

На правах рукописи



Афанасьева Анна Алексеевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ
МУФТ СЦЕПЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Специальность 2.6.17 Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ»), на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов»

Научный руководитель:

Ким Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор

Башков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» ФГБОУ ВО «КнАГУ»

Официальные оппоненты:

Яковлева Софья Петровна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела общего материаловедения, ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФТПС СО РАН), г. Якутск

Коневцов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт материаловедения Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск

Защита состоится «17» марта 2023 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/180.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета,
к.т.н.

Проценко Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Уровень развития технологий и современной техники создаёт потребность в разработке новых фрикционных материалов, обладающих высоким уровнем эксплуатационных свойств. Повышение мощности технологического и транспортного оборудования предъявляет высокие требования к фрикционным передачам и механизмам, работающим в экстремальных условиях. Особое место в области применения фрикционных материалов занимают стрелочные электроприводы, основной задачей которых является перевод железнодорожных стрелок в положения, соответствующие требуемому маршруту следования подвижного состава. Фрикционные муфты, работающие в составе данных устройств, обеспечивают передачу крутящего момента от электродвигателя к блоку главного вала, осуществляющего передвижение шибера в необходимое положение для перевода острияков и их запираания. Ещё одна не менее важная задача фрикционной муфты состоит в предохранении электродвигателя от перегрузки, в случае невозможности замыкания острияка, в таком случае муфта работает при тяжёлых условиях, в режиме проскальзывания, до момента выключения стрелочного электропривода и устранения причины невозможности перевода стрелки. Потребность создания новых фрикционных материалов с высокой рентабельностью основана на решении задачи по соблюдению требуемого комплекса эксплуатационных свойств материалов вставок в муфту стрелочного электропривода.

Эффективность работы фрикционных материалов в значительной степени определяется соотношением коэффициента трения и износостойкости, сочетанием физико-механических свойств, обеспечивающих соблюдение необходимых эксплуатационных свойств, в различных климатических условиях работы. В каждом отдельном случае значения коэффициента трения будут определяться условиями работы механизма.

В связи с непрерывным ростом скоростей движения подвижных составов (Сапсан, Аллегро, Стриж и др.), а так же грузонапряжённости железных дорог создание новых фрикционных материалов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами, обеспечивающих высокую надёжность функционирования стрелочных электроприводов типа СП в различных климатических зонах РФ является актуальной задачей.

Существующие аналоги фрикционных материалов, из которых изготавливаются элементы муфт стрелочного электропривода включают в себя значительное количество таких дорогостоящих легирующих примесей как медь (от 15 до 90%), олово (от 2 до 10%), никель (до 30%), хром (до 20%), вольфрам (до 10%) и другие, а также опасные компоненты (асбест). Наличие таких элементов в составе фрикционного материала значительно повышает его стоимость и усложняет производство, поэтому создание не дорогих и безопасных материалов, с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств является актуальной задачей.

Степень проработанности темы. Впервые порошковые спечённые материалы для фрикционных механизмов были предложены в 1929 году, а их промышленное производство было организовано в 1932 году фирмой «Дженерал металз паудер Ко» (США). Основным производителем фрикционных деталей начиная с 1935 года стала фирма «С.К. Веллман Ко» (США). Первые фрикционные изделия в СССР в виде дисков были изготовлены для авиационной промышленности в 1941-1942 гг.. С 1950 по 1960 годы фрикционные материалы, обладающие стабильно высокими эксплуатационными свойствами, широко начали применяться в машиностроении. Именно в этот период времени было создано большое количество важных инженерных решений. Теоретические и практические разработки Г.П. Козлова, И.М. Федорченко, П.В. Новосельцева, В.М. Крячек, Л.М. Никоновой, И.И. Панаюти, Л.И. Пугина, Ф.И. Шампай и других учёных позволили расширить области применения порошковых фрикционных материалов.

Большой вклад в создании новых и улучшении существующих материалов внесли такие российские учёные как А.В. Лешок, П.Н. Криволапов, В.В. Савич, А.Ф. Ильющенко, А.Н. Роговой, М.В. Лазарчик, М.З. Левит, В.С. Фадеев и др.

Наряду с этим предприятия Министерства путей сообщения СССР, а в дальнейшем ОАО РЖД, ЗАО «ДВ Технологии», ООО «ИТЖТ», Дальневосточная железная дорога, ЗАО «Термотрон-Завод», ЗАО «Дальсбыт», ООО «Информационные технологии» проводили работы по совершенствованию конструкций стрелочных электроприводов, и в частности фрикционной муфты.

На сегодняшний день создан большой спектр различных фрикционных материалов. Однако в связи с ростом скоростей движения и грузонапряжённости железных дорог существует потребность в создании новых материалов, способных работать в тяжёлых и сверхтяжёлых условиях эксплуатации механизмов и выдерживать высокие нагрузки, возникающие в муфте стрелочного электропривода. Важным аспектом является обеспечение низкой себестоимости при сохранении эксплуатационных свойств. Поиск новых материалов, обеспечивающих стабильное функционирование фрикционных муфт в тяжёлых условиях эксплуатации, является актуальной задачей материаловедения.

Целью работы является разработка материала для элементов фрикционных муфт с комплексом структурных показателей и физико-механических характеристик, обеспечивающих стабильность функционирования и эксплуатационных свойств железнодорожных стрелочных электроприводов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи исследования:**

1. Выполнить технико-экономический анализ существующих материалов, используемых для изготовления элементов фрикционных муфт, с целью разработки нового материала с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами и низкой себестоимостью.

2. Установить связь между составом, показателями микроструктуры и комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств материалов, используемых для изготовления вставок фрикционных муфт стрелочного электропривода.

3. Разработать методику установления количественной взаимосвязи между показателями состава, структуры и физико-механических свойств материала, используемого для изготовления вставок фрикционных муфт стрелочных электроприводов.

4. Разработать материал, используемый для изготовления вставок фрикционных муфт стрелочного электропривода, позволяющий обеспечить стабильность функционирования и эксплуатационных свойств стрелочного электропривода в тяжёлых условиях эксплуатации.

Научная новизна.

1. Установлена связь между показателем структурной организации, твердостью и относительной износостойкостью к механическому истиранию материала фрикционной вставки используемого для муфт сцепления. При этом, большему значению показателя структурной организации соответствуют большие значения относительной износостойкости и твёрдости.

2. На основе экспериментальных исследований получены регрессионные уравнения, устанавливающие связь между составом компонентов, показателями структурной организации и физико-механических характеристик материала фрикционной вставки. Данные уравнения позволяют прогнозировать количественный состав компонентов, используемых для изготовления материала фрикционной вставки, в зависимости от полученных по результатам исследований показателей структурной организации, механических и эксплуатационных свойств.

