

Исследование структуры и свойств фрикционного композиционного материала на основе железной матрицы

© 2022

Афанасьева Анна Алексеевна^{*1,3}, инженер ЦКП «Новые материалы и технологии»*Башков Олег Викторович*^{1,4}, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов»

*Фадеев Валерий Сергеевич*², доктор технических наук, профессор, генеральный директор¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре (Россия)²ООО «ИНФОТЕХ», Москва (Россия)

*E-mail: ani.afanasjeva@gmail.com

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8647-3770>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-9797>

Поступила в редакцию 27.05.2022

Принята к публикации 23.12.2022

Аннотация: Непрерывный рост скорости движения и грузонапряженности железнодорожного транспорта, работающего в широком диапазоне климатических зон Российской Федерации, создает потребность в разработке новых фрикционных материалов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами, способных обеспечить высокую надежность функционирования стрелочных электроприводов. В работе представлены результаты исследования микроструктуры, физико-механических и эксплуатационных свойств нового материала фрикционных вставок на основе железной матрицы для муфт стрелочного привода. В состав нового материала входят такие компоненты, как Fe, Cu, BaSO₄, SiO₂, C, Zn. Предложена методика выбора материалов с заданными эксплуатационными свойствами на основе результатов проведенных исследований с использованием факторного планирования эксперимента. С этой целью проведены исследования и установлена связь между значениями показателей микроструктуры, физико-механических и эксплуатационных свойств материалов с различным количественным составом компонентов. Был предложен параметр «плотность границ зерен» как показатель диссипативных свойств материала, обоснована возможность его использования в качестве структурного параметра оценки эксплуатационных свойств фрикционного материала. Для оценки эксплуатационных свойств фрикционного материала, определяющих возможность его применения в составе фрикционных муфт стрелочного электропривода, был также предложен новый параметр – период стойкости τ . Еще одним эксплуатационным свойством являлась девиация значений коэффициента трения Δf в диапазоне значений прижимных усилий стрелочного электропривода. По результатам стендовых испытаний нового фрикционного материала в составе фрикционной муфты стрелочного электропривода выявлена большая стойкость материала к износу и возможность его использования в тяжелых климатических условиях. Предложенная методика испытаний позволяет выполнять прогнозирование эксплуатационных свойств новых материалов еще на стадии изучения микроструктуры на основании полученных зависимостей, что позволяет существенно сузить круг поиска.

Ключевые слова: композиционный фрикционный материал; плотность границ зерен; порошковая металлургия; структура поверхности трения; диссипация.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4).

Для цитирования: Афанасьева А.А., Башков О.В., Фадеев В.С. Исследование структуры и свойств фрикционного композиционного материала на основе железной матрицы // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 4. С. 18–29. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-4-18-29.

ВВЕДЕНИЕ

Фрикционные материалы применяются практически во всех областях современной промышленности, в том числе на железной дороге. Непрерывный рост скоростей движения подвижных составов («Сапсан», «Аллегро», «Стриж» и др.), а так же грузонапряженности железных дорог создает потребность в разработке новых фрикционных материалов, способных обеспечить необходимые эксплуатационные свойства в широкой климатической зоне Российской Федерации [1].

Особое место в обеспечении быстрого и безопасного движения подвижного состава занимают стрелочные электроприводы, основная функция которых заключа-

ется в осуществлении перевода и замыкании остряка стрелочного перевода. Работа привода осуществляется за счет передачи фрикционной муфтой крутящего момента от электродвигателя к блоку главного вала. Кроме того, задача муфты – предохранять электродвигатель от перегрузки, которая может возникнуть в случае, если по какой-либо внешней причине остряк стрелочного перевода замкнут не удастся.

Работа муфты стрелочного электропривода в этот момент осуществляется при критических нагрузках [2] и не должна длиться дольше установленного нормативной документацией времени от 20 до 30 с. Однако на практике эти условия не всегда соблюдаются, и в случае их нарушения происходит перегрев фрикционного

материала. Последствия перегрева муфты могут быть различными, но наиболее распространенные из них – это адгезионное схватывание и отпуск дисков материала контртела, их искривление. Диски и фрикционные элементы после перегрева муфты подлежат только замене, что в условиях железнодорожного транспорта осложняется загруженностью дорог.

Современный фрикционный материал должен сочетать в себе комплекс физико-механических свойств, таких как высокая износостойкость, повышенный коэффициент трения, обладать достаточной теплостойкостью, термомеханической устойчивостью и способностью рассеивать выделяющееся при трении тепло [3]. Меняя состав фрикционных материалов, значения показателей этих свойств можно изменять в широких пределах, поэтому их свойства нормируются в соответствии с требованиями условий эксплуатации [4].

Одним из важнейших эксплуатационных свойств фрикционного материала является коэффициент трения. В работе [5] показана возможность прогнозирования триботехнических показателей материала фрикционной муфты по коэффициенту трения. Эффективность работы фрикционных материалов в значительной степени определяется соотношением коэффициента трения и износостойкости, сочетанием физико-механических и эксплуатационных свойств в различных климатических условиях работы [6]. В каждом отдельном случае значения коэффициента трения будут определяться условиями работы механизма [7]. Для муфт стрелочных электроприводов важно не только значение коэффициента трения, но главным образом обеспечение требуемых значений тока фрикции при заданном рабочем усилии на шибере привода [8].

По данным ОАО «РЖД», ежегодно порядка 6,5 % общего количества отказов в работе стрелочных электроприводов вызвано некорректной работой фрикционных муфт. Наличие в составе фрикционного материала таких дорогостоящих легирующих элементов, как медь (от 15 до 90 %), олово (от 2 до 10 %), никель (до 30 %), хром (до 20 %), вольфрам (до 10 %) и др., нанесение покрытий на контактные поверхности фрикционных муфт [9] позволяет добиться хороших показателей эксплуатационных свойств, но значительно повышает стоимость.

Ранее эксплуатационные свойства материала фрикционных вставок оценивались только по качеству работы стрелочного электропривода, для этого требовалось

изготовление муфты с заданным числом фрикционных элементов [10]. В данной работе мы предложили новые параметры оценки эксплуатационных свойств фрикционного элемента в лабораторных условиях, не требующие на начальных этапах проведения стендовых испытаний муфты в сборе. Не менее важным является установление взаимосвязи между свойствами фрикционного материала и его структурой [11].

