

На правах рукописи



Шакина Антонина Владимировна

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
ВАГОННОЙ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ ИЗ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО
ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2014

Работа выполнена в филиале Общества с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр Информационные Технологии», г. Комсомольск-на-Амуре

Научный руководитель: **Фадеев Валерий Сергеевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, исполнительный директор ООО «НТИЦ Информационные Технологии», г. Москва

Официальные оппоненты: **Черномас Вадим Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем металлотехнологий ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии» ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре

Лончаков Сергей Зиновьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

Защита состоится «24» сентября 2014 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201 корпус 3. Факс: 8(4217)53-61-50; e-mail: mdsov@knastu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета и на официальном сайте организации по адресу: www.knastu.ru

Автореферат разослан «21» июля 2014 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пронин Александр
Инокентьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Начиная с 1990-х гг. в условиях функционирования системы «тормозная колодка – колесо железнодорожного вагона» произошли значительные изменения, связанные с интенсификацией экономических связей между регионами Российской Федерации: увеличилась осевая нагрузка вагонов и скорости передвижения составов, вследствие чего возросли требования к эффективности торможения и сроку службы тормозных колодок, а также возникла необходимость щадящего их воздействия на вагонное колесо для минимизации его термомеханических повреждений.

Ухудшение условий эксплуатации диктует новые требования к фрикционному материалу тормозных колодок. Свойства материалов колодок, применяемых на вагонах в настоящее время, уже не в полной мере удовлетворяют этим возросшим требованиям. Так, чугунные колодки (тип «С») обладают низкой износостойкостью и нестабильным коэффициентом трения при скоростях свыше 120 км/ч, а колодки на органическом (полимерном) связующем вызывают термомеханические повреждения колес вследствие низкой теплопроводности, кроме того, их коэффициент трения нестабилен в присутствии влаги.

Таким образом, разработка нового фрикционного материала вагонной тормозной колодки, совмещающего эффективность торможения с высокой износостойкостью и щадящим воздействием на колесо, является актуальной задачей, для решения которой необходимо проведение комплекса исследований влияния состава, структуры и технологии получения такого материала на его свойства.

Цели и задачи.

Целью диссертационной работы является исследование аддитивного влияния компонентов порошкового материала на его структуру и фрикционные свойства для разработки материала тормозной колодки повышенной износостойкости, со стабильным коэффициентом трения и колесосберегающим эффектом, а также технологии его изготовления.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Исследование состава и структуры элементов системы «тормозная колодка – колесо», в частности, их поверхностного слоя, для определения особенностей их изнашивания в процессе эксплуатации.
2. Разработка комплексной методики фрикционных испытаний в лабораторных условиях, обеспечивающей максимально адекватное моделирование процессов, происходящих в системе «тормозная колодка – колесо».
3. Исследование влияния состава и структуры матрицы и фрикционного наполнителя металлокерамического порошкового материала на его фрикционные свойства, а также определение оптимального содержания компонентов матрицы и фрикционного наполнителя на основе реализованных исследований.
4. Исследование влияния технологии получения металлокерамического порошкового материала на его структуру и фрикционные свойства.

Для решения поставленных задач применены современные **методы исследования**: фрикционные испытания на программируемом оборудовании, компьютерная

металлография, растровая электронная микроскопия, а также стандартизованные механические испытания.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Установлены и научно обоснованы зависимости изменения физико-механических (твердость, плотность, пористость) и фрикционных свойств порошковых материалов систем «железо – медь», «железо – углерод», «железо – хром» от содержания меди, углерода, хрома. Наблюдается экстремальный характер изменения фрикционных свойств в системе «железо – медь» с минимумом при значениях 30–40 % меди, обусловленным формированием на поверхности трения вторичной структуры (серого слоя), представляющей собой совокупность дисперсных слоев твердого раствора меди и железа, параллельных поверхности трения.

Минимум и максимум в значениях фрикционных свойств порошковых материалов «железо – углерод» наблюдаются при концентрации углерода 1–2,5 % и 9 % соответственно. Такой характер изменения фрикционных свойств можно объяснить образованием при 2,5 % углерода структуры эвтектоидной стали (перлит) со свободным углеродом в порах материала, что подтверждается повышением твердости материала и снижением его коэффициента трения. При дальнейшем увеличении содержания углерода до 9 % происходит формирование структуры завэвтектоидной стали (перлит + цементит) (оставшаяся часть углерода находится в порах материала), а также рост пористости. Выкрашивание частиц цементита, а также рост пористости, снижающей твердость материала и прочность связи между участками металлической матрицы, ведут к росту объемного износа и коэффициент трения. При дальнейшем росте содержания графита (11–15 %) происходит снижение объемного износа и фрикционных характеристик вследствие влияния пленки, образованной избыточным количеством (до 8–12 %) свободного углерода. Кроме того, вследствие значительного роста объемного содержания углерода, разрушение материала происходит не столько по металлической матрице, сколько по участкам графита в объеме материала, что ведет к снижению износа. При этом металлическая матрица, выкрашиваясь по частицам цементита, обеспечивает высокий коэффициент трения, несмотря на смазывающее действие свободного углерода.

2. Установлены и научно обоснованы закономерности, описывающие влияние вида и содержания фрикционного наполнителя – оксидов алюминия и кремния – на износостойкость и фрикционные свойства порошкового материала. Наблюдается немонотонный характер изменения объемного износа порошкового материала с минимумом при содержании оксида алюминия (#110 от компании Saint Gobain) 7 %, глинозема Г-00 3 % и кварца пылевидного 3 %. Установленный характер зависимости износостойкости от содержания наполнителя определяется формированием в поверхностном слое наклепа с повышенной микротвердостью, а также наличием износостойких частиц наполнителя. При избытке наполнителя активизируется процесс разрушения поверхностного слоя вследствие концентрации напряжения на частицах наполнителя. При этом коэффициент трения стабилен и не зависит от концентрации фрикционных наполнителей (в рассмотренных пределах). Порошковые материалы с оксидом алюминия обладают меньшим коэффициентом трения по сравнению с материалами с оксидом кремния, что объясняется более высокой твердостью частиц окси-

да алюминия по сравнению с частицами кварца пылевидного (9 и 7 баллов по шкале Мооса соответственно).

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработано два состава фрикционных металлокерамических материалов вагонной тормозной колодки: на основе меди МЗ (мас. %: 40 Cu, 15 С, 2 Al₂O₃, 1 SiO₂, 1 Cr) и железа Ж6 (мас. %: 10 Cu, 15 С, 3,3 Al₂O₃, 1,7 SiO₂, 1 Cr). Материал Ж6 имеет значительно более высокую износостойкость, чем чугун и ТИИР-300 – стандартные материалы вагонных тормозных колодок, применяемых в России (в 4,5 и 2,8 раз соответственно), превосходит по износостойкости зарубежный аналог МКМ (70 % Cu) на 18 % при более низкой себестоимости. При этом Ж6 обладает более высоким коэффициентом трения и, по сравнению с чугуном, МЗ и МКМ, оказывает щадящее воздействие на контртело и лучшую теплопроводность по сравнению с полимерным композитом ТИИР-300.

2. На основе исследований влияния структуры металлокерамического порошкового материала на его фрикционные свойства, определены основные технологические параметры изготовления нового фрикционного материала вагонной тормозной колодки.

3. Разработана конструкция тормозной колодки, изготавливаемой из нового фрикционного материала.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика проектирования металлокерамического фрикционного материала вагонной тормозной колодки.

2. Обоснованные закономерности, описывающие влияние содержания компонентов матрицы (меди, углерода, хрома, железа) и фрикционного наполнителя (оксидов алюминия и кремния) на структуру и, как следствие, свойства порошкового материала в условиях моделируемого фрикционного взаимодействия «тормозная колодка – колесо».

3. Обоснованные закономерности влияния технологии получения металлокерамического порошкового материала на его структуру и фрикционные свойства.

Достоверность полученных результатов подтверждается обоснованностью методов, использованных при разработке нового фрикционного материала, проверкой разработанных экспериментальных методик с помощью классических исследований, а также комплексным характером проведенных испытаний.

Апробация работы.

Работа выполнена в рамках НИОКР, осуществляемой ООО «НТЦ Информационные Технологии» в сотрудничестве с ОАО «ВНИИЖТ». Основные положения диссертационной работы обсуждались и получили положительную оценку на 41-й научно-технической конференции аспирантов и студентов (г. Комсомольск-на-Амуре, 2011); российско-китайском симпозиуме «Современные материалы и технологии» (г. Хабаровск, 2011); III Всероссийском конкурсе молодых ученых (г. Миасс, 2011); Международной заочной научно-практической конференции «Проблемы науки, техники и образования в современном мире» (г. Липецк, 2012); Международной заочной научно-практической конференции «Современная наука: реальность и перспективы» (г. Липецк, 2013); Школе-семинаре по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий (Комсомольск-на-Амуре, 21-22 июня 2013 г.)

Публикации. По теме работы опубликовано 10 работ, в т.ч. 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено 6 патентов РФ.

Личный вклад автора состоит в анализе состояния вопроса, разработке методик экспериментов, их планировании и проведении, обработке и обсуждении полученных результатов, написании статей, подготовке докладов. Часть экспериментальных данных получена при участии сотрудников ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТиГ ДВО РАН, Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН, ФГБОУ ВПО «Дальневосточный университет путей сообщения» (г. Хабаровск) и ООО «НТЦ Информационные Технологии».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 115 наименований. Объем диссертации составляет 159 страниц, включая 31 таблицу и 58 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены общие сведения о системе «тормозная колодка – колесо», описаны состав, структура, свойства материалов и особенности взаимодействия элементов системы «тормозная колодка – колесо», выявлены направления разработки новых фрикционных материалов вагонной тормозной колодки, а также приведены общие сведения о металлокерамических фрикционных материалах.