3. Установлено влияние количественного состава компонентов, используемых для изготовления материала фрикционной вставки муфты сцепления на стабильность значений коэффициента трения, показывающая, что увеличение содержания SiO_2 и BaSO_4 до 5% и 3% соответственно уменьшает девиацию коэффициента трения в заданном диапазоне усилий, а сокращение содержания SiO_2 и BaSO_4 до 3% и 1,5% соответственно увеличивает разброс значений коэффициента трения.

4. Экспериментально доказано влияние режима термической обработки на показатель структурной организации и эксплуатационные свойства разработанного материала фрикционной вставки муфты сцепления. Выявлено, что более высокие значения тягового усилия на шибере при заданном допустимом значении ступенчатой регулировки могут быть обеспечены за счёт выбора материала фрикционной вставки муфты, характеризующегося меньшим значением плотности границ зёрен. Меньшее значение плотности границ зёрен может быть получено в результате выбора режима термической обработки.

Практическая значимость.

1. Предложен и внедрён состав нового материала фрикционной вставки и разработаны технологические рекомендации по изготовлению фрикционных вставок для муфт сцепления с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

2. Разработана методика экспериментальных исследований, позволяющая на основе химического состава и свойств компонентов прогнозировать физико-механические и эксплуатационные характеристики материалов, используемых для изготовления фрикционных вставок.

3. Разработаны диск для крепления и форма фрикционной вставки, обеспечивающие необходимые физико-механические и эксплуатационные характеристики для их использования в составе фрикционной муфты стрелочного электропривода.

4. Результаты диссертационной работы внедрены и используются при изготовлении фрикционной муфты стрелочного электропривода типа СП-6М на предприятии ООО «Информационные Технологии» для нужд ОАО «РЖД», а также в учебном процессе на факультете МХТ ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Положения, выносимые на защиту.

1. Состав материала фрикционной вставки муфты, обеспечивающий заданные физико-механические и эксплуатационные характеристики с целью его применения в железнодорожных стрелочных электроприводах для их работы в тяжелых условиях.

2. Методика установления количественной взаимосвязи между составом, показателями структуры и физико-механических характеристик материалов, используемых для изготовления вставок фрикционных муфт стрелочных электроприводов.

3. Установленные зависимости между составом, показателями микро-структуры, физико-механических и эксплуатационных характеристик материала, используемого для изготовления фрикционной вставки муфты стрелочного электропривода.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивалась проведением экспериментальных исследований с применением современного оборудования, прошедшего государственную поверку; статистической обработкой экспериментальных данных; использованием общепринятых и специальных методик, что гарантировало достоверность полученных результатов, для обработки которых использовались стандартные компьютерные программы.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации представлялись на следующих научных конференциях: Международный симпозиум «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы» (Комсомольск-на-Амуре, 2015); Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, (Комсомольск-на-Амуре, 2019); Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению (Комсомольск-на-Амуре, 2022).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 2 публикации в рецензируемых изданиях, определенных перечнем ВАК, 2 публикации, включенные в базу цитирования Scopus и Web of Science, 1 патент на изобретение, 2 патента на полезную модель.

Личный вклад автора в работу заключается в постановке задач исследований, проведении экспериментальных исследований и их анализе, подготовке публикаций и формировании выводов по работе.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает в себя введение, 5 глав, заключение, написана на 145 страницах, содержит 43 рисунка, 8 таблиц, список литературы состоит из 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, обозначена основная цель, определены задачи и сформулирована научная новизна исследований, отмечена практическая ценность, основные направления реализации диссертационной работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, дан обзор содержания диссертации.

В первой главе представлен технико-экономический анализ существующих фрикционных материалов, используемых в составе тяжело нагруженных механизмов, в том числе фрикционных муфт стрелочных электроприводов, применяемых в железнодорожных стрелочных переводах. Приведён обзор научных работ в области создания новых материалов для фрикционных муфт.

Анализ литературы показал, что существующие материалы фрикционных вставок не способны в полной мере обеспечить функционирование муфт стрелочных электроприводов, ежегодно порядка 6,5% от общего количества отказов стрелочных электроприводов вызвано некорректной работой фрикционных муфт. Технико-экономический анализ существующих материалов фрикционных вставок показал, что материалы, изготавливаемые на медной основе и имеющие в своём составе такие легирующие элементы как Sn, Al, Pb имеют себестоимость в 2-4 раза выше себестоимости материалов, изготавливаемых на железной основе. Кроме того, некоторые такие марки материалов как М140, МП-11, МКВ-50А содержат в своём составе в качестве фрикционного наполнителя асбест.

Литературный обзор и выполненный технико-экономический анализ показали, что необходимость разработки нового материала обусловлена ростом скоростей движения подвижных составов, грузонапряжённости железных дорог, а также существующей потребностью в расширении области применения стрелочных электроприводов, повышении уровня надёжности фрикционных муфт при снижении себестоимости материала фрикционных вставок.

Во второй главе приведены методы и материалы, используемые для изготовления образцов фрикционных вставок исследуемых составов, методики

исследований микроструктуры, физико-механических и эксплуатационных свойств с целью установления количественной зависимости, дано описание оборудования.

Образцы исследуемых материалов изготавливались методом порошковой металлургии. В химический состав материала входили: Fe, Cu, C, BaSO₄, SiO₂. Прессование осуществлялось в твердосплавной пресс-форме с давлением 700 МПа. Спекание осуществлялось в атмосфере аргона в высокотемпературной вакуумной печи при температуре 1135 °С.

Исследования микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе Nikon Eclipse MA200. Для определения количественных структурных показателей использовалась программа регистрации и анализа изображений Image Expert Pro Plus 5.1, при помощи которой осуществлялось измерение таких количественных показателей как периметр каждого микроструктурного объекта P_i , площадь F_i , площадь поверхности шлифа, зафиксированная на некоторой выделенной области изображения F_u .

На основании измеренных исходных показателей были рассчитаны комплексные характеристики микроструктуры:

- средняя плотность границ на выделенной области изображения

$$q_{cp} = \frac{1}{F_u} \sum_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

где N - количество микрообъектов, зафиксированных на выделенной области изображения;

- плотность границ каждого микроструктурного объекта:

$$\rho_i = \frac{P_i}{F_i} \quad (2)$$

Соотношение основных структурных составляющих рассчитывали по формуле:

$$C_{ж} : C_{м} : C_{п} = \frac{\sum f_{жсi}}{F_{общ}} : \frac{\sum f_{mj}}{F_{общ}} : \frac{\sum f_{nk}}{F_{общ}} \quad (3)$$

где $C_{ж}$, $C_{м}$, $C_{п}$ - относительная площадь поверхности изображения микроструктуры, занимаемая железной матрицей, медными включениями и порами соответственно;

$f_{жсi}$, f_{mj} , f_{nk} - суммарная площадь отдельных структурных составляющих железной матрицы, включений меди и пор соответственно.