Цель исследования – установление связи между механическими, структурными и технологическими свойствами нового композиционного фрикционного материала (КФМ) и сравнение их с аналогом, используемым в настоящее время для изготовления фрикционного механизма стрелочного электропривода.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка составов материала осуществлялась с применением факторного планирования эксперимента. Был выбран следующий компонентный состав: Fe, Cu, BaSO₄, SiO₂, C, Zn. В качестве фрикционного наполнителя, придающего материалу прочность и твердость, в состав был введен SiO₂. BaSO₄ обеспечивает повышение стабильности фрикционных свойств материала и термической прочности железной матрицы [12]. Варьируемыми факторами являлись значения массовой концентрации Cu, BaSO₄ и SiO₂, приведенные в процентах от общей массы. Содержание Fe, как основы, рассчитывалось по остаточному принципу. Уровни варьирования факторов и их кодировочные значения приведены в таблице 1.

Кодировка переменных факторов производилась по формуле:

$$X_n = 1 - \frac{2(x_{n\max} - x_n)}{x_{n\max} - x_{n\min}},$$

где x_n – значения n -го переменного фактора.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента при двухуровневом варьировании представлена в таблице 2.

Полная матрица планирования содержит 27 различных составов композиционных материалов и предполагает достаточно большой объем экспериментальных исследований. В работе предложена методика сокращенного объема исследований: оставлен лишь один

Таблица 1. Уровни варьирования факторов и их кодировочные значения
Table 1. The levels of factor variability and their code values

Фактор	Cu		SiO ₂		BaSO ₄	
	Массовая доля, %	Код X ₁	Массовая доля, %	Код X ₂	Массовая доля, %	Код X ₃
Верхний уровень	30,0	+1	5,0	+1	3,0	+1
Средний уровень	22,5	0	4,0	0	2,25	0
Нижний уровень	15,0	-1	3,0	-1	1,5	-1

Таблица 2. Матрица планирования
Table 2. Planning matrix

№	Варьируемые факторы			Результаты эксперимента				
	X_1	X_2	X_3	Средняя плотность границ	Пористость	НВ	Относительная износостойкость	Коэффициент трения
1	+1	+1	+1	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	Y_{41}	Y_{51}
2	-1	+1	+1	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	Y_{42}	Y_{52}
3	+1	-1	+1	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	Y_{43}	Y_{53}
4	-1	-1	+1	Y_{14}	Y_{24}	Y_{34}	Y_{44}	Y_{54}
5	+1	+1	-1	Y_{15}	Y_{25}	Y_{35}	Y_{45}	Y_{55}
6	-1	+1	-1	Y_{16}	Y_{26}	Y_{36}	Y_{46}	Y_{56}
7	+1	-1	-1	Y_{17}	Y_{27}	Y_{37}	Y_{47}	Y_{57}
8	-1	-1	-1	Y_{18}	Y_{28}	Y_{38}	Y_{48}	Y_{58}
9	0	0	0	Y_{19}	Y_{29}	Y_{39}	Y_{49}	Y_{59}

базовый состав, содержащий срединные значения компонентов. Остальные составы, выбранные для анализа, являются составами, содержащими крайние значения массовых долей компонентов, выбранных для поиска оптимального состава.

Уравнение регрессии в закодированных параметрах представляет линейный полином, представленный в формуле:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3.$$

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывались по формуле:

$$a_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ji}Y_i),$$

где n – количество строк в матрице планирования;

i – порядковый номер эксперимента;

j – индекс независимой переменной ($j=0, 1, 2, 3$).

В результате были получены 9 перспективных составов фрикционных материалов, представленных в таблице 3.

Для проведения исследований экспериментальных составов композиционного материала методом порошковой металлургии изготавливались образцы фрикционных вставок [13]. Во все составы были включены порошки углерода (ГОСТ 4404-78) и цинка (ТУ 2432-062-56856807-06) – 3 и 1 % соответственно. Углерод в виде графита, добавленный в количестве 3 % по массе, работает в материале в качестве твердой смазки. Добавление цинка в количестве всего 1 % по массе позволяет значительно улучшить прессуемость материала, снижая при этом износ матрицы. Подготовленная по-

рошковая смесь заданного состава спрессовывалась под давлением 700 МПа. Спрессованные заготовки спекали в атмосфере аргона в высокотемпературной вакуумной печи VHT 8/18–GR при температуре 1135 °C [14].

Микроструктуру образцов исследовали на металлографическом микроскопе Nikon 200MA. Изучались металлографические шлифы в травленном и нетравленном виде. Для травления образцов применялся раствор азотной кислоты 4 % в этиловом спирте. Определение количественных показателей микроструктуры осуществлялось при помощи ПО Image.Pro.Plus.5.1. Обработка изображений микроструктур включала в себя коррекцию резкости, снятие контрастной маски, выделение границ с помощью фильтра Лапласа и калибровку в соответствии с масштабом [15]. По полученным результатам рассчитывали среднюю плотность границ по формуле:

$$q_{\text{ср}} = \frac{1}{F_{\Phi}} \sum_{i=1}^N P_i,$$

где N – количество микроструктурных объектов;

P_i – периметр объектов;

F_{Φ} – площадь металлографического шлифа.

Фиксацию и подсчет отдельных фазово-структурных составляющих проводили с использованием инструмента «контрастные маски», обрабатывая изображения нетравленных шлифов по алгоритму цветовой сегментации и цветового куба.

Износостойкость исследуемых композиционных материалов рассчитывалась по аналогии с методикой определения относительной абразивной износостойкости гетерогенного материала [16] на основании измеренной твердости структурных компонентов. Микротвердость

Таблица 3. Составы композиционного фрикционного материала
Table 3. Compositions of a composite friction material

№	Массовая доля химических элементов, %					
	Cu	SiO ₂	BaSO ₄	C	Zn	Fe
1	30,0	5,0	3,0	3,0	1,0	58,0
2	15,0	5,0	3,0	3,0	1,0	74,0
3	30,0	3,0	3,0	3,0	1,0	60,0
4	15,0	3,0	3,0	3,0	1,0	75,0
5	30,0	5,0	1,5	3,0	1,0	59,5
6	15,0	5,0	1,5	3,0	1,0	74,5
7	30,0	3,0	1,5	3,0	1,0	61,5
8	15,0	3,0	1,5	3,0	1,0	76,5
9	22,5	4,0	2,25	3,0	1,0	67,25

элементов микроструктуры определяли при помощи микротвердомера НМV-2 (Shimadzu) при нагрузке 0,49 Н: один и тот же вид элемента микроструктуры измерялся 25 раз, после чего производился расчет математического ожидания и среднеквадратичного отклонения.