Изменения условий эксплуатации системы «тормозная колодка – колесо», связанные с возрастанием нагрузок на ось вагона и скоростей движения составов, требуют разработки нового фрикционного материала тормозной колодки, обеспечивающего эффективное торможение, обладающего высокой износостойкостью и, вместе с тем, оказывающего щадящее воздействие на колесо вагона.

На современном подвижном составе применяются два вида тормозных колодок: чугунные (в основном, на пассажирских вагонах) и полимерные композиционные из асбестосодержащих материалов ТИИР-300, ТИИР-303 и безасбестового ТИИР-308 (в основном, на грузовых вагонах). Помимо чугунных и полимерных колодок, существуют металлокерамические тормозные колодки на медной основе (до 70 % меди), разработанные и применяемые за рубежом (например, колодки из материала «Диафрикт», Чехия).

Вопросы взаимодействия элементов системы «тормозная колодка – колесо» рассмотрены в работах Вуколова Л.А, Асташкевича Б.М., Воронина И.Н., Лужнова Ю.М., Шура Е.А., Богданова В.М., Захарова С.М., Маркова Д. П. и др. авторов. На основе анализа этих работ выявлены основные достоинства и недостатки фрикционных материалов тормозных колодок, применяемых в настоящее время. Так, основными недостатками чугунных колодок являются невозможность их применения на скоростях свыше 120 км/ч и низкая износостойкость; недостатком полимерных колодок является их низкая теплопроводность, ведущая к термомеханическим повреждениям колес; металлокерамические зарубежные колодки имеют высокую стоимость и обеспечивают до 30 % больший износ колес (по прокату) по сравнению с чугунными колодками.

Анализ уже созданных фрикционных металлокерамических материалов показал, что большая часть таких материалов на железной основе содержит экологически опасные, вредные (асбест, свинец, сурьма, висмут, кобальт), либо дорогостоящие компоненты, например, дисульфид молибдена. Материалы на медной основе, в большинстве своем, содержат не менее 50 % дорогостоящей меди. Поэтому разработка нового эффективного фрикционного материала тормозной колодки, лишённого указанных недостатков, является актуальной задачей.

Во второй главе изложены использованные в работе методики оценки структуры и эксплуатационных свойств материалов, а также статистические методы обработки результатов экспериментальных исследований

Оценка свойств исследуемых материалов осуществлялась на образцах, изготовленных методом порошковой металлургии. Для изготовления образцов использованы порошки: железа АВС 100.30 (от Höganäs); меди ПМС-1 ГОСТ 4960-2009; графита ГК-3 ГОСТ 4404-78; хрома ПХ1м ТУ 1479-022-4355-6328-2010; оксида алюминия #110 (от Saint Gobain) с размером частиц 15–45 мкм; глинозема Г-00 ГОСТ 30558-98 (основной компонент – оксид алюминия); кварца пылевидного 9077-82 (основной компонент – оксид кремния); а также стеарат цинка ТУ 2432-062-56856807-06 в качестве пластификатора. Глинозем Г-00 и кварц пылевидный просеяны через сито с ячейкой 50 мкм. Удельное давление прессования всех образцов составляло 7 т/см². Спекание осуществлялось в атмосфере азота при температуре 1140°С для образцов на железной основе, 900°С для образцов на медной основе. После спекания осуществлялось фрезерование образцов (Ra 12,5) для формирования поверхности трения.

Для оценки фрикционных свойств (износостойкости и коэффициента трения) получаемых материалов проводились фрикционные испытания по схеме «диск – колодка» на машине для испытаний на трение и износ ИИ5018. В ходе испытаний образец прижимался к поверхности контртела, моделирующего вагонное колесо, с усилием 50 Н, что создавало на поверхности трения образца давление 70 Н/см², соответствующее рабочему давлению на реальную тормозную колодку. В качестве контртела использовался диск из стали 55 диаметром 180 мм, толщиной 15 мм, аналогичной по химическому и фазовому составу стали вагонного колеса по ГОСТ 10791-2004, и подвергнутой термообработке до твердости 255 НВ. Каждое испытание представляло собой торможение по заданной программе, в ходе которого линейная скорость на поверхности контртела уменьшалась с 70 до ~ 0 км/ч в течение ~1 мин, что имитирует торможение реальной колодки. Фрикционные свойства образца в рамках одного испытания оценивались средним значением коэффициента трения f_{cp} за время испытания (~1 мин).

Помимо коэффициента трения в каждом испытании для оценки износостойкости материала определялся объемный износ образца – параметр, позволяющий корректно сравнивать износ материалов с различной плотностью:

$$I_{об} = \frac{1000 * (m_n - m_k)}{\rho}, \quad (1)$$

где $I_{об}$ – объемный износ, 10⁻³ см³; m_n – масса образца до испытания, г; m_k – масса образца после испытания, г; ρ – плотность образца, г/см³.

Для оценки воздействия разработанных фрикционных материалов на контртело проведены многократные фрикционные испытания. Оценка износостойкости контртела осуществляется по изменению диаметра отпечатка (лунки), нанесенной с помощью индентора твердомера, на поверхность катания контртела, до и после цикла испытаний. По изменению диаметра лунки рассчитывается толщина изношенного слоя поверхности контртела.

Металлографические исследования микроструктуры образцов осуществлялись с помощью оптического микроскопа МЕТАМ-РВ-21-2, с применением методов компьютерной металлографии посредством программного обеспечения ImageExpert Pro 3; растровая электронная микроскопия (РЭМ) осуществлена посредством сканирующего электронного микроскопа SEM S-3400N от Hitachi, оснащенного приставкой энергодисперсионного анализа EDX Thermo. Микротвердость элементов структуры материалов измерялась с помощью микротвердомера Micromet 5101 от Buehler пирамидой Виккерса.

В третьей главе изложены общие требования к «идеальному» фрикционному материалу вагонной тормозной колодки, сформулированные на основе анализа работ Вуколова Л.А, Асташкевича Б.М., Воронина И.Н. и др., а также на основе собственных исследований разрушения поверхностного слоя элементов системы «тормозная колодка – колесо – рельс». На основе иерархического подхода предложен способ разработки нового металлокерамического материала для изготовления тормозной колодки, сущность которого заключается в том, что на первом этапе исследуется влияние отдельных компонентов порошкового материала на его структуру и свойства, определяются диапазоны рационального содержания компонентов, а разработка многокомпонентного металлокерамического фрикционного материала осуществляется на основе полученных диапазонов содержания. Показана возможность применения данного способа для проектирования материала, состоящего из меди, углерода, железа, хрома и оксидов алюминия и кремния, ввиду отсутствия сложных химических взаимодействий между медью и углеродом, медью и железом, а также меди, углерода, железа и хрома с фрикционным наполнителем – оксидами алюминия и кремния.

В четвертой главе изложены результаты исследований влияния материалов для создания матрицы порошкового материала на его структуру и фрикционные свойства.

Для создания матрицы фрикционного металлокерамического материала использованы следующие материалы: железо (обеспечивает прочность и теплопроводность материала); медь (оказывает влияние на уплотнение и упрочнение материала, активизирует процессы спекания, при высоком содержании повышает коэффициент трения); углерод (в связанном виде обеспечивает образование цементита, необходимого для упрочнения и повышения износостойкости матрицы; твердые частицы цементита вносят вклад в деформационную составляющую коэффициента трения; в свободном виде углерод создает защитную пленку, защищающую контртело от схватывания); хром (легирующий компонент, обеспечивающий рост износостойкости и теплостойкости железной матрицы фрикционного материала).

Влияние меди на структуру порошкового материала «железо – медь» и его фрикционные свойства

На рис. 1 представлены зависимости фрикционных свойств порошковых материалов системы "железо-медь" от процентного содержания меди.

Видно, что зависимость объемного износа материалов «железо – медь» от содержания меди имеет немонотонный характер с минимумом в диапазоне 30 – 40 % содержания меди. При этом коэффициент трения материалов с ростом содержания меди монотонно возрастает, начиная с содержания 40 % (рис. 1, б).

В результате проведенных металлографических исследований в поверхностном слое образцов выявлена вторичная структура, названная серым слоем. Под серым слоем обнаружены зона наклепа с выраженной пластической деформацией слоев меди и железа, а также мезослой (рис. 2). Мезослойом названа зона поверхностного слоя, в которой степень деформации элементов структуры значительно меньше, чем в зоне наклепа, но, тем не менее, имеются отличия от структуры основного материала: зерна неравноосны и вытянуты в направлении поверхности трения.

РЭМ –исследования, а также энергодисперсионный анализ показывают, что серый слой представляет собой совокупность слоев железа и меди, параллельных поверхности трения, толщиной 0,2 – 2,5 мкм (рис. 3, а), причем в области, максимально приближенной к поверхности трения, слои не различимы, что свидетельствует о еще большем измельчении структуры в этой зоне (рис. 3, б).