Исследование распределения компонентов составов материала проводилось на растровом электронном микроскопе SEM S-3400N (Hitachi).

Измерение микротвёрдости отдельных структурных составляющих проводили на микротвердомере НМV-2 (Shimadzu). Измерение твёрдости по Бринеллю проводилось на твердомере Бринелля ТН-600.

Измерение пористости образцов проводили в соответствии с ГОСТ 18898.

Важным параметром безотказной работы стрелочного электропривода является стабильность усилий на шибере, создаваемых механизмом при переводе стрелок в период его работы в различных условиях. Для приводов универсального назначения требуется обеспечение усилий на шибере в широком диапазоне. Для определения стабильности коэффициента трения были проведены исследования фрикционных свойств на машине для испытаний на трение и износ ИИ5018, по схеме «диск-колодка». Разработанная методика испытаний повторяла условия работы материала фрикционной вставки в составе муфты стрелочного электропривода типа СП-6. Фрикционные свойства образца в рамках одного испытания оценивались средним значением коэффициента.

Стабильность коэффициента трения оценивалась девиацией значений коэффициента трения Δf в диапазоне усилий при проведении испытания, приведенных к усилию на шибере. Параметр Δf принят в качестве одного из основных эксплуатационных параметров функционирования стрелочного электропривода.

Ещё одним важным эксплуатационным параметром, обеспечивающим безотказное функционирование стрелочного привода и определяющим возможность использования материалов в составе фрикционных муфт, является стойкость к износу, измеряемая как период стойкости τ материала вставки фрикционной муфты при проведении стендовых испытаний. Критерием стойкости материала являлся период τ от начала испытания испытаний муфты стрелочного привода в сборе до момента превышения допустимого значения тока электродвигателя с заданным значением усилия на шибере.

В третьей главе приведено теоретическое обоснование взаимосвязи относительной износостойкости материалов фрикционных вставок со структурно чувствительным показателем, методика измерения и расчета.

В основе уравнения механического истирания лежит феноменологическая гипотеза Престона о том, что износ поверхности в данной точке пропорционален работе сил трения. Особенность реального процесса механического истирания учитывалась введением поправочных коэффициентов, при этом линейная зависимость между интенсивностью изнашивания и номинальной нормальной нагрузкой принципиально не нарушалась.

Уточнением вышеуказанной модели является учет физико-механических свойств материала при пластической деформации.

$$I_h = Kp^m, \quad (4)$$

где I_h – интенсивность линейного изнашивания,

p – давление, воздействующее на участок с заданной площадью,

K – коэффициент, определяемый комбинацией эмпирических констант.

Показатель степени m является структурно чувствительной величиной, отображающей технологическую структурную наследственность материала. На поверхностях, участвующих в контактно-фрикционном взаимодействии, всегда возникают импульсы напряжений, обусловленные шероховатостью, разрывом

скоростей деформаций на границе двух сред и структурной неоднородностью, которые значительно превышают номинальные давления и предел текучести контактирующих материалов.

Процессу поверхностного разрушения предшествует пластическая деформация и деградация фрагментированной субструктуры, из которых в дальнейшем образуются частицы износа. Сопротивляемость поверхностной структуры изнашиванию определяется ее способностью противодействовать пластической деформации. Потенциал пластической деформации определялся на основании результатов измерения микротвердости. Это позволило идентифицировать отдельные структурные составляющие по их деформационным свойствам, на основании которых можно было прогнозировать сопротивляемость композиционного материала механическому истиранию.

По аналогии с относительной износостойкостью абразивного изнашивания было введено понятие относительной износостойкости к механическому истиранию (относительная износостойкость), в качестве эталонного материала была принята сталь 45. Относительная износостойкость отдельной структурной составляющей композиционного материала определялась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\mu HV_{\text{стр}}}{\mu HV_{\text{ф}}}, \quad (5)$$

где $\mu HV_{\text{стр}}$ - микротвёрдость отдельной структурной составляющей материала фрикционной вставки,

$\mu HV_{\text{ф}}$ – микротвёрдость материала эталона.

В четвёртой главе приведены результаты исследований по выбору составов материалов вставки фрикционной муфты на основе факторного анализа, результаты исследования микроструктуры, физико-механических и эксплуатационных свойств данных материалов, рассмотрены зависимости между показателями микроструктуры, физико-механических и эксплуатационных свойств материалов, используемых для изготовления вставок фрикционных муфт стрелочного электропривода.

Для разработки нового материала вставки фрикционной муфты в качестве аналога был взят материал марки ФМК-11, обладающий наименьшей себестоимостью из существующих аналогов материалов фрикционных вставок на основе железа, состоящий из доступных и широко распространённых на территории РФ химических компонентов, получивший практическое применение по износостойкости, фрикционной теплостойкости и механическим характеристикам. Однако фрикционные свойства данного материала не обеспечивали стабильную эксплуатацию стрелочных электроприводов в тяжёлых условиях, в основном из-за низкого коэффициента трения – 0,21-0,22 в сочетании с небольшой пористостью 8-10% и высокой твёрдостью 800-1000 НВ.

Состав разрабатываемого нового материала включал в себя железную матрицу, предавшую материалу жаропрочность, износостойкость, прочность и пластичность. SiO₂ обеспечивал высокие фрикционные свойства, в сочетании с прочностью и твёрдостью. BaSO₄ обеспечивал повышение стабильности фрик-

ционных свойств материала и термической прочности железной матрицы. В качестве компонентов твёрдых смазок в состав материала входили С и Cu. Легирование железной матрицы Cu повысило её теплопроводность, прочность и твёрдость. Углерод упрочнил железную матрицу, растворившись в ней, обеспечив, формирование перлитной структуры. Структурно-свободный С, в процессе торможения, создавал устойчивую активную плёнку на поверхности трения, это обеспечило отсутствие явлений схватывания и заедания материала фрикционной вставки с материалом контртела.

Для проведения эксперимента была составлена матрица факторного планирования, варьируемыми факторами являлись весовые массовые концентрации Cu, SiO₂ и BaSO₄. Содержание С и пластификатора оставалось постоянным и составляло 3,0 % и 1,0 % соответственно. В результате было получено 9 перспективных составов материалов фрикционных вставок.

При исследовании микроструктуры материалов 9 составов были выявлены три основные структурные составляющие: железная матрица с включениями SiO₂ и BaSO₄, медные включения и поры с включениями структурно-свободного графита. Железная матрица представляла собой отдельные зерна, с развитой субструктурой, состоящей из ферритного ядра, окруженного перлитной оболочкой, толщина которой определялась глубиной диффузии углерода.

На рисунке 1 представлены микроструктуры исследуемых материалов фрикционных вставок.