Относительная износостойкость композиционного материала была определена по формуле:

$$\varepsilon_{\text{KM}} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^n C_i \varepsilon_i,$$

где ε_i – относительная износостойкость отдельного структурного компонента;

C_i – относительная площадь, занимаемая структурным компонентом, %;

n – количество структурных компонентов материала.

Относительная износостойкость железной матрицы ($\varepsilon_{\text{ж}}$) как основы композиционного материала и медных включений ($\varepsilon_{\text{м}}$) была определена по формулам:

$$\varepsilon_{\text{ж}} = \frac{\mu HV_{\text{ж}}}{\mu HV_{\text{эталон}}},$$

$$\varepsilon_{\text{м}} = \frac{\mu HV_{\text{м}}}{\mu HV_{\text{эталон}}},$$

где $HV_{\text{ж}}$ – микротвердость железной матрицы;

$HV_{\text{м}}$ – микротвердость медных включений;

$HV_{\text{эталон}}$ – микротвердость эталона.

В качестве эталона для расчета была использована сталь 45 со значением микротвердости 2200 МПа, близкая по составу и свойствам к используемому материалу контрола фрикционной пары.

В связи с тем, что структура материалов, предложенных для использования в качестве фрикционных вставок, по характеру функционирования содержит

поры, значение износостойкости которых априори равно нулю и в расчете не учитывалось, относительная износостойкость материала в целом рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_{\text{KM}} = C_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} + C_{\text{м}} \varepsilon_{\text{м}}.$$

Твердость материала оценивалась при помощи стационарного твердомера Бринелля ТН-600 в соответствии с ГОСТ 9012-59.

Для определения стабильности коэффициента трения были проведены исследования фрикционных свойств на машине трения ИИ5018, схема испытаний «диск – колодка». Методика проведения испытаний материала на машине трения имитировала условия работы материала фрикционной вставки в составе муфты стрелочного электропривода типа СП-6.

Стабильность коэффициента трения оценивалась девиацией значений коэффициента трения Δf в заданном диапазоне усилий, приведенных к усилию на шибере. Параметр Δf принят в качестве одного из основных показателей эксплуатационных свойств композиционных фрикционных вставок.

Еще одним важным эксплуатационным параметром для фрикционных материалов являлась стойкость к износу, измеряемая как период стойкости τ материала вставки фрикционной муфты при проведении стендовых испытаний. Определение периода τ выполнялось по результатам испытаний муфты стрелочного привода в сборе. При испытании регистрировали стойкость к износу τ исследуемых КФМ, определяемую как период времени от начала испытания до момента превышения значения предельно допустимого тока электродвигателя по паспорту (4,8 А для используемого в электроприводе двигателя) для фрикционного механизма с установленными фрикционными вставками из материала состава № 2 и материала-аналога. Критерием определения стойкости материала являлся период τ от начала

испытания до момента превышения допустимого значения тока электродвигателя при работе электропривода с заданным значением усилия на шибере.

Для сравнения полученных характеристик Δf и τ разработанного материала также проводились испытания материала-аналога, близкого по составу и применяемого в настоящее время для изготовления фрикционных вставок муфт стрелочного электропривода. Состав материала-аналога: С – 9 %, Cu – 15 %, SiO₂ – 3 %, BaSO₄ – 6 %, остальное – Fe.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате изучения микроструктур исследуемых образцов были выявлены 3 основные структурные составляющие, присущие всем 9 составам КФМ: железная матрица, медные включения и поры (рис. 1). Визу-

альное различие нетравленных шлифов КФМ составляли размеры, количество включений и пор.

Железо в составе композиционного фрикционного материала образовало каркас (матрицу), микроструктура которого представляла собой пластинчатый перлит. Средняя плотность границ представляла собой интегральную величину субграниц в железной матрице и межфазовых границ между стальной матрицей и медными включениями.

По обработанным нетравленным изображениям микроструктур рассчитывались соотношения площадей между основными структурными составляющими фрикционного материала. Пример исходного изображения микроструктуры и контрастные маски различных структурных составляющих представлены на рис. 2.

Результаты экспериментальных исследований структуры, механических и физических свойств представлены

