.П. Тихомиров, А.О. Горленко, С.Г. Волохов, М.А. Измеров // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2020. – № 11 (96). – С.4 – 11.

Публикации в других изданиях

1. Воробьев В.И., Измеров О.В., Волохов С.Г. Планирование инженерного анализа при создании устройств, использующих магнитное поле для снижения потерь энергии в системе "колесо-рельс". Доклад на XI Международной научно-практической интернет-конференции "Энерго- и ресурсосбережение – XXI век", ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г. Орел, 2013 г. С. 243-246.
2. Измеров О.В., Авдащенко В.С., Волохов С.Г. Выявление уинформации для планирования инженерного анализа использования магнитного поля при трении металлических тел: статья. "Совершенствование энергетических машин", сб. научн. тр. /под ред. В.В. Рогалева. - Брянск: БГТУ, 2013 - с. 180-189.
3. Козловский В.Н., Авдащенко В.С., Волохов С.Г. Анализ литературных источников по влиянию магнитного поля на фрикционные свойства пар трения: статья. "Совершенствование энергетических машин", сб. научн. тр. /под ред. В.В. Рогалева. - Брянск: БГТУ, 2013 - с. 215-224.
4. Воробьев В.И., Тихомиров В.П., Корчагин В.О., Волохов С.Г. Индикаторное устройство для определения молекулярной составляющей коэффициента трения: статья. "Совершенствование транспортных машин", сб. научн. тр. /под ред. В.В. Рогалева. - Брянск: БГТУ, 2017 - с. 125-129.

5. Установка для исследования пар трения при воздействии магнитного поля Волохов С.Г. В сборнике: Повышение эффективности транспортных машин Брянск, 2017. С. 108-118.

Патенты РФ

1. Фрикционный гаситель колебаний Воробьев В.И., Новиков В.Г., Пугачев А.А., Волохов С.Г., Измеров О.В., Луков Н.М., Ромашкова О.Н., Космодамианский А.С., Попов Ю.В., Стрекалов Н.Н., Серин С.А. патент на изобретение RUS 2013125761 10.12.2014

2. Дисковый фрикционный гаситель колебаний Космодамианский А.С., Самотканов А.В., Воробьев В.И., Измеров О.В., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г., Фомина Е.В., Сеницын С.В., Сеницына Т.П., Иванова С. Н. патент на изобретение RUS 157096 20.11.2015

3. Прибор для определения молекулярной составляющей коэффициента трения Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Самотканов А.В., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г., патент на изобретение RUS 147093 04.04.2014

4. Прибор для определения коэффициента трения Воробьев В.И., Новиков В.Г., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г. патент на полезную модель RUS 151991 16.06.2014

5. Дисковый фрикционный гаситель колебаний Воробьев В.И., Измеров О.В., Дорофеев О.В., Злобин С.Н., Борзенков М.И., Пугачев А.А., Волохов С.Г. патент на изобретение RUS 153297 01.07.2014

6. Установка для определения коэффициента трения Новиков В.Г., Воробьев В.И., Фокин Ю.И., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г., Шалупин П.И., Товпеко Н.И., Авдащенко В.С., Козловский В.Н. патент на полезную модель RUS 149581 12.08.2014

7. Прибор для определения коэффициента трения Воробьев В.И., Новиков В.Г., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г., Козловский В.Н., Корчагин В.О., Авдащенко В.С. патент на полезную модель RUS 153781 01.12.2014

8. Фрикционный гаситель колебаний Волохов С.Г., Никонов В.А., Михалин Н.В., Воробьев В.И. Патент на полезную модель RU 195731 U1, 04.02.2020.

9. Фрикционный гаситель колебаний Волохов С.Г., Никонов В.А., Михалин Н.В., Воробьев В.И. Патент на полезную модель RU 194947 U1, 09.01.2020.

Подписано в печать 29.09.2020 Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Офсетная печать. Печ. л. 1Т. 100 экз. Заказ № Бесплатно.

Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д.7,
Лаборатория оперативной печати БГТУ, ул. Институтская, 16