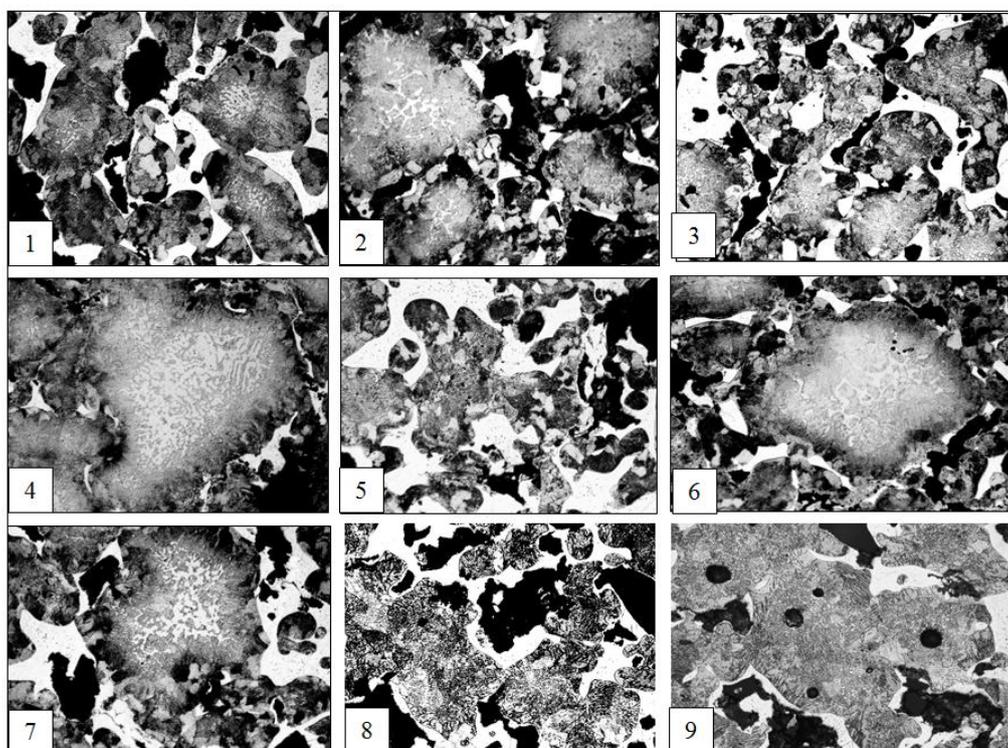


Рисунок 1 - Микроструктуры исследуемых материалов

Исследование химического состава образцов показало зоны распределения Fe, Si и Cu. На поверхности шлифа присутствуют включения Si и Ba, а также O₂, по распределению на поверхности микрошлифа которого можно предположить, что перед нами включения SiO₂ и BaSO₄. Включения S выглядят точечно и скапливаются преимущественно в зоне железной матрицы, что может свидетельствовать об образовании химического соединения – FeS.

Средняя плотность границ q_{cp} представляла собой интегральную величину субграниц в стальном каркасе и межфазовых границ между стальной матрицей и медными включениями. Было выявлено, что увеличение содержания SiO₂ с 3 % до 5 % при фиксированном содержании BaSO₄ - 1,5 % и Cu 15 % приводит к увеличению средней плотности границ q_{cp} на 5 %, а при Cu 30 % на 11 %. Увеличение содержания BaSO₄ с 1,5 % до 3 % при фиксированном содержании SiO₂ – 3 % и Cu 15 % приводит к увеличению средней плотности границ q_{cp} на 12 %, а при Cu 30 % уменьшению на 5 %.

Сравнительный анализ микроструктур показал, что на относительную площадь основных структурных составляющих в сечении образцов (C_M , C_J , C_{II}) большое влияние оказывали размеры пор и их пространственное распределение. Образцы материалов составов № 1 - 4 характеризовались крупными порами, неравномерно распределенными по объему, а образцы № 5 – 9 - более мелкими равномерно распределенными порами.

Большинство механизмов поверхностного разрушения при контактно-фрикционном взаимодействии рассматривают образование продуктов изнашивания как двухэтапный процесс, при котором первый этап связан с поверхностной структурной деградацией, а второй - с процессом механического истирания. При механическом истирании композиционного материала каждая структурная и фазовая составляющая характеризуется своей относительной износостойкостью, которая определялась по формулам 6, 7:

$$\varepsilon_J = \frac{\mu HV_{ж}}{\mu HV_{\text{эталон}}}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_M = \frac{\mu HV_M}{\mu HV_{\text{эталон}}} \quad (7)$$

где $\mu HV_{ж}$, μHV_M и $\mu HV_{\text{эталон}}$ - микротвердость железной матрицы, медных включений и материала эталона соответственно;

ε_J - относительная износостойкость для железной матрицы;

ε_M - относительная износостойкость для медных включений.

Учитывая, что в структуре исследуемого материала имеются поры, износостойкость которых равна нулю, относительная износостойкость композиционного материала определялась по формуле 8.

$$\varepsilon_{KM} = C_J \varepsilon_J + C_M \varepsilon_M \quad (8)$$

В таблице 1 представлены результаты расчёта параметров структурной организации материала в сравнении с полученными значениями микротвёрдости железной матрицы и медных включений, твёрдости, пористости и относительной износостойкости материалов фрикционных вставок.

Таблица 1 – Параметры структурной организации и физико-механические свойства материалов 9 составов

№состава	Средняя плотность границ, мкм ⁻¹	Относительная площадь, занимаемая компонентом сплава			μHV, МПа		Пористость %	НВ, МПа	Относительная износостойкость
		С _ж	С _м	С _п	Fe матрица	Включения Cu			
1	0,340	0,57	0,24	0,19	2836,8	1207,2	18,92	710	0,95
2	0,336	0,65	0,03	0,32	3070,0	1322,6	19,45	760	0,93
3	0,258	0,57	0,21	0,22	3133,2	1143,4	18,21	540	0,87
4	0,387	0,69	0,03	0,28	2865,2	1330,7	20,81	760	1,11
5	0,348	0,57	0,17	0,26	2881,2	1235,9	18,62	660	0,99
6	0,361	0,81	0,03	0,16	3420,4	1271,0	19,63	740	1,07
7	0,314	0,27	0,37	0,36	3494,8	1285,2	18,95	590	0,87
8	0,345	0,72	0,15	0,13	2725,0	1138,0	18,61	630	1,03
9	0,335	0,66	0,23	0,11	2967,0	1156,0	21,65	750	1,01

По результатам факторного планирования были получены регрессионные уравнения:

$$q = 0,513 - 0,004 \cdot Cu - 0,001 \cdot SiO_2 - 0,024 \cdot BaSO_4 \quad (9)$$

$$\Pi = 22,426 - 0,0063 \cdot Cu + 0,003 \cdot SiO_2 + 0,264 \cdot BaSO_4 \quad (10)$$

$$НВ = 747,6 - 6,5 \cdot Cu + 29,2 \cdot SiO_2 + 0,3 \cdot BaSO_4 \quad (11)$$

$$\varepsilon = 1,383 - 0,019 \cdot Cu + 0,026 \cdot SiO_2 + 0,011 \cdot BaSO_4 \quad (12)$$