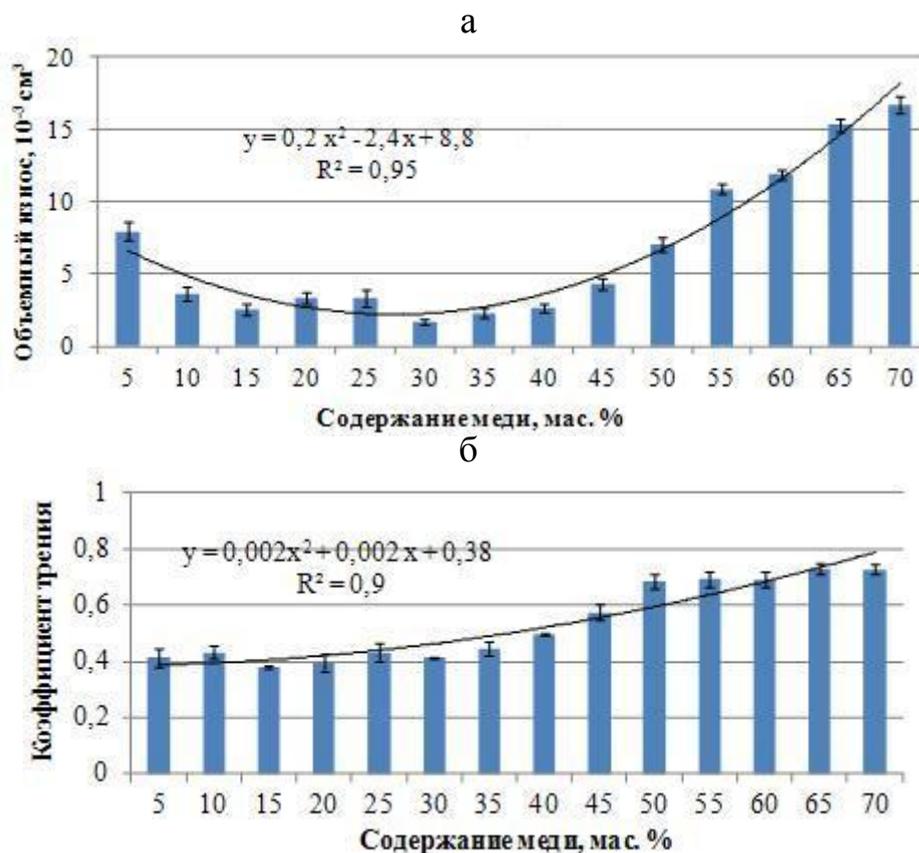


Рис. 1. Зависимости фрикционных свойств порошковых материалов «железо – медь» от содержания меди:
а – объемный износ; б – коэффициент трения

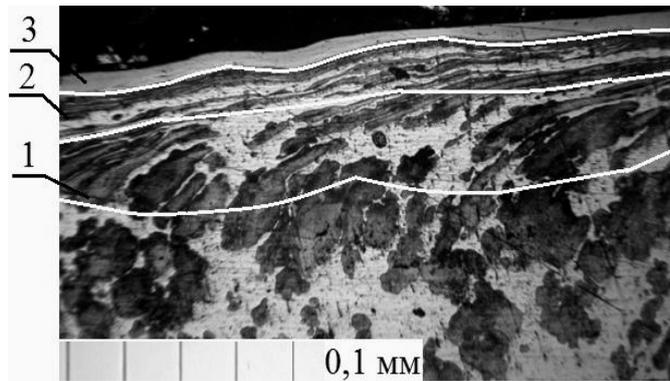


Рис. 2. Структура поверхностного слоя образцов «железо – медь» после фрикционных испытаний: 1 – мезослой; 2 – зона наклепа; 3 – серый слой

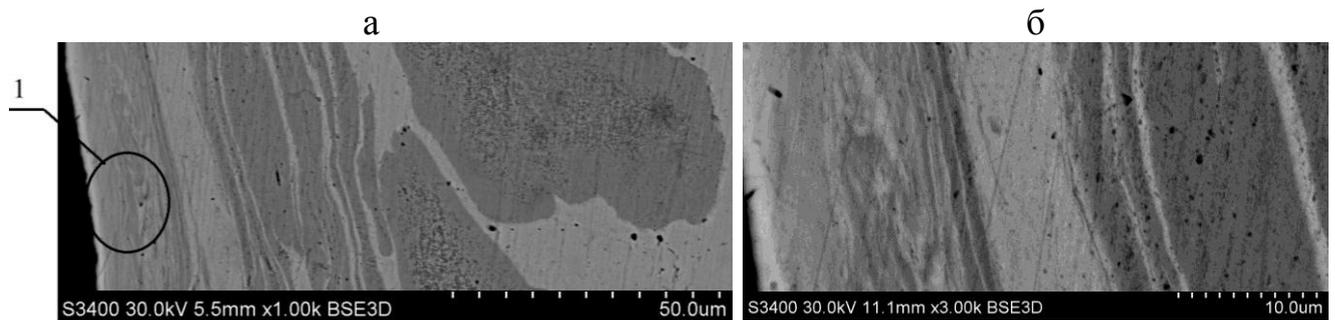


Рис. 3. Микроструктура серого слоя: а – РЭМ-фотография микроструктуры; б – РЭМ-фотография участка 1

С помощью статистической обработки экспериментальных данных установлена связь толщины серого слоя образцов материалов «железо – медь», подвергнутых фрикционным испытаниям, с их объемным износом и коэффициентом трения. При малом содержании меди (5 %, рис. 4, а) серый слой на поверхности трения практически отсутствует, и объемный износ относительно велик: вследствие сродства железной матрицы образца и стали контртела в зоне трения происходит схватывание. Однако под действием нагрузки и температуры в процессе фрикционного взаимодействия в поверхностном слое образуется наклеп с повышенной микротвердостью (440 – 500 HV 0,01 при микротвердости феррита 220 – 250 HV 0,01 и включений меди 150 – 160 HV 0,01), что снижает адгезионную составляющую силы трения. Поэтому коэффициент трения при взаимодействии со стальным контртелом относительно низок (~0,4), что близко к справочным данным при трении пары «сталь – железо».

С ростом содержания меди (до ~ 40 %, рис. 4, б) на поверхности трения интенсифицируется образование вторичной структуры – серого слоя, в котором слои твердого раствора железа и меди, вытягиваются параллельно поверхности трения под действием нагрузки и температуры в зоне трения. Благодаря дисперсности структуры (толщина слоев менее 2,5 мкм), серый слой является своеобразным «буфером», принимающим на себя воздействие контртела при трении, защищая поверхность образца от износа. При относительно малом содержании меди (до ~ 20 %) участки серого слоя невелики по площади (до 20 % длины поверхности трения в поле зрения микроскопа), и не могут в полной мере реализовать защитную функцию, тем не менее, с ростом концентрации меди (5–20 %) объемный износ снижается. При содержании 30–40 % меди толщина серого слоя и площадь покрываемых им участков становятся опти-

мальными (для данных условий трения), занимают практически 100 % длины поверхности трения в поле зрения микроскопа), благодаря чему достигается минимум износа образцов (рис. 1, а). Также с увеличением содержания меди, в сером слое происходит рост количества медных кластеров, что обеспечивает увеличение коэффициента трения (рис. 1, б). Однако с ростом содержания меди микротвердость этого слоя снижается с 500 HV 0,01 при 20 % меди до 370 HV 0,01 при 40 %.

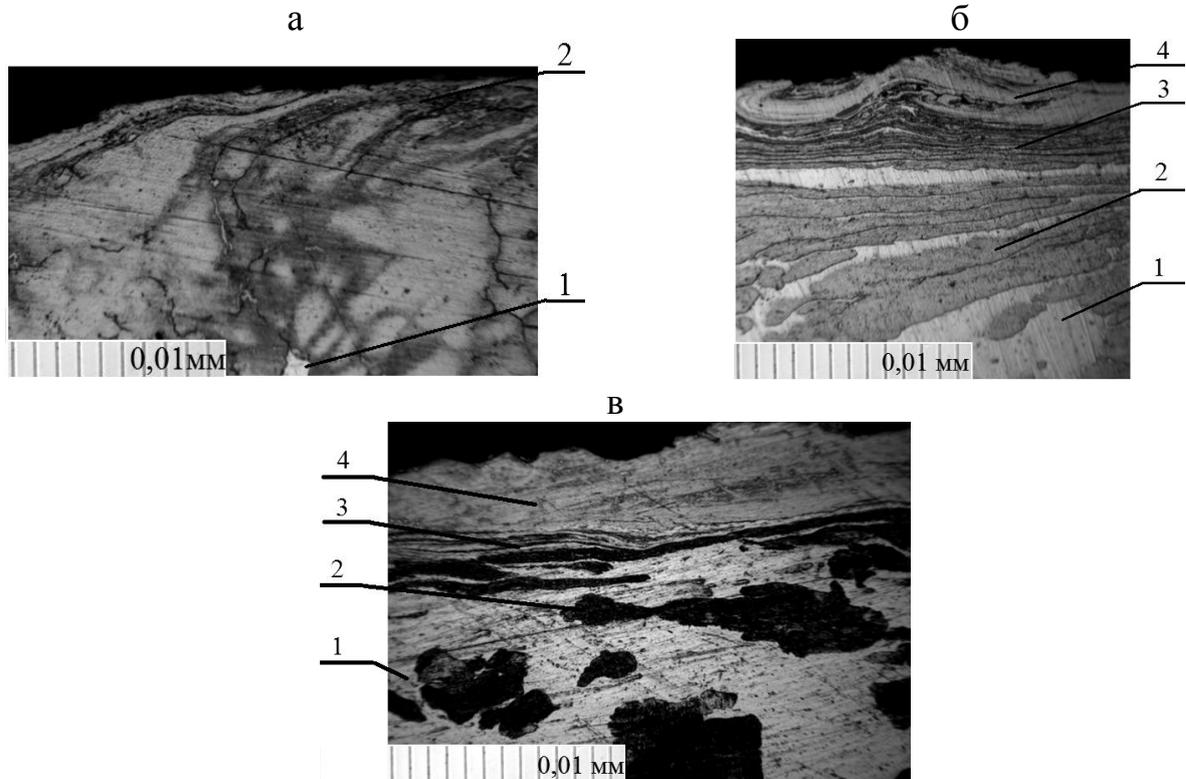


Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя порошкового материала «железо – медь» после фрикционных испытаний при содержании меди, %:
 а – 5 (1 – включения меди; 2 – наклеп); б – 40 (1 – медь; 2 – деформированные зерна железа в мезослое; 3 – наклеп; 4 – серый слой); в – 70 (1 – медь; 2 – деформированные зерна железа в мезослое; 3 – наклеп; 4 – серый слой)

При увеличении содержания меди свыше 40 % (рис. 4, в) ее влияние в сером слое становится преобладающим. Микротвердость серого слоя снижается (с 370 HV 0,01 при 40 % меди до 210 HV 0,01 при 70 % меди), а пластичность, обусловленная увеличившимся содержанием меди, возрастает, что ведет к более глубокому проникновению деформирующего воздействия при трении в поверхность материала, увеличивая толщину серого слоя. Благодаря эффективному схватыванию с поверхностью контртела, медные слои обеспечивают высокий коэффициент трения (свыше 0,7, см. рис. 1, б). Однако более низкая твердость серого слоя, активное схватывание медной составляющей с поверхностью контртела ведут к повышенному износу фрикционного материала (рис. 1, а).