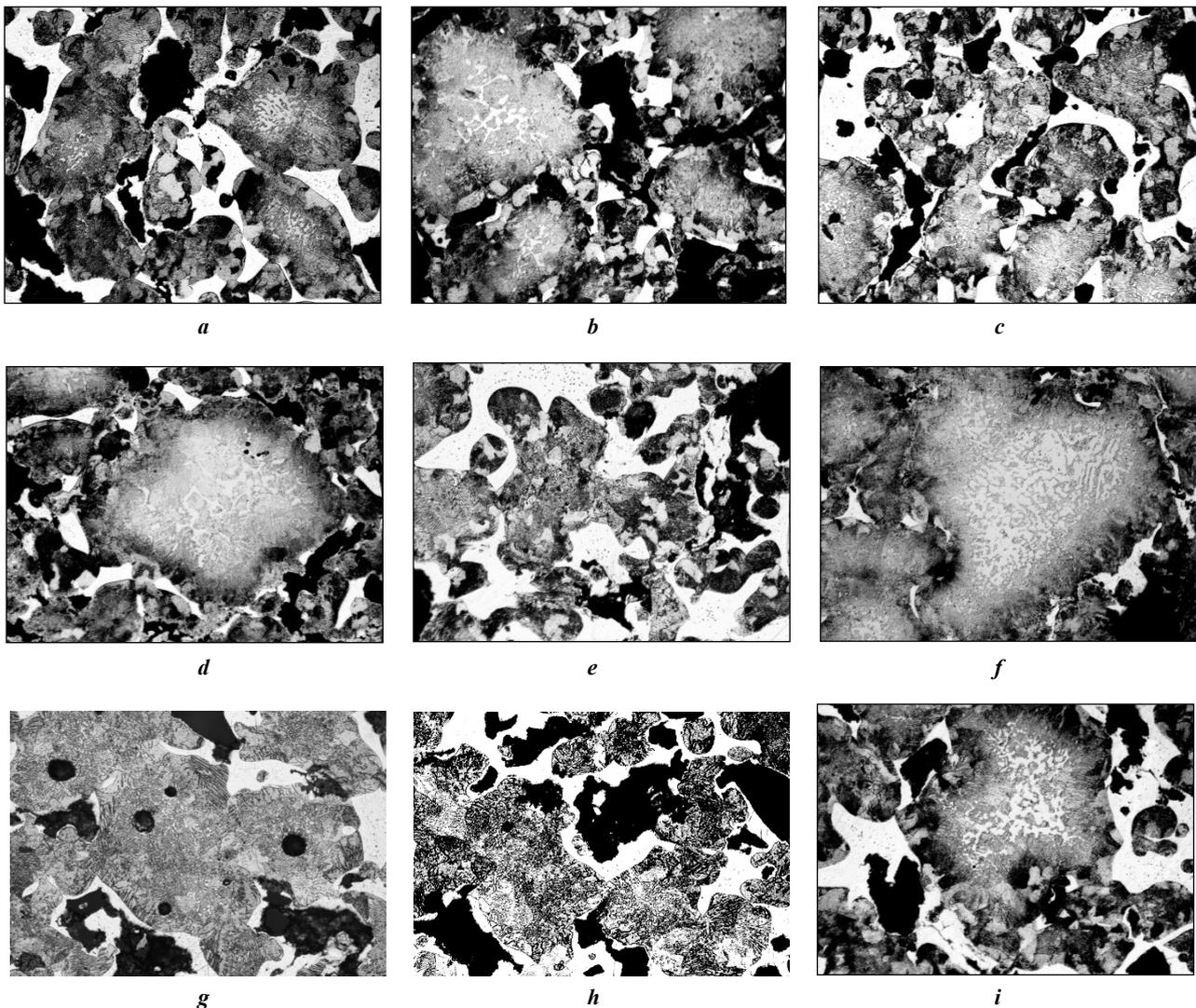


Рис. 1. Микроструктуры образцов фрикционного материала:
a – образец состава № 1; *b* – образец состава № 2; *c* – образец состава № 3;
d – образец состава № 4; *e* – образец состава № 5; *f* – образец состава № 6;
g – образец состава № 7; *h* – образец состава № 8; *i* – образец состава № 9

Fig. 1. Microstructures of friction material specimens:

a – composition No.1 specimen; *b* – composition No.2 specimen; *c* – composition No.3 specimen;
d – composition No.4 specimen; *e* – composition No.5 specimen; *f* – composition No.6 specimen;
g – composition No.7 specimen; *h* – composition No.8 specimen; *i* – composition No.9 specimen

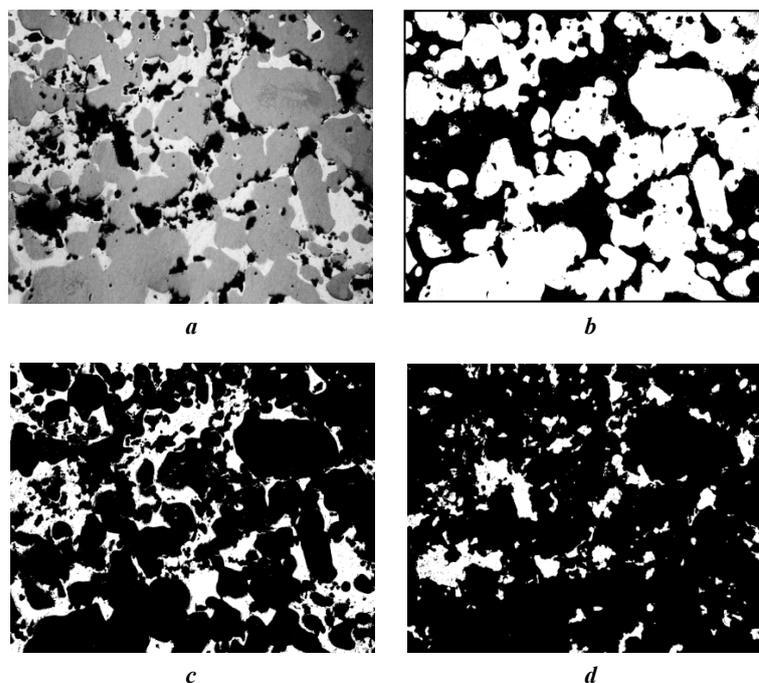


Рис. 2. Изображение микроструктуры композиционного фрикционного материала:
a – до обработки; *b* – контрастные маски железной матрицы;
c – медные включения; *d* – поры
Fig. 2. An image of the composite friction material microstructure:
a – before treatment; *b* – iron matrix contrasting masks;
c – copper inclusions; *d* – pores

в таблице 4. Значения средней плотности границ зерен q , пористости Π , твердости НВ и коэффициента износостойкости были получены прямыми измерениями или в процессе испытаний образцов 1–9. Относительная износостойкость $\varepsilon_{\text{КМ}}$ являлась расчетной характеристикой.

В результате реализации эксперимента по факторному планированию были получены уравнения регрессии:

$$q = 0,513 - 0,004 \cdot \text{Cu} - 0,001 \cdot \text{SiO}_2 - 0,024 \cdot \text{BaSO}_4,$$

$$\Pi = 22,426 - 0,063 \cdot \text{Cu} + 0,003 \cdot \text{SiO}_2 + 0,264 \cdot \text{BaSO}_4,$$

$$\text{HB} = 747,6 - 6,5 \cdot \text{Cu} + 29,2 \cdot \text{SiO}_2 + 24,994 \cdot \text{BaSO}_4,$$

$$\varepsilon = 1,383 - 0,019 \cdot \text{Cu} + 0,026 \cdot \text{SiO}_2 + 0,011 \cdot \text{BaSO}_4,$$

$$f = 0,3937 - 0,03567 \cdot \text{Cu} + 0,1728 \cdot \text{SiO}_2 + 0,2306 \cdot \text{BaSO}_4.$$

На основании полученных результатов были построены диаграммы, устанавливающие связь средней плотности границ зерен $q_{\text{ср}}$ с твердостью НВ (рис. 3) и относительной износостойкостью к механическому истиранию $\varepsilon_{\text{КМ}}$ исследуемых КФМ (рис. 4).

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 [17; 18]. По установленной связи между относительной износостойкостью $\varepsilon_{\text{КМ}}$ 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.