Из анализа полученных уравнений следует, что с повышением содержания Cu относительная износостойкость ε , твёрдость НВ, пористость Π и средняя плотность границ структурных элементов $q_{ср}$ снижаются. Это означает, что понижаются диссипативные свойства материала. С повышением содержания SiO_2 и $BaSO_4$ относительная износостойкость и твердость по Бринеллю возрастают, а средняя плотность границ снижается. Полученные регрессионные уравнения позволяют прогнозировать количественный состав компонентов, используемых для изготовления материала фрикционной вставки, в зависимости от требуемых механических и эксплуатационных свойств. На основании полученных результатов были построены графики зависимости, раскрывающие взаимосвязь между показателями микроструктуры и физико-механических свойств материалов фрикционных вставок (рисунки 2-4).

График на рисунке 2 показывает, что железная матрица является основной составляющей, определяющей износостойкость фрикционного материала. С повышением содержания железа его износостойкость линейно возрастает и с увеличением содержания железа от 58 % до 76,5 % увеличивается на 23 %.

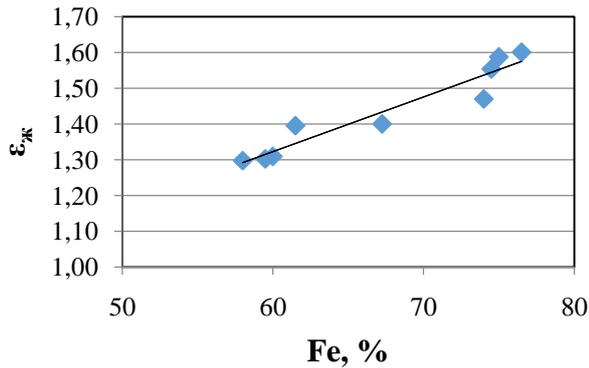


Рисунок 2 - Влияние содержания железа на относительную износостойкость материалов фрикционных вставок

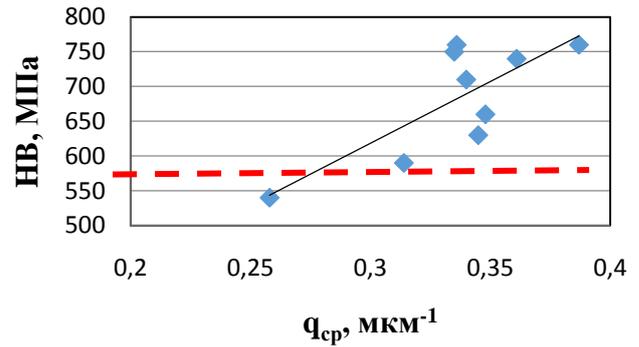


Рисунок 3 - Влияние значений средней плотности границ на твердость материалов фрикционных вставок

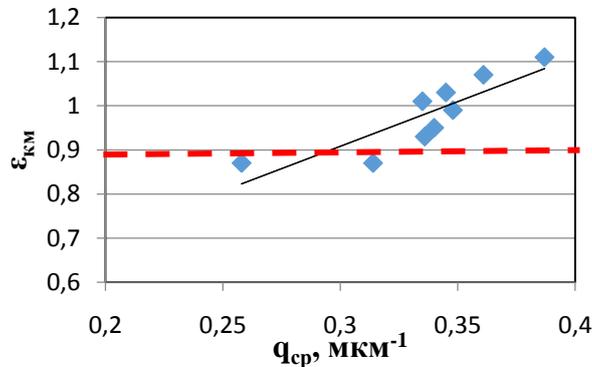


Рисунок 4 - Влияние средней плотности границ на относительную износостойкость материалов фрикционных вставок

Твердость является важным параметром при определении стабильности коэффициента трения, в связи с чем материалы с низкой твердостью будут обладать более высоким коэффициентом трения, но в то же время низкой износостойкостью. Однако повышение износа не может являться признаком высокой стабильности коэффициента трения. Низкое значение износостойкости будет приводить к чрезмерному истиранию материала, снижая долговечность его использования. По установленной связи между относительной износостойкостью $\epsilon_{км}$ и параметром плотность границ зерен q , последний может быть выбран в качестве информативного параметра оценки износостойкости. Преимуществом предложенного подхода с практической точки зрения является то, что параметр q может быть получен только по результатам микроструктурных исследований и не требует выполнения дополнительных испытаний.

Из установленных зависимостей (рисунки 3, 4) можно видеть, что с увеличением значений твердости материала от 540 до 760 HB, что составляет 40 %, и с увеличением относительной износостойкости $\epsilon_{км}$ от 0,87 до 1,11, что составляет 28 %, значения параметра q возросли на 50 % – от 0,258 до 0,387 мкм^{-1} . Это показывает высокую структурную чувствительность параметра q . Плотность границ зерен влияет на перемещение дислокаций в условиях деформационного взаимодействия пары трения и определяет энергию этого

взаимодействия. В связи с этим параметр q характеризует диссипативные свойства материала и может являться физически обоснованным параметром для определения эксплуатационных свойств фрикционных материалов.

Средняя плотность границ структурных элементов являлась количественным показателем, характеризующим диссипативные свойства материала, связанные с процессами внутреннего трения при пластической деформации, инициированной контактно-фрикционным взаимодействием в локальных областях, которая определяется динамикой дефектов кристаллического строения. В процессе торможения и преодоления дислокациями препятствий совершается работа внутреннего трения, которая в дальнейшем преобразуется в тепло и рассеивается. Наиболее активными барьерами торможения дислокаций являются границы и субграницы. С повышением средней плотности границ для перемещения дислокаций требовалась большая энергия, что приводило к повышению работы внутреннего трения и более активному выделению тепла или диссипации. Таким образом, с повышением средней плотности границ диссипативная способность материалов фрикционных вставок возрастала, что соответствовало повышению его функциональных свойств.

С практической точки зрения при выборе материалов с комплексом свойств, максимально удовлетворяющих установленным требованиям твердости, износостойкости и стабильности коэффициента трения, введение дополнительного параметра q может играть важную роль в сокращении объемов проводимых исследований. Это можно видеть по графикам на рисунках 3 и 4, где при выборе лучшего с точки зрения обеспечения фрикционных свойств материала можно исключить те, что имеют наименьшие значения твердости и износостойкости (отмечено пунктирными линиями на графиках).