Влияние углерода на структуру порошкового материала «железо – углерод» и его фрикционные свойства

На рис. 5 показаны зависимости фрикционных свойств порошковых материалов «железо – углерод» от концентрации углерода. Металлографические исследования показывают, что при содержании до 2,5 % углерода поверхностный слой состоит из

зоны наклепа, в которой присутствуют слои, вытянутые вдоль поверхности трения, и мезослой, состоящего из деформированных зерен, вытянутых в направлении вектора силы трения (рис. 6, а). Наблюдается статистически значимая связь средней глубины мезослоя и общей глубины измененного слоя (наклеп + мезослой) с объемным износом и коэффициентом трения (коэффициенты корреляции 0,82, 0,91 соответственно).

С ростом содержания углерода от 0 до 2,5 % твердость и прочность как основного материала, так и наклепанного слоя возрастают: микротвердость основного материала увеличивается с 210 до 300 HV 0,01; предел прочности при сжатии – с 480 до 545 МПа; микротвердость наклепанного слоя – с 304 до 400 HV 0,01 соответственно. Это объясняется структурными превращениями при спекании порошковых материалов «железо – углерод». Если при содержании углерода 0 % структура порошкового материала представляет собой феррит с относительно небольшой микротвердостью (200–210 HV 0,01), то с ростом содержания углерода в микроструктуре увеличивается доля перлита. При 2,5 % углерода, как было показано выше, структура содержит 100 % перлита и поры со свободным графитом.

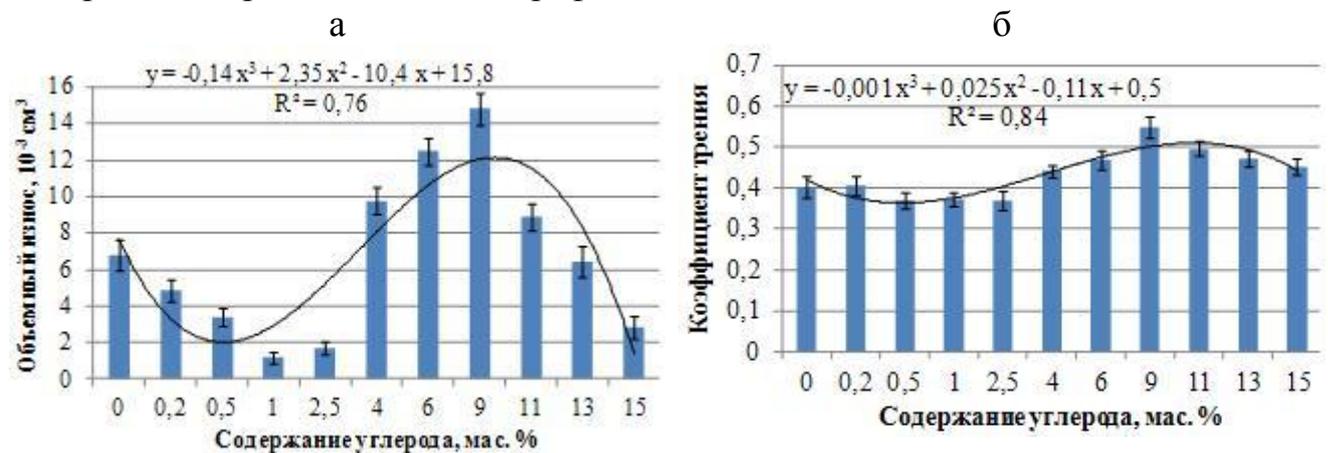


Рис. 5. Зависимости фрикционных свойств порошковых материалов «железо – углерод» от содержания углерода:
а – объемный износ; б – коэффициент трения

Рост твердости наклепанного слоя ведет к небольшому снижению коэффициента трения с достижением стабильного значения при содержании углерода 1 – 2,5 %, что согласуется с теорией И.В. Крагельского, согласно которой адгезионная и деформационная составляющие коэффициента трения обратно пропорциональны твердости взаимодействующих поверхностей. При этом повышение микротвердости зоны наклепа с увеличением концентрации углерода способствует, во-первых, росту износостойкости поверхностного слоя, что снижает объемный износ образцов, во-вторых, препятствует проникновению деформирующего воздействия (в условиях нагружения и нагрева при трении) вглубь микроструктуры, что объясняет уменьшение толщины измененного поверхностного слоя с ростом концентрации углерода.

С ростом содержания углерода (4–9 %) в структуре поверхностного слоя (рис. 6, б) не наблюдаются зоны наклепа и мезослоя, но возрастает содержание свободного цементита, имеющего вид сетки по границам зерен и отдельных включений с микротвердостью до 1600 HV 0,01, то есть материал имеет структуру заэвтектоидной стали. Микротвердость перлита в поверхностном слое увеличивается до 450 HV 0,01. Образец с содержанием углерода 4 % занимает промежуточное положение: несмотря на

структуру, близкую к заэвтектоидной стали, в поверхностном слое этого образца имеется слабо выраженный наклеп, как и у материалов с содержанием углерода до 2,5 %. Микроструктура образцов с содержанием углерода 11–15 % представляет собой совокупность участков заэвтектоидной стали, доэвтектического чугуна и свободного углерода. В поверхностном слое этих образцов не образуются наклеп и мезослой, подобно образцам с 4–9 % углерода (рис. 6, в).

Износостойкость материалов «железо – углерод» при содержании углерода 4–9 % складывается из двух составляющих: износостойкости перлитной матрицы и общей прочности материала, на которую отрицательно влияет наличие пор, играющих роль концентраторов напряжения. Разрушение поверхностного слоя при трении таких образцов происходит в результате выкрашивания твердых частиц структурно свободного цементита (при 4 % углерода незначительное влияние оказывает наклеп в поверхностном слое образца). Наличие твердых частиц в зоне трения увеличивает деформационную составляющую коэффициента трения, что вызывает его рост. С увеличением концентрации углерода снижается общая прочность порошкового материала за счет увеличения пористости и ослабления связей между участками металлической матрицы. Это ведет к росту объемного износа материала, а с ростом объемного износа увеличивается количество частиц (продуктов износа) в зоне трения, играющих роль абразива, что также положительно сказывается на деформационной составляющей силы трения. Так объясняется увеличение объемного износа и коэффициента трения в диапазоне 4–9 % углерода.

В образцах с содержанием углерода 11–15 % механизм разрушения поверхностного слоя, несмотря на наличие в структуре участков доэвтектического чугуна, сходен с механизмом разрушения поверхностного слоя образцов, содержащих 4–9 % углерода (рис. 6, в), т.е. происходит выкрашивание поверхностного слоя по участкам цементита.

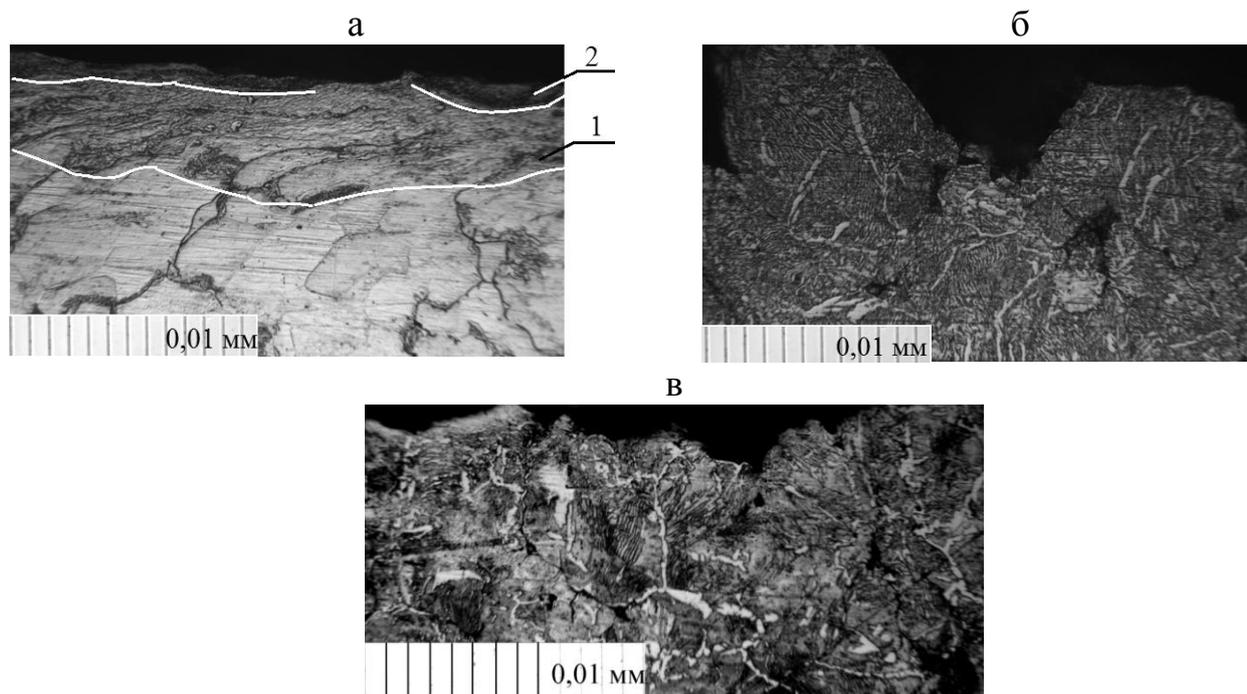


Рис. 6. Характерная структура поверхностного слоя порошковых материалов «железо – углерод» после фрикционных испытаний при содержании углерода:
а – до 2,5 % (1 – мезослой; 2 – наклеп); б – свыше 4 %; в – свыше 9 %