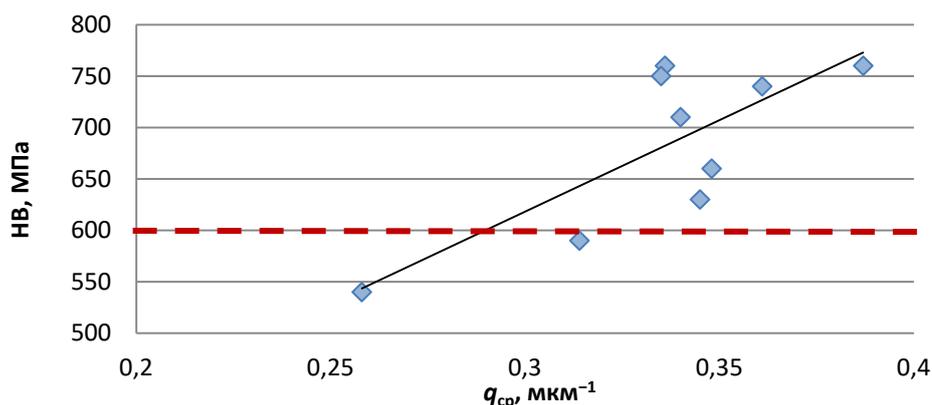
Важным показателем работоспособности фрикционной муфты является стабильность коэффициента трения, возникающего при работе механизма [19]. При этом наиболее важным параметром, обеспечивающим стабильность функционирования фрикционного механизма стрелочного электропривода, является не значение самого коэффициента трения, а значение девиации коэффициента трения Δf в диапазоне значений рабочего тягового усилия, создаваемого взаимным прижатием элементов фрикционной пары, которое составляет 4000–6000 Н для модели стрелочного привода, способного работать в тяжелых условиях эксплуатации. Результаты испытаний представлены на диаграмме (рис. 5).

На рис. 5 видно, что наименьшее значение девиации коэффициента трения $\Delta f=0,08$ наблюдается для материала, изготовленного из состава № 2.

Для подтверждения эффективности предложенной методики выбора фрикционных материалов были проведены стендовые испытания стрелочного электропривода в сборе. Исследования показали, что значение стойкости к износу τ КФМ состава № 2 превысило

Таблица 4. Результаты эксперимента
Table 4. The experiment results

№	Результаты эксперимента				
	Средняя плотность границ q , мкм^{-1}	Пористость, %	НВ, МПа	Относительная износостойкость $\varepsilon_{\text{КМ}}$	Коэффициент трения
1	0,340	18,92	710	0,95	0,36
2	0,336	19,45	760	0,93	0,46
3	0,258	18,21	540	0,87	0,31
4	0,387	20,81	760	1,11	0,46
5	0,348	18,62	660	0,99	0,40
6	0,361	19,63	740	1,07	0,38
7	0,314	18,95	590	0,87	0,35
8	0,345	18,61	630	1,03	0,34
9	0,335	21,65	750	1,01	0,41

Рис. 3. Диаграмма, устанавливающая связь между значениями средней плотности границ зерен q_{cp} и твердости НВ исследуемых КФМFig. 3. A diagram establishing the relationship between the values of the grain boundary average density q_{cp} and the HB hardness of the studied CFMs

установленное предельное время испытания $\tau > 300$ с, что характеризует данный материал как имеющий высокое значение стойкости к износу. Значение стойкости к износу материала-аналога составило $\tau = 90$ с (рис. 6).

На рис. 7 приведены графики зависимости износа фрикционных вставок по массе от периода времени испытаний. Меньший износ был отмечен для КФМ состава № 2 в сравнении с материалом-аналогом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках реального производства в условиях быстро меняющегося спроса на инновационную продукцию экономическая целесообразность проведения полнофакторного исследования заводской лабораторией не-

крупной производственной компании может оказаться под сомнением. Предложенная в работе методика сокращенного объема исследований основана на гипотезе о монотонности зависимостей значений исследуемых свойств, имеющих, по мнению авторов, физически обоснованную связь между собой. Данный подход позволяет сократить в 3 раза время и затраты на выполнение исследований в условиях, при которых основной целью является разработка материала, обеспечивающего прежде всего заданные эксплуатационные свойства и обладающего лучшими показателями свойств в сравнении с аналогами.

Полученные в ходе эксперимента регрессионные уравнения позволяют прогнозировать количественный состав компонентов, используемых для изготовления

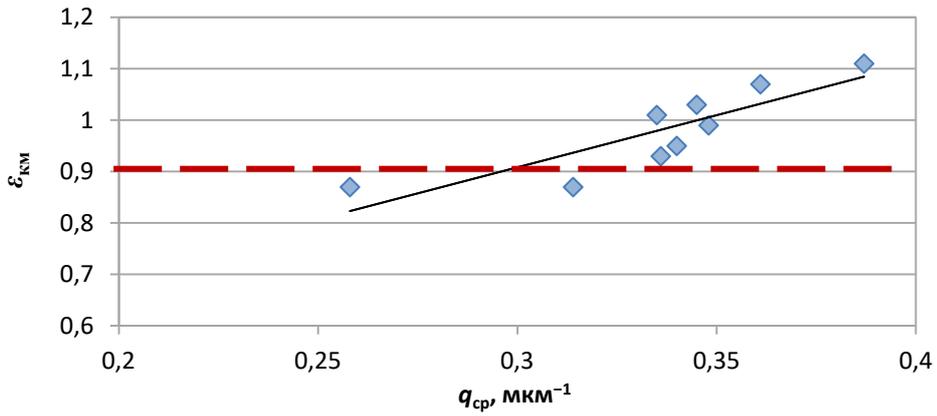


Рис. 4. Диаграмма, устанавливающая связь между значениями средней плотности границ зерен q_{cp} и износостойкости к механическому истиранию $\epsilon_{км}$ исследуемых КФМ
Fig. 4. A diagram establishing the relationship between the values of the grain boundary average density q_{cp} and the mechanical abrasion wear resistance $\epsilon_{км}$ of the studied CFMs

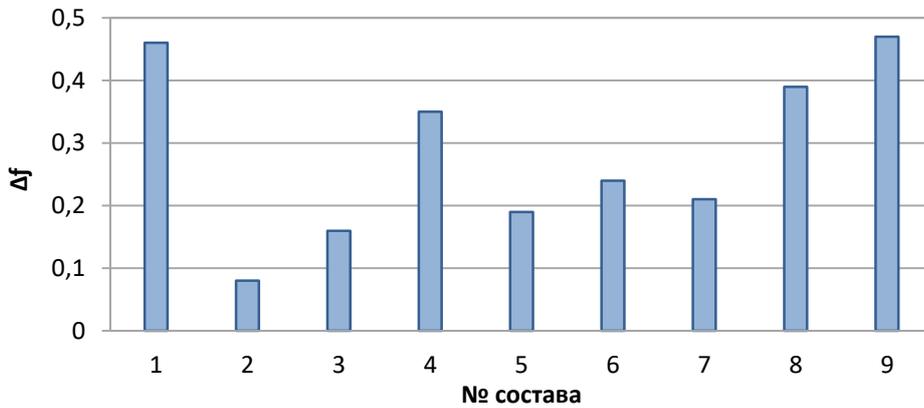


Рис. 5. Девияция коэффициента трения в диапазоне тяговых усилий от 4000 до 6000 Н
Fig. 5. The friction coefficient deviation in the range of traction efforts of 4000 to 6000 N