Исследование фрикционных свойств разработанных материалов позволило определить значение коэффициента трения, обеспечивающего создание тяговых усилий на шибере в диапазоне от 4000 Н до 6000 Н. При этом наиболее важным эксплуатационным параметром, позволяющим обеспечить стабильность функционирования стрелочного привода, является не коэффициент трения, а девиация коэффициента трения Δf , значение которой должно быть минимальным в широком диапазоне усилий, создаваемых на шибере стрелочного электропривода. По результатам испытаний было установлено, что в материале №2 в диапазоне значений испытательной нагрузки соответствующем диапазону усилий 4000-6000 Н, развиваемых на шибере, было получено минимальное значение девиации коэффициента трения $\Delta f = 0,08$ из всех исследуемых материалов (рисунок 5).

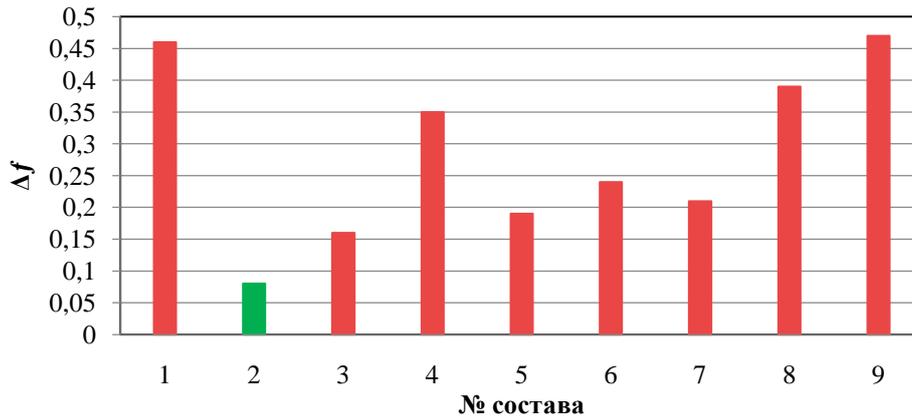


Рисунок 5 – Девиация коэффициента трения исследуемых материалов в диапазоне тяговых усилий от 4000 до 6000 Н

Было установлено влияние содержания SiO_2 и BaSO_4 на стабильность коэффициента трения f материалов фрикционных вставок. Так, в материале состава № 8, где содержалось 3 % SiO_2 и 1,5 % BaSO_4 , разброс значений коэффициента трения в диапазоне тяговых усилий на шибере от 4000 Н до 6000 Н составил 78 %. Увеличение содержания SiO_2 на 2 % (состав №6), привело к тому, что разброс значений коэффициента трения сократился до 46 %. При увеличении содержания BaSO_4 на 1,5 % (состав №2), разброс значений коэффициента трения сократился до 16 %. Однако, уменьшение содержания SiO_2 на 2 % (состав №4) привело к увеличению разброса значений f до 74%. Таким образом, состав № 2 из исследуемых композиций был признан лучшим по параметру стабильности коэффициента трения.

В пятой главе приведены результаты испытаний материалов фрикционных вставок в составе муфты стрелочного электропривода типа СП-6М с целью выбора рационального состава для обеспечения стабильного функционирования стрелочного электропривода в тяжёлых условиях эксплуатации (рисунок 6).

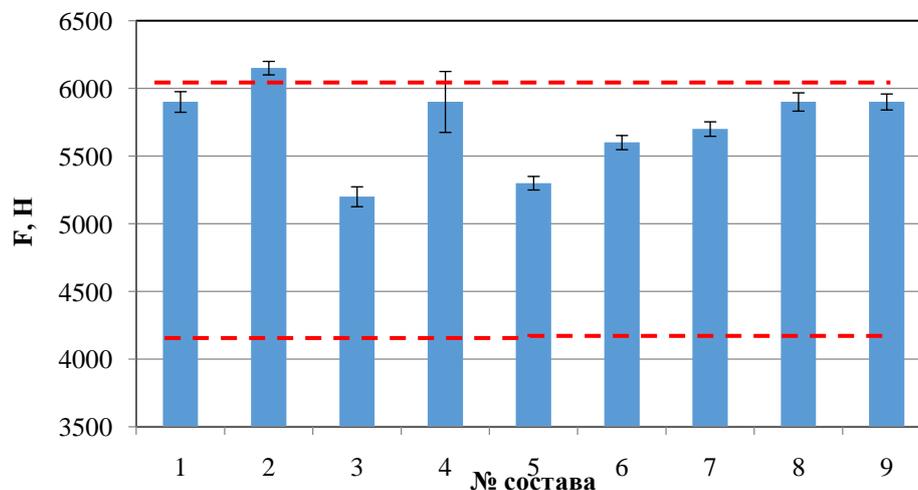


Рисунок 6 – Влияние состава материала фрикционной вставки на тяговое усилие

По результатам испытаний материал фрикционной вставки состава № 2 показал лучшие значения тяговых усилий на шибере стрелочного электропривода 6150 Н в период наиболее тяжёлого режима работы, при сохранении их стабильности, разброс значений составил 2,5 %, что является показателем надёжного функционирования стрелочного электропривода.

Для оценки периода стойкости к износу τ материала состава №2 в сравнении с материалом-аналогом, используемым для изготовления фрикционных вставок ранее, были проведены стендовые испытания. По результатам испытаний установлено, что период стойкости к износу τ материала аналога составил 90 секунд (рисунок 7). По истечении этого времени предельно допустимые значения тока электродвигателя были превышены. Значение периода τ для материала состава № 2 составило более 300 секунд, в течение которого предельно допустимые значения тока электродвигателя превышены так и не были. Кроме того, было установлено, что износ материала состава № 2 в 2 раза ниже в сравнении с износом материала-аналога.