Однако, при увеличении общего содержания углерода до 11–15 % количество свободного углерода в порошковом материале увеличивается до 8–12 % (оценка выполнена с помощью приставки энергодисперсионного анализа EDX Thermo на шлифах порошковых материалов с различным содержанием углерода). Выходя из пор на поверхность, углерод начинает играть роль смазки, что несколько снижает коэффициент трения (например, разница между коэффициентом трения материалов при содержании углерода 9 и 15 % составляет 18 %). Образование графитовой пленки на поверхности контртела ведет к снижению износа порошкового материала. Кроме того, изнашивание материала при содержании углерода свыше 9 % происходит не столько по металлической матрице, сколько по слоям графита, который составляет более 60 % площади шлифа (при общем массовом содержании углерода 15 % соотношение его объема с объемом железа составляет ~ 6:1). Вследствие значительно меньшей плотности графита по сравнению с железом (2,2 против 7,8 г/см³), массовый износ за испытание снижается, и, соответственно, снижается объемный износ порошковых материалов с содержанием углерода свыше 9 %.

Влияние углерода и хрома на структуру порошкового материала «железо – углерод – хром» и его фрикционные свойства

На рис. 7 показаны зависимости фрикционных свойства порошковых материалов «железо – хром» от концентрации хрома. Легирование железоуглеродистой матрицы хромом приводит к значительному росту износостойкости по сравнению с материалом, в котором концентрация хрома равна 0 (например, в материале с содержанием углерода 4 %, до 5,4 раз). При этом, износостойкость материалов, содержащих 0,5–2 % хрома различается незначительно. В основном, различия наблюдаются при содержании хрома 0,5–1 %: например, максимальная разница объемного износа материала с содержанием хрома 0,5 % по сравнению с материалом, в котором содержится 1 % хрома, составляет 2,1 раза (при концентрации углерода 15 %). При больших концентрациях хрома разница в износостойкости не превышает 15 %. Легирование матрицы хромом также ведет к росту фрикционных характеристик порошковых материалов «железо – углерод – хром», причем наибольшие значения коэффициента трения достигаются при содержании хрома свыше 0,5 % (хотя разница в коэффициенте трения с материалами, в которых концентрация хрома равна 0,5 %, невелика: 7–9 %).

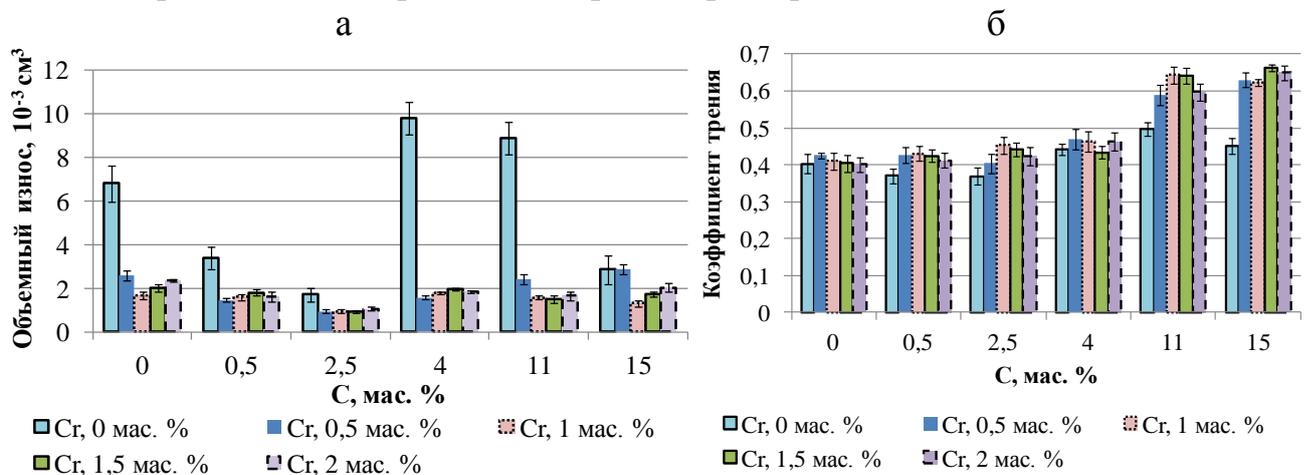


Рис. 7. Зависимости фрикционных свойств порошковых материалов «железо – углерод – хром» от содержания хрома:

а – объемный износ; б – коэффициент трения

Исследование основной структуры порошковых материалов «железо – углерод – хром» показывает, что при вводе в порошковый материал хрома по границам зерен образуется карбидная сетка. При концентрации хрома свыше 0,5 % карбидная сетка значительно более выражена, чем при 0,5 %, однако различия в ее плотности при содержании хрома 1–2 % практически отсутствуют, что объясняет отсутствие выраженной разницы в износостойкости и фрикционных свойствах в диапазоне 1–2 % хрома. Наличие твердых частиц цементита и карбидов хрома, образующих каркас по границам зерен, ведет к росту износостойкости (вследствие упрочнения матрицы материала) и коэффициента трения (вследствие роста деформационной составляющей силы трения).

В пятой главе изложены результаты исследований влияния фрикционного наполнителя на структуру и фрикционные свойства материала. Результаты испытаний порошковых материалов «железо – оксид алюминия» показаны на рис. 8, материалов «железо – оксид кремния» – на рис. 10.

Помимо сформированных в процессе фрикционного взаимодействия наклепа и мезослоя, в поверхностном слое исследуемых материалов присутствует износостойкая фаза – частицы оксида алюминия с микротвердостью свыше 1700 HV 0,01. При малом содержании (1 %) оксида алюминия в виде оксида #110 износостойкость материала определяется, в основном, износостойкостью феррита. С дальнейшим увеличением содержания этой износостойкой фазы происходит снижение объемного износа, минимум которого достигается при концентрации 7 %. Однако, если содержание оксида #110 продолжает увеличиваться, его частицы, располагаясь по границам зерен, начинают играть роль концентраторов напряжения, способствуя выкрашиванию поверхностного слоя (рис. 9), что ведет к увеличению объемного износа образца. Коэффициент трения при использовании оксида алюминия и глинозема Г-00 практически не зависит от концентрации наполнителя (в исследуемом диапазоне) и составляет 0,4–0,41. Учитывая, что коэффициент трения ферритной матрицы несколько ниже (0,36–0,38), очевидно, что коэффициент трения порошкового материала «железо – оксид алюминия» определяется свойствами собственно частиц наполнителя.

Характер зависимости объемного износа от концентрации наполнителя в материалах с глиноземом Г-00 близок к характеру этой зависимости для материалов с оксидом #110. Однако при использовании Г-00 значительно уменьшается максимально допустимая концентрация наполнителя. Для Г-00 эта концентрация составляет 5 %, для оксида #110 – 11 %. Это объясняется различной дисперсностью частиц Г-00 и оксида #110 (средний диаметр частиц Г-00 – 24 мкм, оксида #110 – 17 мкм).

Характер зависимости объемного износа и коэффициента трения порошковых материалов от содержания оксида кремния (рис. 10) объясняется теми же особенностями структуры их поверхностного слоя, что и у материалов «железо – оксид алюминия». Однако материалы «железо – оксид кремния» обладают большими значениями объемного износа и коэффициента трения. Разница в коэффициентах трения материалов с различными фрикционными наполнителями объясняется различными фрикционными свойствами оксидов алюминия и кремния, обусловленными как химическим составом, так и кристаллическим строением этих веществ. В первом приближении объяснить различие в коэффициентах трения можно на основе теории трения

И.В. Крагельского, согласно которой адгезионная и деформационная составляющие коэффициента трения обратно пропорциональны твердости взаимодействующих тел: твердость оксида алюминия по шкале Мооса составляет 9 единиц, оксида кремния – 7.