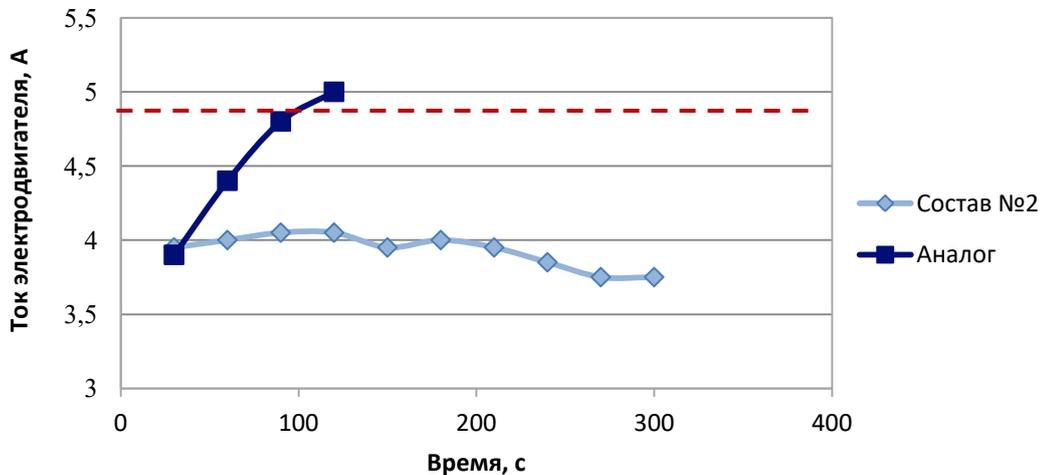


Рис. 6. Графики зависимости тока на электродвигателе стрелочного электропривода от периода испытаний
Fig. 6. The diagrams of dependency of the current at the electric drive of an electric switch mechanism on the testing period

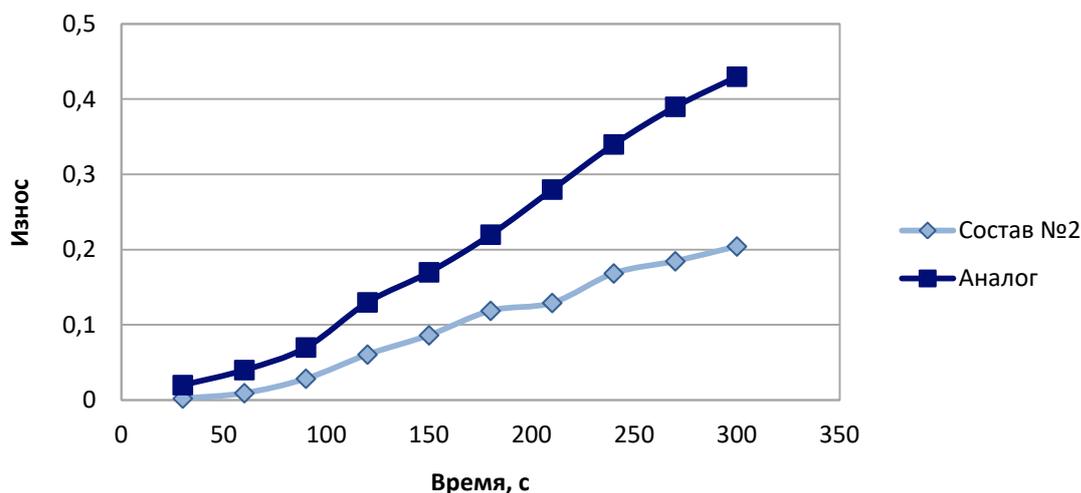


Рис. 7. Графики зависимости износа материалов фрикционных вставок от периода испытаний
 Fig. 7. The diagrams of dependency of the friction inserts' material wear on the testing period

материала фрикционной вставки на железной основе, в зависимости от требуемых механических и эксплуатационных свойств. В результате анализа уравнений регрессии было установлено, что при повышенной концентрации Си твердость по Бринеллю, относительная износостойкость, пористость и средняя плотность границ микроструктурных элементов q понижаются, а при повышении концентрации компонентов $BaSO_4$ и SiO_2 твердость по Бринеллю и относительная износостойкость увеличиваются, при этом снижается средняя плотность границ q [19].

Из установленных зависимостей (рис. 3, 4) можно видеть, что с увеличением значений твердости материала с 540 до 760 НВ, что составляет 40 %, и с увеличением относительной износостойкости ε с 0,87 до 1,11, что составляет 28 %, значения параметра q возросли на 50 % – с 0,258 до 0,387 $\mu\text{м}^{-1}$. 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 [20; 21]. В связи с этим параметр q характеризует диссипативные свойства материала и может являться физически обоснованным параметром для определения эксплуатационных свойств фрикционных материалов.

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 рис. 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).

Основными функциями разрабатываемого материала фрикционной вставки являются обеспечение передачи стабильного усилия на шибере для перевода стрелки стрелочного электропривода, а также предохранение

электродвигателя от перегрузки и сгорания в случае возникновения аварийной ситуации. Кроме того, от электроприводов универсального назначения требуется обеспечение усилий на шибере в широком диапазоне [22]. Ранее для контроля соблюдения этих условий требовались стендовые испытания материала, что не всегда представляется возможным. Предложенный параметр девиации коэффициента трения Δf позволит сократить объем стендовых испытаний и уже на стадии лабораторных испытаний исключить неподходящие составы материалов. Исследование фрикционных свойств разработанных материалов позволило определить значения девиации коэффициента трения Δf в диапазоне тяговых усилий от 4000 до 6000 Н, развиваемых на шибере. Минимальным значением девиации коэффициента трения $\Delta f=0,08$ из всех исследуемых материалов обладал состав № 2.