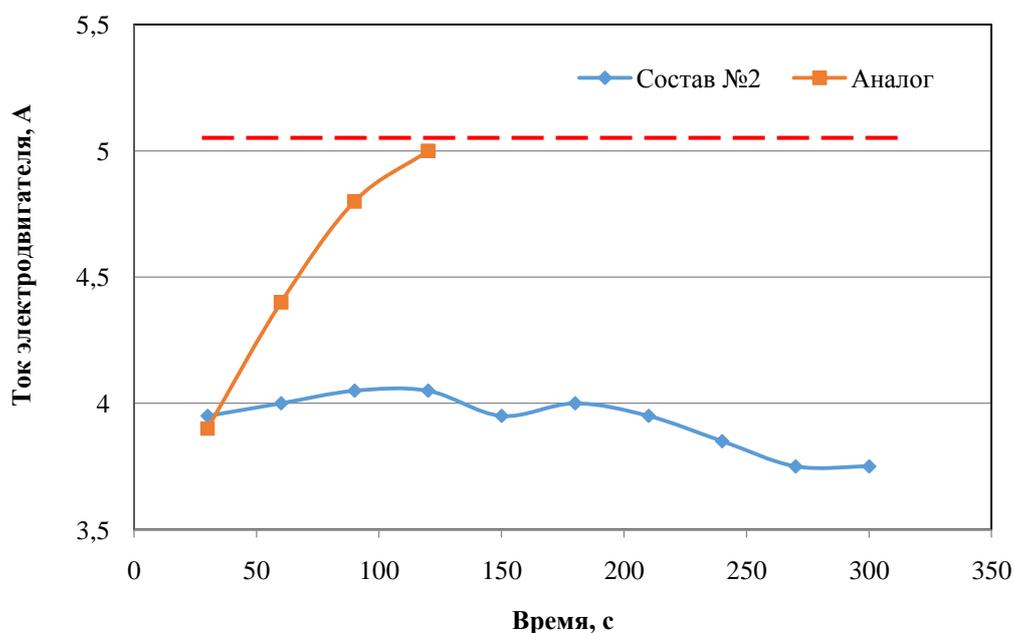


Рисунок 7 – График изменения тока электродвигателя в зависимости от времени непрерывной работы муфты

Для установления взаимосвязи между режимом спекания, показателем структурной организации и эксплуатационными свойствами материал для изготовления фрикционных вставок состава №2 был изготовлен при различных режимах спекания. В результате исследований было установлено, что микроструктура материала, полученная при заданном режиме спекания, при котором была получена средняя плотность границ зерен $q_{cp} = 1,065 \text{ мкм}^{-1}$, характеризуется крупными порами, мелкопластинчатым перлитом и небольшими по протяжённости медными включениями. Однако, микроструктуры образцов, обладающих значениями средней плотности границ - $0,578 \text{ мкм}^{-1}$ и $0,368 \text{ мкм}^{-1}$,

характеризовались меньшими размерами пор, способных образовывать объемные «карманы» микромасштабного уровня для удержания смазки, более крупными пластинками пластинчатого перлита и более гладкими границами (рисунок 8).

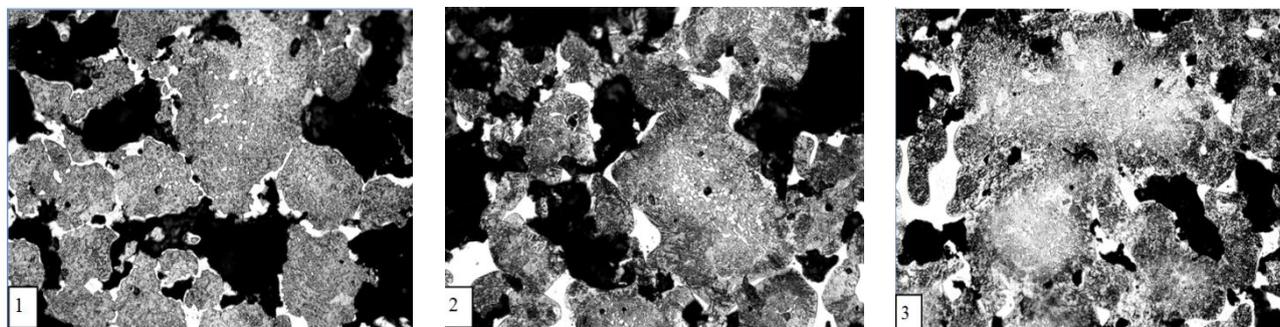


Рисунок 8 – Микроструктуры материала состава №2 полученного при различных режимах спекания, с плотностью границ структурных элементов:

1 - $q=1,065 \text{ мкм}^{-1}$; 2 - $q=0,368 \text{ мкм}^{-1}$; 3 - $q=0,578 \text{ мкм}^{-1}$

Испытания материала состава №2 в составе муфты стрелочного электропривода показали, что материал, обладавший наименьшим значением средней плотности границ зёрен $q_{\text{ср}}$, показал лучшие значения эксплуатационных свойства муфт стрелочных электроприводов в период наиболее тяжёлого режима работы, величина тягового усилия на шибере составил 6350 Н (рисунок 9).

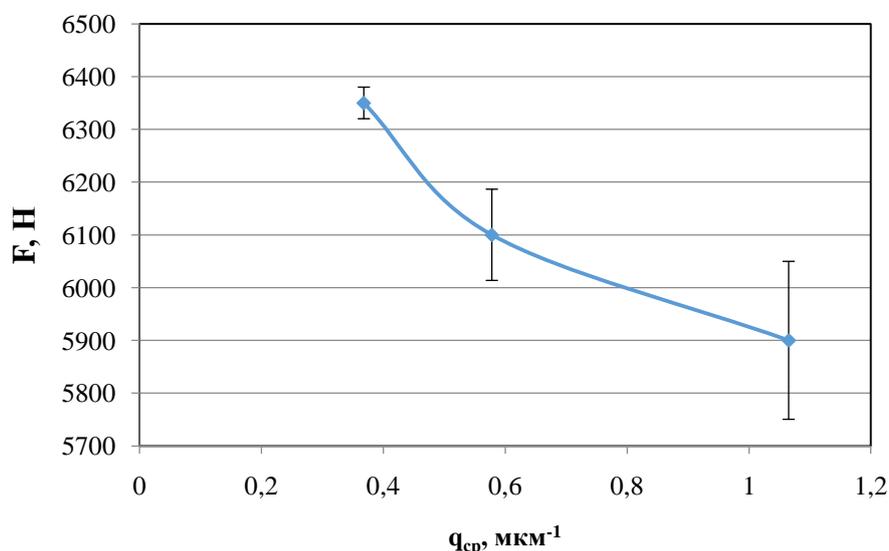


Рисунок 9 – Влияние плотности границ зерен, полученной в результате выбора режима спекания, на значение и стабильность тягового усилия при выдвигании шибера

Образцы с наибольшей плотностью границ зерен $q_{\text{ср}}$ имели худшие динамические условия трения в сравнении с образцами, для которых были выявлены меньшие значения плотности границ. Таким образом, было установлено

влияние режима спекания на значения плотности границ структурных элементов, позволившее улучшить эксплуатационные свойства материала состава №2, используемого для изготовления фрикционных вставок муфт стрелочного электропривода.