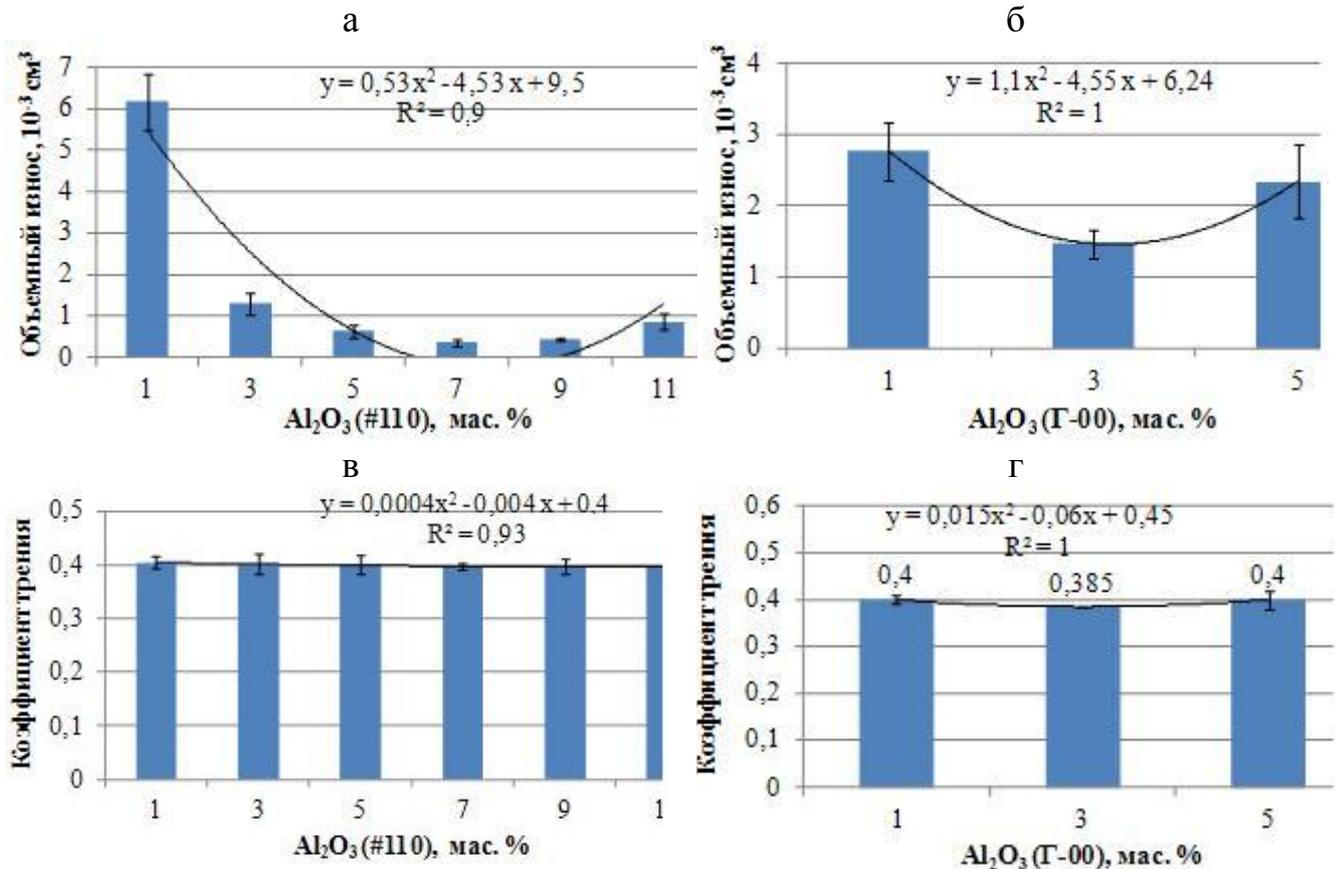


Рис. 8. Зависимости фрикционных свойств порошковых материалов «железо – оксид алюминия» от концентрации оксида алюминия:
а – объемный износ материалов с оксидом #110; б – объемный износ материалов с глиноземом Г-00; в – коэффициент трения материалов с оксидом #110; г – коэффициент трения материалов с глиноземом Г-00

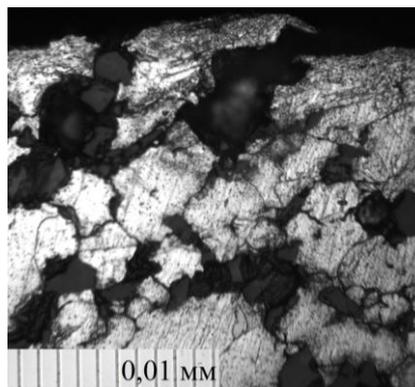


Рис. 9. Поверхностный слой порошкового материала с содержанием оксида алюминия #110 11 % после фрикционного взаимодействия

Большой объемный износ образцов с оксидом кремния объясняется, во-первых, наличием в поверхностном слое менее износостойких частиц (по сравнению с оксидом алюминия); во-вторых, большей дисперсностью кварца пылевидного (средний диаметр частиц 3,8 мкм), который, даже в небольшой концентрации (1–3 %), распределяясь в поверхностном слое по границам зерен, способствует его разрушению.

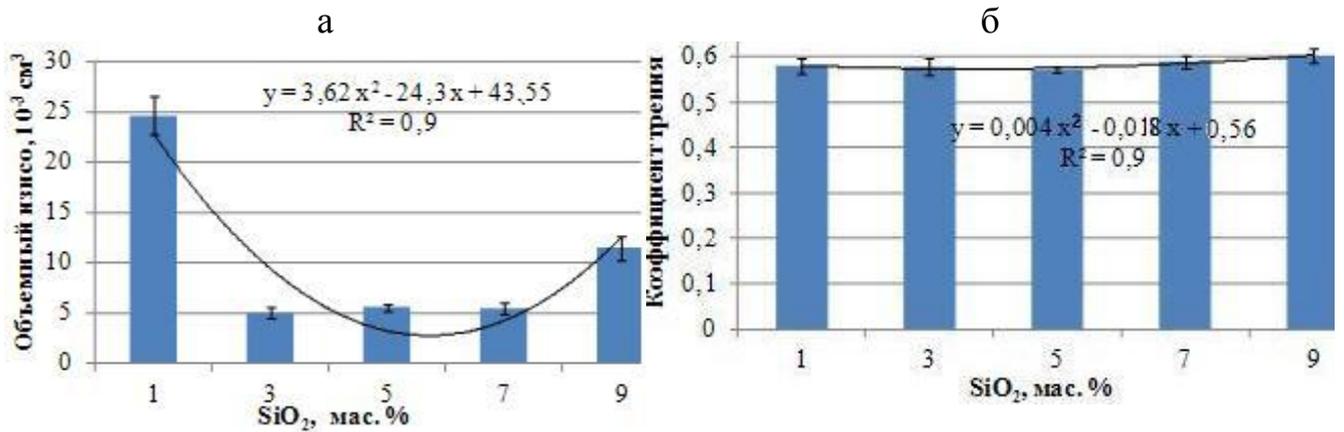


Рис. 10. Зависимости фрикционных свойств порошковых материалов «железо – оксид кремния» от содержания оксида кремния:

а – объемный износ; б – коэффициент трения

Фрикционный материал вагонной тормозной колодки должен сочетать высокую износостойкость и коэффициент трения. Поэтому целесообразно в качестве фрикционного наполнителя использовать смесь оксида алюминия (#110 от Saint Gobain), обеспечивающего износостойкость материала, и оксида кремния, повышающего коэффициент трения. Износостойкость образцов с оксидом алюминия значительно выше износостойкости образцов с оксидом кремния, поэтому принято соотношение этих компонентов 2:1 соответственно.

В шестой главе описана разработка металлокерамического фрикционного материала на основе зависимостей, установленных в главах 4, 5, а также оптимизация технологии его изготовления. Исследования, описанные в главах 4, 5, позволили определить диапазоны оптимального содержания компонентов фрикционного материала: медь 10 – 40 %; углерод 1 – 2,5 % (высокая износостойкость) либо 13 – 15 % (сочетание износостойкости и высокого коэффициента трения); хром 1 – 1,5 %; фрикционный наполнитель 3 – 5 % (смесь оксида алюминия и кварца пылевидного в пропорции 2:1). План разработки фрикционного материала показан в табл. 1, результаты фрикционных испытаний образцов показаны на рис. 11.

Таблица 1

План разработки металлокерамического фрикционного материала вагонной тормозной колодки

Вариант	Cu, мас. %	C, мас. %	Al ₂ O ₃ , мас. %	SiO ₂ , мас. %	Cr, мас. %	Fe, мас. %	
Образцы на медной основе							
М1	40	2,5	2	1	1	остальное	
М2	40	13	2	1	1		
М3	40	15	2	1	1		
Образцы на железной основе							
Ж1	10	2,5	2	1	1		
Ж2	10	2,5	3,3	1,7	1		
Ж3	10	13	2	1	1		
Ж4	10	13	3,3	1,7	1		
Ж5	10	15	2	1	1		
Ж6	10	15	3,3	1,7	1		

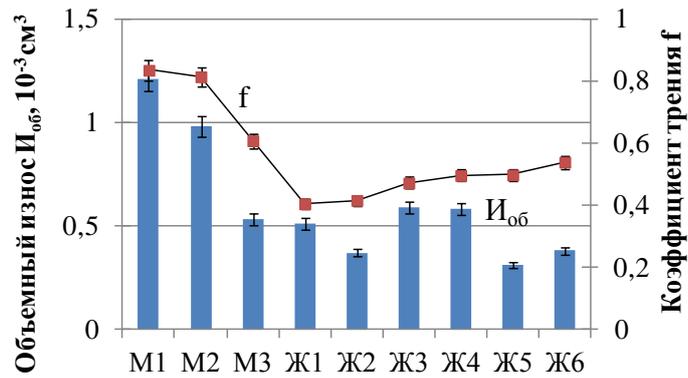


Рис. 11. Результаты фрикционных испытаний образцов разрабатываемого фрикционного материала

Исходя из необходимости сочетания в материале тормозной колодки высоких износостойкости и коэффициента трения, для дальнейших испытаний отобраны образцы М3 и Ж6. Свойства этих образцов сравнивались с материалами тормозных колодок, применяемых на современных вагонах: чугуном по ОСТ 32.194-2002, полимерным композиционным материалом ТИИР-300 – и зарубежным металлокерамическим материалом на медной основе (МКМ), содержащим 70 % меди. Результаты фрикционных испытаний показаны на рис. 12.