Проведенные стендовые испытания материала состава № 2 и материала-аналога подтвердили эффективность методики выбора состава фрикционного материала. Параметр стойкости к износу τ материала состава № 2 имел значения более чем в 3 раза выше в сравнении со значениями τ для материала-аналога.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Предложены новые составы композиционных материалов, используемых для изготовления фрикционных вставок для муфт стрелочных электроприводов на железной основе. С использованием метода факторного планирования эксперимента установлена взаимосвязь между количественным показателем микроструктуры нового фрикционного материала – значением средней плотности границ и его эксплуатационными и физико-механическими свойствами. По полученным зависимостям можно предварительно оценить диссипативные свойства нового фрикционного материала, что дает возможность осуществить прогнозирование эксплуатационных свойств. На основании полученных зависимостей для предложенных составов были проведены ис-

следования девиации значений коэффициента трения и стойкости к износу, выбран и запатентован состав материала (С – 3 %, Cu – 15 %, SiO₂ – 5 %, BaSO₄ – 3 %, остальное – Fe) с наилучшими показателями эксплуатационных свойств, обеспечивающими возможность его применения для работы в тяжело нагруженных механизмах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бернацкий В.В., Макаренко Н.Н. Современные фрикционные материалы и их применение в тормозных системах автотранспортных средств // Журнал автомобильных инженеров. 2019. № 4. С. 32–37. EDN: [VHRZYP](#).
- Шишкарёв М.П. К вопросу о нагрузках в адаптивных фрикционных муфтах при срабатывании // Инновационные подходы в отраслях и сферах. 2021. Т. 6. № 2. С. 219–229. EDN: [UTYVEG](#).
- Нилов А.С., Кулик В.И., Гаршин А.П. Анализ фрикционных материалов и технологий изготовления тормозных колодок для высоконагруженных тормозных систем с дисками из керамического композиционного материала // Новые огнеупоры. 2015. № 7. С. 57–68. EDN: [VILHQB](#).
- Kryachek V.M. Friction composites: Traditions and new solutions (review). I. Powder materials // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2004. Vol. 43. № 11-12. P. 581–592. DOI: [10.1007/s11106-005-0025-2](#).
- Густов Ю.А., Воронина И.В. Прогнозирование триботехнических показателей фрикционных дисковых предохранительных муфт по коэффициенту трения // Приводы и компоненты машин. 2019. № 3-4. С. 20–23. EDN: [CCKPTZ](#).
- Войтенко В.А. Моделирование тепловых процессов и процессов изнашивания фрикционной муфты нового типа для машиностроения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 4. С. 93–101. EDN: [DGWSOC](#).
- Шишкарёв М.П. Нагрузочная способность адаптивных фрикционных муфт при повышенном значении коэффициента трения // Инновационные подходы в отраслях и сферах. 2020. Т. 5. № 8. С. 8–16. EDN: [ROXNBU](#).
- Лешок А.В., Ильющенко А.Ф., Роговой А.Н., Лазарчик М.В. Спечённый порошковый фрикционный материал для фрикционных дисков муфты редуктора стрелочного электропривода: патент на изобретение РФ № 2757880, 2021. 3 с. EDN: [WJOLFM](#).
- Елагина О.Ю., Комадынко А.С., Полещук Е.Д., Rejakovic V., Drangai L. Перспективы применения покрытия из нитрида титана для контактных поверхностей фрикционных муфт // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 1. С. 36–42. EDN: [UDJLLT](#).
- Фадеев В.С., Штанов О.В., Паладин Н.М., Конаков А.В., Гайнаншин Н.Г., Афанасьев А.А. Диск фрикционной муфты стрелочного привода типа СП: патент на полезную модель РФ № 181227, 2018. 3 с. EDN: [TKYAVV](#).
- Башков О.В., Афанасьева А.А. Исследование структуры и фрикционных свойств нового композиционного фрикционного материала // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 4-1. С. 59–65. DOI: [10.37220/MIT.2021.54.4.032](#).
- Ким В.А., Афанасьева А.А. Особенности структуры и свойств фрикционного композиционного материала // Технология машиностроения. 2019. № 11. С. 5–11. EDN: [LYMUXK](#).
- Фадеев В.С., Штанов О.В., Паладин Н.М., Конаков А.В., Афанасьева А.А. Фрикционный элемент для фрикционной муфты стрелочного электропривода: патент на полезную модель РФ № 176377, 2018. 3 с. EDN: [KTZDSX](#).
- Ильющенко А.Ф., Дмитриевич А.А., Лешок А.В. Спечённые металлокерамические фрикционные композиционные материалы и изделия // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2011. № 2. С. 10–17. EDN: [XVSSSB](#).
- Kim V.A., Afanaseva A.A., Samar E.V., Belova I.V. Study of nonequilibrium structures by the method of multifractal parametrization // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 200. P. 467–474. DOI: [10.1007/978-3-030-69421-0_50](#).
- Хрущев М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. М.: Наука, 1960. 351 с.
- Cherney O.T., Skachkova E.G., Permowskiy A.A., Smirnova Zh.V., Kutepova L.I. Factors affecting the tribotechnical properties of sintered materials // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1111. Article number 012015. DOI: [10.1088/1757-899X/1111/1/012015](#).
- Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
- Ким В.А., Фадеев В.С., Афанасьева А.А. Исследование состава, структуры и свойств нового композиционного фрикционного материала // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. Т. 1. № 4. С. 62–68. EDN: [YANQKR](#).
- Гемуев Ш.И., Гемуев И.И. Технология производства и трибологические характеристики полученных фрикционных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 3. С. 76–78. EDN: [WMQYSH](#).
- Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: СО РАН, 2006. 520 с.
- Смирнов Н.И., Прожега М.В., Смирнов Н.Н. Исследование влияния работоспособности фрикционной муфты на эксплуатационные характеристики стрелочного электропривода // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 4. С. 460–465. EDN: [WMDXOP](#).

REFERENCES

- Bernatskiy V.V., Makarenko N.N. Modern friction materials and their application in the brake system of motor vehicles. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*, 2019, no. 4, pp. 32–37. EDN: [VHRZYP](#).
- Shishkarev M.P. On the issue of loads in response friction clutches when actuated. *Innovatsionnye podkhody v otraslyakh i sferakh*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 219–229. EDN: [UTYVEG](#).
- Nilov A.S., Kulik V.I., Garshin A.P. Analysis of friction materials and manufacturing technologies for brake