Разработанный материал состава №2 обладает значениями параметров структурной организации и физико-механических свойств, способных обеспечить надёжное функционирование стрелочного электропривода при тяжёлых условиях эксплуатации. Кроме того, материал состава №2 обладает до четырех раз меньшей себестоимостью в сравнении с существующими аналогами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку материала для изготовления вставок фрикционных муфт с комплексом физико-механических характеристик, позволяющих обеспечить высокую стабильность показателей эксплуатационных свойств для работы железнодорожных стрелочных электроприводов в тяжелых условиях. По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Установлена связь между составом, показателями микроструктуры, физико-механическими характеристиками материалов вставок фрикционных муфт, обеспечивающими заданные показатели функционирования и эксплуатационных свойств стрелочного электропривода для работы в тяжелых условиях. Установлено, что материалы с большей степенью развитости границ структурных элементов характеризуются большей твёрдостью. С увеличением средней плотности границ структурных элементов наблюдается повышение относительной износостойкости, что связано с повышением работы внутреннего трения и, как следствие, диссипативной способности фрикционного материала. Увеличение содержания SiO_2 с 3 % до 5 % при фиксированном содержании BaSO_4 - 1,5 % приводит к увеличению средней плотности границ на 5 %, твёрдости на 18 % и относительной износостойкости на 23 %. Увеличение содержания BaSO_4 с 1,5 % до 3% при фиксированном содержании SiO_2 – 3% приводит к увеличению средней плотности границ на 12 %, твёрдости на 21 % и относительной износостойкости на 8 %.

2. На основе данных о составе компонентов исследуемых материалов методом порошковой металлургии изготовлены фрикционные вставки, которые прошли испытания в составе муфты стрелочного электропривода типа СП в за-

данном диапазоне эксплуатационных нагрузок. На основании результатов проведенных исследований установлено, что материал состава Fe -74%, Cu - 15%, C - 5%, BaSO₄ - 3%, SiO₂ - 5% обладает наибольшей стабильностью коэффициента трения с девиацией значения от 0,52 до 0,62 в диапазоне тяговых усилий на шибере стрелочного электропривода от 5000 Н до 6000 Н. По результатам стендовых испытаний установлено, что материал данного состава обладает лучшими значениями показателей эксплуатационных свойств – максимальная величина тягового усилия на шибере составляет 6150 Н, при разбросе значений в пределах 2,5%.

3. Предложена методика прогнозирования количественного состава компонентов, используемых для изготовления материала вставки фрикционной муфты, в зависимости от комплекса физико-механических характеристик, позволяющих обеспечить требуемые показатели эксплуатационных свойств стрелочного электропривода. Методика основана на проведении экспериментальных исследований по измерению показателей структурной организации и микротвердости основных компонентов, пористости и твердости материалов на основе железа и меди, получаемых спеканием порошков заданного состава с дополнительными компонентами SiO₂ и BaSO₄, добавляемыми в состав основного материала для снижения задигов и увеличения коэффициента трения, и используемых для изготовления вставок фрикционных муфт стрелочных электроприводов. На основании результатов экспериментальных исследований получены регрессионные уравнения, устанавливающие связь между составом компонентов, показателями структурной организации и физико-механических характеристик исследуемых материалов вставок фрикционных муфт.

4. Установлено влияние режима спекания на среднюю плотность границ структурных элементов материалов вставок и установлена связь между средней плотностью границ структурных элементов и показателем эксплуатационных свойств материалов вставок исследуемых составов. Материалы с меньшим значением плотности границ структурных элементов, полученным в результате выбора определенного режима спекания, позволяют обеспечить максимальное значение тягового усилия на шибере 6350Н при меньшей девиации этих значений при наиболее тяжёлом режиме работы.

5. Предложенный, в результате проведённых исследований состав фрикционного материала внедрён на предприятии ООО «Информационные технологии» для изготовления фрикционных вставок, используемых ОАО «РЖД» в муфтах стрелочных электроприводов типа СП-6М.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ :

1. Фадеев, В. С. Исследование микроструктуры фрикционного композиционного материала для муфт стрелочных электроприводов / В.С. Фадеев, А.А. Афанасьева, В.А. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – №I-1(33). – С. 110-115.

2. Афанасьева, А. А. Исследование структуры и свойств фрикционного композиционного материала на основе железной матрицы / А.А. Афанасьева, О.В. Башков, В.С. Фадеев // Frontier materials & technologies (Вектор науки Тольяттинского государственного университета). – 2022. – №4. – С. 18-29.

Публикации в зарубежных и переводных рецензируемых изданиях (Web of Science, Scopus):

3. Kim, V.A. Study of nonequilibrium structures by the method of multifractal parametrization / V.A. Kim, A.A. Afanaseva, E.V. Samar, I.V. Belova // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – V.200. – P. 467-474.

4. Bashkov, O.V. Study of the structure and friction properties of a new composite friction material / O.V. Bashkov, A.A. Afanaseva // Marine intellectual technologies. – 2021. – V. 1. – No 4. – P. 59-65.

Патентные документы:

5. Пат. 2639427 Российская Федерация, МПК⁵¹ С 22 С 33/02 С 33 С 38/16 В 22 F 3/12 В 22 F 7/00. Материал фрикционный композиционный для фрикционной муфты стрелочного электропривода / Фадеев В.С., Штанов О.В., Палладин Н.М. Конаков А.В., Афанасьева А.А. ; заявитель и патентообладатель ООО «ИнфоТех». - № 2016126795; заявл. 05.07.16 ; опубл. 21.12.2017, Бюл. № 36. – 3 с. : ил.

6. Пат. 176377 Российская Федерация, МПК⁵¹ В 22 F 5/00 F 16 D 13/60 F 16 D 69/02 В 22 F 3/26 С 22 С 33/02. Фрикционный элемент для фрикционной муфты стрелочного электропривода / Фадеев В.С., Штанов О.В., Палладин Н.М. Конаков А.В., Афанасьева А.А. ; заявитель и патентообладатель ООО «ИнфоТех». - № 2016126797; заявл. 05.07.16 ; опубл. 17.01.2018, Бюл. № 2. – 3 с. : ил.

7. Пат. 181227 Российская Федерация, МПК⁵¹ В 22 F 3/16 В 22 F 5/10 F 16 D 13/60 С 22 С 33/02. Диск фрикционной муфты стрелочного привода типа СП/ Фадеев В.С., Штанов О.В., Палладин Н.М., Конаков А.В., Гайнан-

шин Н.Г., Афанасьева А.А. ; заявитель и патентообладатель ООО «ИнфоТех». - № 2018107743; заявл. 02.03.18 ; опубл. 06.07.2018, Бюл. № 19. – 3 с. : ил.

Публикации в других изданиях:

8. Ким, В. А. Исследование состава, структуры и свойств нового композиционного фрикционного материала / В.А. Ким, В.С. Фадеев, А.А. Афанасьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – Т.1. - №4(40). – С. 62-68.

9. Ким, В.А. Особенности структуры и свойств фрикционного композиционного материала / В.А. Ким, А.А. Афанасьева // Технология машиностроения. – 2019. – №11. – С. 5-11.

Афанасьева Анна Алексеевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ МУФТ СЦЕПЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОН-
НЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.2023.

Формат 60x84 1/16. Бумага писчая. Ризограф RISO EZ 570E.
Усл. печ. 1,16 л. Уч. изд. 1,10 л. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Полиграфическая лаборатория Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
Комсомольского-на-Амуре государственного университета
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.