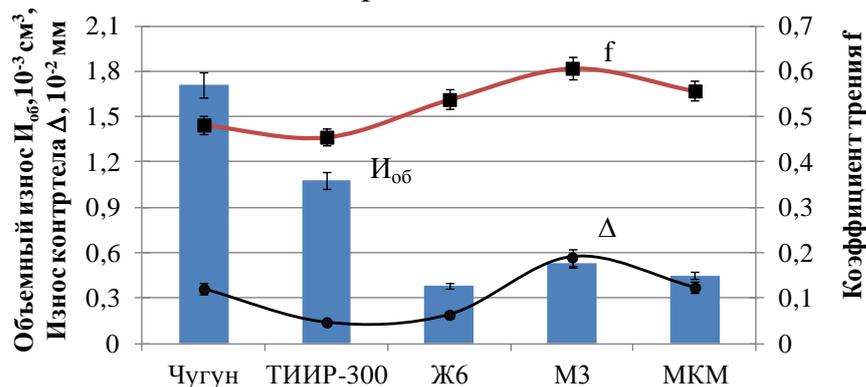


Рис. 12. Результаты фрикционных испытаний образцов отобранных фрикционных материалов и применяемых аналогов

Материал Ж6 (на железной основе) имеет значительно более высокую износостойкость, чем чугун и ТИИР-300 – стандартные материалы тормозных колодок, применяемых в России (4,5 и 2,8 раза соответственно), он превосходит по износостойкости материал М3 на 45 % и зарубежный материал МКМ на 18 % (при более низкой себестоимости). При этом Ж6 обладает высоким коэффициентом трения и, по сравнению с чугуном, М3 и МКМ, оказывает щадящее воздействие на контртело (практически такое же, как материал ТИИР-300), при этом, имея в основе железо, он обладает лучшей теплопроводностью, чем ТИИР-300, что снижает вероятность термомеханических повреждений колеса.

Свойства материала Ж6 приведены в табл. 2. Структура Ж6 (рис. 13) аналогична структуре заэвтектоидной стали и содержит перлитную основу с цементитной сеткой по границам зерен, включениями карбидов хрома, меди по границам зерен, а также свободного графита в порах и фрикционного наполнителя. Средний диаметр зерна находится в диапазоне 20 – 50 мкм; микротвердость цементитной сетки – 1250 HV 0,01, основной структуры – 340 HV 0,01.

Свойства материала Ж6 и применяемых аналогов фрикционного материала вагонной тормозной колодки

Материал	Твердость, НВ 5/125	Плотность, г/см ³	Предел прочности на сжатие, МПа	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Ж6	32 – 44	4,7 – 4,8	65	780	13–18
Чугун	190 – 255	6,9 – 7,2	400	560	40–45
ТИИР-300	8 – 12	2,0 – 2,3	25	1280	1,5–1,7

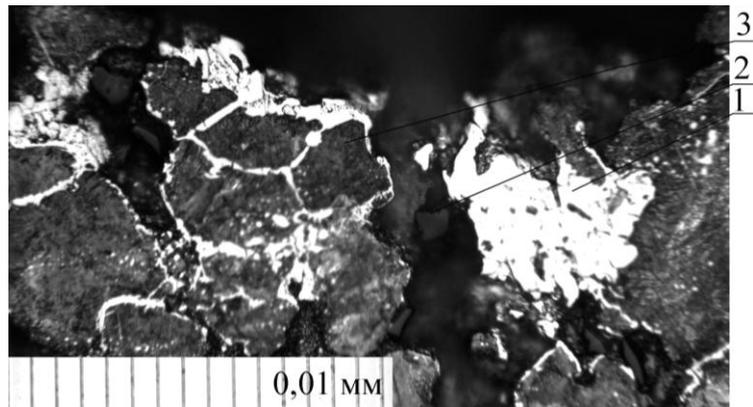


Рис. 13. Поверхность трения образца Ж6 после фрикционного взаимодействия:
1 – карбиды хрома; 2 – фрикционный наполнитель; 3 – перлитная основа

На поверхности трения отсутствуют деформированные слои, т.е. изнашивание происходит путем выкрашивания цементита, взаимодействующих с поверхностью контртела, что обеспечивает деформационную составляющую коэффициента трения (рис. 14). Мелкопластинчатая структура перлита обеспечивает высокую износостойкость матрицы материала. Выходящие на поверхность фрикционного материала включения меди, карбидов хрома и фрикционного наполнителя повышают коэффициент трения. Графит препятствует схватыванию со сталью контртела, обеспечивая колесосберегающий эффект.

Были рассмотрены методы повышения фрикционных свойств материала Ж6 путем оптимизации технологии его изготовления:

1. Изменение температуры спекания (1030 и 1090° С).
2. Отжиг образцов после спекания в течение 80 мин (при температуре 900 и 1030° С).

Результаты фрикционных испытаний образцов, изготовленных с применением описанных методов оптимизации технологии, показаны на рис. 14, из которого следует, что оптимальным способом повышения износостойкости разработанного материала без потерь в коэффициенте трения является спекание при 1090° С. При этом в структуре материала происходит формирование цементитного каркаса по границам зерен, способствующего росту износостойкости.

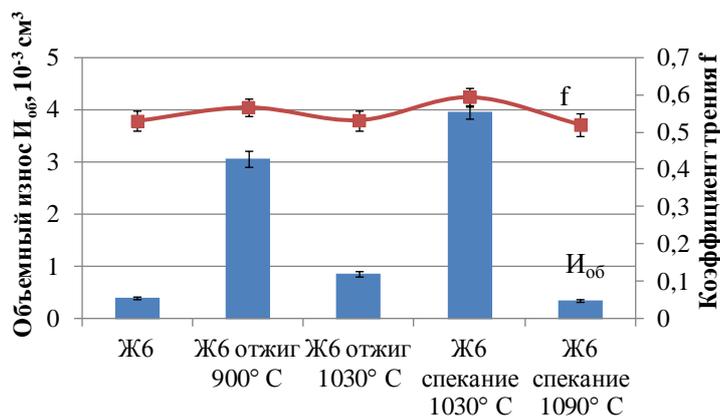


Рис. 14. Результаты фрикционных испытаний порошкового материала, изготовленного по базовой и оптимизационной технологии

После разработки металлокерамического материала вагонной тормозной колодки и оптимизации технологии его получения были проведены стендовые испытания этого материала в сравнении с чугуном и полимерным композитом ТИИР-300 (в ОАО «ВНИИЖТ»). Результаты испытаний показали, что разработанный металлокерамический фрикционный материал значительно опережает чугун по среднему значению коэффициента трения (до 53 % при 90 км/ч), действительному времени торможения (до 5 раз при 90 км/ч) и тормозному пути (до 5,8 раз при 90 км/ч); опережает полимерный композит ТИИР-300 по среднему коэффициенту трения (до 40 % при 50 км/ч), действительному времени торможения (до 30 % при 50 км/ч) и тормозному пути (до 30 % при 50 км/ч). При этом разница в износостойкости в пользу разработанного металлокерамического материала составляет 4,8 раза по сравнению с чугуном, а также 2,2 раза по сравнению с ТИИР-300, что близко к результатам лабораторных испытаний.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В диссертационной работе благодаря подходу проектирования «снизу – вверх», включающему исследование влияния отдельных компонентов на свойства фрикционного материала, разработан металлокерамический композиционный фрикционный материал для вагонной тормозной колодки, износостойкость которого 4,5 раза больше, чем у чугуна вагонной колодки по ОСТ 32.194 – 2002 и в 2,8 раза больше, чем у колодки из полимерного композита ТИИР-300 при сохранении эффективности торможения и щадящем воздействии на колесо.

2. Установлено влияние состава порошковых материалов «железо – медь» на их фрикционные свойства и дано объяснение полученных закономерностей с точки зрения структурной приспособляемости материала. Кривая зависимости объемного износа от концентрации меди в железе имеет минимум в диапазоне 30 – 40 % содержания меди; при этом коэффициент трения с ростом содержания меди остается постоянным (в пределах погрешности) до 40 % меди, а затем монотонно увеличивается. Такой характер зависимостей фрикционных свойств порошковых материалов «железо – медь» от концентрации компонентов объясняется формированием на поверхности трения вторичной структуры – серого слоя, представляющего собой совокупность слоев твердого раствора железа и меди дисперсностью 0,2–2,5 мкм.

3. Установлено и объяснено влияние состава порошковых материалов «железо – углерод» на их фрикционные свойства. Кривые зависимостей объемного износа и коэффициента трения от содержания углерода имеют минимум и максимум в диапазоне 1–2,5 % и 9 % содержания углерода соответственно. Характер зависимости износа и фрикционных свойств от концентрации углерода объясняется изменением структуры основного материала и поверхностного слоя с ростом содержания углерода. При содержании углерода до 1 % материал имеет ферритно-перлитную структуру, которая превращается в перлитную при 2,5 % углерода, при этом поверхностный слой состоит из наклепа и мезослоя, препятствующих износу. При содержании углерода 4–9 % материал имеет структуру заэвтектонидной стали, а поверхностный слой разрушается за счет выкрашивания частиц цементита без образования наклепа и мезослоя, что в совокупности с ростом пористости и снижением прочности связи между участками матрицы обеспечивает как высокий износ, так и коэффициент трения. При содержании углерода 11–15 % структура материала представляет собой сочетание участков заэвтектонидной стали, доэвтектического чугуна и свободного углерода (общее содержание которого по объему по сравнению с железом составляет ~ 6:1 при 15 % углерода по массе). Изнашивание поверхностного слоя этих материалов также представляет собой выкрашивание частиц свободного цементита без образования наклепа и мезослоя. Однако рост содержания свободного углерода до 8–12 %, во-первых, ведет к образованию графитовой пленки, несколько снижающей коэффициент трения, во-вторых, разрушение материала происходит не столько по металлической матрице, сколько по участкам графита, что снижает объемный износ. При этом коэффициент трения уменьшается не более, чем на 18 % при росте содержания углерода с 9 до 15 % вследствие наличия в зоне трения твердых цементитных частиц металлической матрицы.