- pads for highly loaded brake systems with ceramic composite discs. *Novye ognepory*, 2015, no. 7, pp. 57–68. EDN: [VILHQB](#).
4. Kryachek V.M. Friction composites: Traditions and new solutions (review). I. Powder materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2004, vol. 43, no. 11-12, pp. 581–592. DOI: [10.1007/s11106-005-0025-2](#).
 5. Gustov Yu.A., Voronina I.V. Prediction of tribological indicators of a friction disc safety clutch for coefficient of friction. *Privody i komponenty mashin*, 2019, no. 3-4, pp. 20–23. EDN: [CCKPTZ](#).
 6. Voytenko V.A. Modeling of thermal and wearout processes of brand - new friction clutch for mechanical engineering. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 93–101. EDN: [DGWSOC](#).
 7. Shishkarev M.P. Load capacity of adaptive friction clutches at an increased value of the friction coefficient. *Innovatsionnye podkhody v otraslyakh i sferakh*, 2020, vol. 5, no. 8, pp. 8–16. EDN: [ROXNBU](#).
 8. Leshok A.V., Ilyushchenko A.F., Rogovoy A.N., Lazarchik M.V. *Spechennyi poroshkovyy friktsionnyy material dlya friktsionnykh diskov mufty reduktora strelochnogo elektroprivoda* [Sintered powdered friction material for friction discs of the clutch of the switch gear drive], patent na izobretenie RF no. 2757880, 2021. 3 p. EDN: [WJOLFM](#).
 9. Elagina O.Y., Komadyanko A.C., Poleshchuk E.D., Pejakovic V., Drangai L. Prospects for using titanium nitride coatings for the contact surfaces of friction clutches. *Journal of Friction and Wear*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 25–30. EDN: [BLNYKY](#).
 10. Fadeev V.S., Shtanov O.V., Paladin N.M., Konakov A.V., Gaynanshin N.G., Afanasev A.A. *Disk friktsionnyy mufty strelochnogo privoda tipa SP* [Disk of friction clutch of switch drive type SP], patent na poleznuyu model RF no. 181227, 2018. 3 p. EDN: [TKYAVV](#).
 11. Bashkov O.V., Afanaseva A.A. Study of the structure and frictional properties of a new composite friction material. *Morskie intellektualnye tekhnologii*, 2021, vol. 1, no. 4-1, pp. 59–65. DOI: [10.37220/MIT.2021.54.4.032](#).
 12. Kim V.A., Afanaseva A.A. Features of the structure and properties of the friction composite material. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2019, no. 11, pp. 5–11. EDN: [LYMUXK](#).
 13. Fadeev V.S., Shtanov O.V., Paladin N.M., Konakov A.V., Afanaseva A.A. *Friktsionnyy element dlya friktsionnoy mufty strelochnogo elektroprivoda* [Friction element for a friction clutch of an electric switch], patent na poleznuyu model RF no. 176377, 2018. 3 p. EDN: [KTZDSX](#).
 14. Ilyushchenko A.F., Dmitrovich A.A., Leshok A.V. Sintered metal-ceramic friction composition materials and products. *Izvestiya natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*, 2011, no. 2, pp. 10–17. EDN: [XVSSSB](#).
 15. Kim V.A., Afanaseva A.A., Samar E.V., Belova I.V. Study of nonequilibrium structures by the method of multifractal parametrization. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 200, pp. 467–474. DOI: [10.1007/978-3-030-69421-0_50](#).
 16. Khrushchev M.M., Babichev M.A. *Issledovaniye iznashivaniya metallov* [Metal wear study]. Moscow, Nauka Publ., 1960. 351 p.
 17. Cherney O.T., Skachkova E.G., Permovskiy A.A., Smirnova Zh.V., Kutepova L.I. Factors affecting the tribotechnical properties of sintered materials. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1111, article number 012015. DOI: [10.1088/1757-899X/1111/1/012015](#).
 18. Goryacheva I.G. *Mekhanika friktsionnogo vzaimodeystviya* [Mechanics of frictional interaction]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 478 p.
 19. Kim V.A., Fadeev V.S., Afanaseva A.A. Study of composition, structure and properties of new composite friction material. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, vol. 1, no. 4, pp. 62–68. EDN: [YANQKR](#).
 20. Gemuev Sh.I., Gemuev I.I. Advanced technology of friction compositions production and tribological characteristics of developed friction materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 76–78. EDN: [WMQYSH](#).
 21. Panin V.E., ed. *Poverkhnostnye sloi i vnutrennie granitsy razdela v geterogennykh materialakh* [Surface layers and interfaces in heterogeneous materials]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2006. 520 p.
 22. Smirnov N.I., Prozhega M.V., Smirnov N.N. Study of the influence of the friction clutch operability on the performance of the switch motor. *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, no. 4, pp. 358–362. EDN: [XXACBZ](#).

The study of the structure and properties of a friction composite material based on an iron matrix

© 2022

Anna A. Afanaseva^{*1,3}, engineer of the Center for Collective Use “Advanced Materials and Technologies”

Oleg V. Bashkov^{1,4}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,

Head of Chair “Materials Science and Technology of Advanced Materials”

Valery S. Fadeev², Doctor of Sciences (Engineering), Professor, General Director

¹Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure (Russia)

²OOO INFOTECH, Moscow (Russia)

*E-mail: ani.afanasjeva@gmail.com

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8647-3770>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-9797>

Received 27.05.2022

Accepted 23.12.2022

Abstract: The continuous increase in the speed and load of railway transport operating in a wide range of climatic zones of the Russian Federation creates a need to develop new friction materials with the improved performance properties that can ensure high functioning reliability of the electric switch mechanisms. The paper presents the results of the study of the microstructure, physical, mechanical, and operational properties of a new material for friction inserts based on an iron matrix for the switch gear clutches. The new material composition includes such components as Fe, Cu, BaSO₄, SiO₂, C, and Zn. The authors propose a technique for selecting materials with the specified performance properties based on the results of the research carried out using the experiment factorial planning. For this purpose, the authors carried out the studies and established a relationship between the values of microstructure indicators, physical, mechanical and operational properties of the materials with different quantitative composition of components. The grain boundary density was proposed as an indicator of the dissipative properties of the material, and the possibility of its application as a structural parameter for evaluating the friction material performance characteristics. To assess the friction material performance characteristics, which determine the possibility of its application as a part of the friction clutches of the electric switch mechanism, the authors proposed a new parameter – the endurance period τ . Another service property was the deviation of the friction coefficient Δf values in the range of values of the clamping force of the electric switch mechanism. According to the results of bench tests of a new friction material within the friction clutches of the electric switch mechanism, the authors identified a high wear resistance of the material and the possibility of its use in severe climatic conditions. The proposed testing technique allows predicting the performance properties of new materials at the stage of studying the microstructure based on the obtained dependences, which can significantly narrow the search range.

Keywords: composite friction material; grain boundary density; powder metallurgy; friction surface structure; dissipation.

Acknowledgements: The work was supported by the Presidential grant for government support of leading scientific schools of the Russian Federation (project NSh-452.2022.4).

For citation: Afanasyeva A.A., Bashkov O.V., Fadeev V.S. The study of the structure and properties of a friction composite material based on an iron matrix. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 4, pp. 18–29. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-4-18-29.