4. Установлено и объяснено влияние хрома на фрикционные свойства порошковых материалов «железо – углерод – хром». Легирование порошковых материалов «железо – углерод» хромом в количестве 0,5 % ведет к значительному росту износостойкости вследствие упрочнения структуры материалов карбидами хрома. При этом максимальная износостойкость достигается при добавлении 1–2 % хрома благодаря образованию более развитой карбидной сетки (по сравнению с содержанием хрома 0,5 %), и в этом диапазоне практически не зависит от его концентрации, так как количество карбидов по границам зерен не изменяется.

5. Установлено влияние фрикционного наполнителя (оксидов алюминия и кремния) на фрикционные свойства порошкового материала: изменение объемного износа носит немонотонный характер с минимумом при содержании 7 % (для оксида алюминия #110) и 3 % (для глинозема Г-00 и оксида кремния); коэффициент трения не зависит от концентрации фрикционного наполнителя (в рассматриваемых пределах) вследствие превалирующего влияния деформационной составляющей, определяемой действием собственно частиц наполнителя в поверхностном слое порошкового материала, по сравнению с адгезионной составляющей, определяемой ферритной матрицей материала.

6. Немонотонный характер изменения объемного износа при использовании оксидов алюминия и кремния в качестве фрикционного наполнителя объясняется совместным влиянием измененного поверхностного слоя с повышенной микротвердо-

стью, а также износостойкой фазы – частиц наполнителя. С ростом концентрации наполнителя выше оптимального значения содержание его частиц в поверхностном слое увеличивается настолько, что, распределяясь по границам зерен, они играют роль концентраторов напряжения, активизируя процесс разрушения поверхностного слоя, что ведет к усилению объемного износа.

7. Разница в значениях коэффициента трения при использовании наполнителей в виде оксидов алюминия и кремния объясняется различием твердости частиц этих материалов: частицы оксида кремния, имеющие меньшую твердость, реализуют на 45 % больший коэффициент трения по сравнению с частицами оксида алюминия.

8. Разница в износостойкости материалов с различными видами оксида алюминия объясняется разной дисперсностью их частиц: более мелкие частицы оксида алюминия #110 (~17 мкм) обеспечивают лучшую (до 5 раз) износостойкость по сравнению с частицами глинозема Г-00 (~24 мкм). При этом частицы оксида кремния (кварца пылевидного), имеющие значительно меньший диаметр (~4,9 мкм), чем частицы оксида #110 и глинозема Г-00, распределяясь по границам зерен в поверхностном слое, способствуют его разрушению, поэтому износостойкость материалов с этим наполнителем до 10 раз ниже износостойкости материалов с оксидом алюминия. Для достижения оптимального сочетания износостойкости и коэффициента трения необходимо использовать смесь оксидов алюминия и кремния.

9. Исследовано влияние технологии получения металлокерамического фрикционного материала на его структуру и фрикционные свойства: оптимальным режимом является спекание при температуре 1090° С, что обеспечивает формирование цементитного каркаса по границам зерен и не провоцирует выпотевание меди. Применение отжига при 900 и 1030° С нежелательно, т.к. ведет к формированию зернистых включений цементита, способствующих выкрашиванию материала и росту износа.

Основные положения диссертации отображены в публикациях:

Список публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Шакина, А.В. Исследование изнашивания и его предотвращение в системе «тормозная колодка – колесо – рельс» / А.В. Шакина, С.В. Биленко, В.С. Фадеев, О.В. Штанов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Издательство Самарского научного центра РАН. – Том 14 № 4 (5), 2012. – С. 1335 – 1337.

2. Шакина, А.В. Исследование механизмов изнашивания рельсов в криволинейных участках пути на примере Дальневосточной железной дороги / А.В. Шакина, С.В. Биленко, В.С. Фадеев, О.В. Штанов // Фундаментальные исследования, № 4, Ч. 5, 2013, 1296 с. – С. 1103 – 1108

3. Шакина, А.В. Исследования влияния состава и структуры железо-медных порошковых материалов на фрикционные свойства / А.В. Шакина, В.С. Фадеев, О.В. Штанов // Перспективные материалы. – 2014. – № 5. – С. 54–58

4. Шакина, А.В. Исследование влияния углерода и фрикционного наполнителя на свойства порошкового фрикционного материала / А.В. Шакина, О.В. Штанов // Вопросы материаловедения, 2014. – № 2 (78). – С. 99–105

Список публикаций в других изданиях

1. Шакина, А.В. Микромеханизмы изнашивания в системе колесо-рельс / А.В. Шакина, В.С. Фадеев, С.В. Биленко // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 41-й научно-технической конференции аспирантов и студентов

(г. Комсомольск-на-Амуре, 2011 г.). В 4 ч. Ч. 2 / редкол.: А.М. Шпилев (отв. ред.) и др. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2011. – 299 с. – с. 257 - 259

2. Shakina, A.V. The research of the wear mechanisms in the “wheel – rail” system / A.V. Shakina, V.S. Fadeev, O.V. Shtanov // Modern materials and technologies 2011: International Russian-Chinese Symposium. Proceedings. – Khabarovsk: Pacific National University, 2011. – 485 p. – P. 211 - 216

3. Шакина А.В. Исследование механизмов износа боковой поверхности рельсов на примере дальневосточной железной дороги // Итоги диссертационных исследований. Том 1. – Материалы III Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2011. – 236 с. – С. 99 – 108

4. Шакина, А.В. Исследование изнашивания и его предотвращение в системе «Тормозная колодка – Колесо – Рельс» / А.В. Шакина, С.В. Биленко, Н.М. Паладин, В.С. Фадеев, О.В. Штанов // Проблемы науки, техники и образования в современном мире: сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции 30 ноября 2012 г. Липецк, Липецкая областная общественная организация Всероссийского общества изобретателей и рационализаторов, 2012, 234 с. – С. 126 – 127.

5. Шакина, А.В. Разработка металлокерамического материала тормозной колодки / А.В. Шакина, С.В. Биленко, В.С. Фадеев, О.В. Штанов // Современная наука: реальность и перспективы: сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции 18 февраля 2013 г. Липецк, Липецкая областная общественная организация Всероссийского общества изобретателей и рационализаторов, 2013, 167 с. – С. 90.

6. Шакина, А.В. Исследования фрикционных материалов вагонной тормозной колодки / А.В. Шакина, С.В. Биленко, О.В. Штанов, В.С. Фадеев // Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения. Школа-семинар по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 21-22 июня 2013 г. в 2 ч. Ч.1 / редкол. : А.М. Шпилев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – 379 с. – С. 236 - 239

Список патентов РФ

1. Патент РФ № 125950, МПК В61Н 1/00, F16D 65/04, F16D 69/00 на полезную модель «Тормозная вагонная композиционная колодка»/ Авторы. Фадеев В.С., Конаков А.В., Чигрин Ю.Л., Штанов О.В., Ободовский Ю.В., Паладин Н.М., **Шакина А.В.**/ Патентообладатель ЗАО «Современные тормозные системы», заявка № 2012129940 от 16.07.2012, опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8

2. Патент РФ № 126300, МПК В61Н 1/00, F16D 65/04, F16D 69/00 на полезную модель «Тормозная колодка с композиционными вставками для локомотивов и моторовозов»/ Авторы. Фадеев В.С., Конаков А.В., Чигрин Ю.Л., Штанов О.В., Ободовский Ю.В., Паладин Н.М., **Шакина А.В.**/ Патентообладатель ЗАО «Современные тормозные системы», заявка № 2012129939 от 16.07.2012, опубл. 27.03.2013, Бюл. № 9

3. Патент РФ № 126300, МПК В61Н 1/00, F16D 65/04, F16D 69/00 на полезную модель «Тормозная вагонная колодка с композиционными вставками»/ Авторы. Фадеев В.С., Конаков А.В., Чигрин Ю.Л., Штанов О.В., Ободовский Ю.В., Паладин

Н.М., **Шакина А.В.**/ Патентообладатель ЗАО «Современные тормозные системы», заявка № 2012129936 от 16.07.2012, опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11

4. Патент РФ № 127350, МПК В61Н 1/00, F16D 65/04, F16D 69/00 на полезную модель «Тормозная композиционная колодка для локомотивов и мотовозов»/ Авторы. Фадеев В.С., Конаков А.В., Чигрин Ю.Л., Штанов О.В., Ободовский Ю.В., Паладин Н.М., **Шакина А.В.**/ Патентообладатель ЗАО «Современные тормозные системы», заявка № 2012129938 от 16.07.2012, опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12

5. Патент РФ № 133489, МПК В61Н 1/00 на полезную модель «Колодка вагонная тормозная композиционная на основе железа»/ Авторы. Фадеев В.С., Конаков А.В., Чигрин Ю.Л., Штанов О.В., Ободовский Ю.В., Паладин Н.М., **Шакина А.В.**, Довгаль О.В./ Патентообладатель ООО «Научно-технический центр Информационные Технологии», заявка № 2013127621 от 18.06.2013, опубл. 20.10.2013, Бюл. № 29

6. Патент РФ № 133490, МПК В61Н 1/00 на полезную модель «Колодка вагонная тормозная композиционная на основе железа»/ Авторы. Фадеев В.С., Конаков А.В., Чигрин Ю.Л., Штанов О.В., Ободовский Ю.В., Паладин Н.М., **Шакина А.В.**, Довгаль О.В./ Патентообладатель ООО «Научно-технический центр Информационные Технологии», заявка № 2013127622 от 18.06.2013, опубл. 20.10.2013, Бюл. № 29

Подписано к печати 16.07.2014.

Формат 60×84 1/16. бумага 65 г/м². Ризограф EZ570_E.

Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд.л. 1,35. Тираж 100 экз. Заказ 26406

Полиграфическая лаборатория
ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре
государственный технический университет»
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.