Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 2 с. 29–42
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-29-42

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Сравнительная оценка трения и износа альтернативных материалов, используемых для производства фрикционных композиционных материалов тормозных систем

Нарен Кейт [1, a], ***Атул Кулкарни*** [1, b, *], ***Йогирадж Дама*** [2, c]

[1] Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Махараштра, Пуне – 411048, Индия
[2] Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара, Лонере, Райгад, Махараштра, 402103, Индия

[a] https://orcid.org/0009-0001-1502-8570, naren.kate@viit.ac.in; [b] https://orcid.org/0000-0002-6452-6349, atul.kulkarni@viit.ac.in;
[c] https://orcid.org/0009-0008-5404-4347, yogirajdama@dbatu.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.81:621.89

История статьи:
Поступила: 17 января 2025
Рецензирование: 17 февраля 2025
Принята к печати: 17 марта 2025
Доступно онлайн: 15 июня 2025

Ключевые слова:
Безасбестовые альтернативные материалы
Фрикционные материалы тормозных колодок
Композиционные материалы
Износ
Схема «штифт – диск»

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящем исследовании рассматриваются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), направленные на разработку безасбестовых фрикционных композиционных материалов для тормозных систем (ФКТС) с целью повышения безопасности и эффективности работы автомобильных тормозных систем. Изучена эволюция ФКТС от материалов на основе асбеста к более безопасным заменителям и проведен анализ с целью разработки альтернативных комбинаций. Подчеркнута важная роль основных компонентов – волокон, связующих, модификаторов трения и наполнителей – в создании долговечных фрикционных композиционных материалов тормозных систем. Композиционный материал на основе базальтового волокна с наполнителем из карбоната кальция сравнивается с композиционным материалом на основе арамидного волокна с наполнителем из сульфата бария посредством оценки на испытательном стенде по схеме трения «штифт – диск». На основании результатов испытаний установлено, что альтернативные композиционные материалы перспективны для применения в тормозных системах. Настоящая работа предоставляет основу для дальнейшей разработки экологически чистых фрикционных композитов тормозных систем путем выбора оптимальных составов, а также определяет подход к последующим исследованиям, которые будут проводиться с целью изменения компонентов и их соотношения при создании композиционных материалов. Это исследование поможет в дальнейшем улучшить функциональность тормозных систем в автомобилях. **Цель работы:** данное исследование направлено на разработку безасбестовых фрикционных композиционных материалов для автомобильных тормозных систем (ФКТС) с целью повышения безопасности и эффективности их работы. Исследуются экологически чистые альтернативы асбесту, анализируются роли волокон, связующих, модификаторов трения и наполнителей. Целью исследования является определение оптимальных составов для создания прочных, экологически безопасных тормозных материалов, открывающих путь для дальнейшего внедрения инновационных решений в практику. **Методы исследования:** для оценки износа, трения и долговечности, а также оценки пригодности разрабатываемых материалов с целью использования в тормозных системах применяется метод трения по схеме «штифт – диск». Исследование посвящено анализу влияния компонентов (волокон, связующих, модификаторов трения и наполнителей) на свойства фрикционных композиционных материалов тормозных систем. Экспериментально изучены два состава: базальтовое волокно с карбонатом кальция и арамидное волокно с сульфатом бария. **Результаты и обсуждение:** результаты исследования свидетельствуют об эффективности использования базальтового волокна с карбонатом кальция и арамидного волокна с сульфатом бария в качестве компонентов фрикционных композитов тормозных систем. Показано, что данные материалы обеспечивают высокие показатели износостойкости и фрикционных характеристик. Подчеркивается потенциал дальнейшей оптимизации составов для повышения экологичности и улучшения эксплуатационных свойств тормозных систем. Полученные результаты также подчеркивают важность выбора компонентов для разработки безопасных и экологически устойчивых фрикционных композитов.

Для цитирования: *Кейт Н., Кулкарни А.П., Дама Й.Б.* Сравнительная оценка трения и износа альтернативных материалов, используемых для производства фрикционных композиционных материалов тормозных систем // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 29–42. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-29-42.

Введение

Тормозные системы – ключевой элемент безопасности автомобилей, обеспечивающий остановку и безопасное управление. Их эффективность имеет решающее значение для обеспечения безопасности пассажиров и других

***Адрес для переписки**
Кулкарни Атул П., профессор
Институт информационных технологий Вишвакармы,
Кондва (Бадрек), Пуне – 411048,
Махараштра, Индия
Тел.: 91-2026950419, **e-mail:** atul.kulkarni@viit.ac.in

участников дорожного движения. В дисковых тормозных системах эффективность торможения определяется трением между тормозной колодкой и диском. Следовательно, выбор подходящих материалов для фрикционных композитов тормозных накладок является определяющим фактором достижения высоких тормозных характеристик [1]. Фрикционные композиты тормозных накладок состоят из волокон, связующих, модификаторов трения и наполнителей, определяющих их важнейшие трибологические свойства [2, 3]. Для предотвращения интенсивного износа и ухудшения фрикционных характеристик необходим тщательный подбор материалов [4, 5].

Эволюция безасбестовых фрикционных композитов

Асбест благодаря своим превосходным фрикционным и износостойким свойствам традиционно используется в качестве основного компонента тормозных накладок. Однако из-за серьезных рисков для здоровья его применение было ограничено [6, 7]. В последние годы активно разрабатываются альтернативные материалы для замены асбеста [8–10].

Основываясь на применении металлических наполнителей, Кумар и Биджве (Kumar и Bijwe) [11] исследовали влияние рабочих параметров на трение во фрикционных композитах. В исследовании проанализированы фрикционные характеристики безасбестового органического композита при динамически изменяющихся давлении и скорости. Было установлено, что медный порошок эффективно снижает чувствительность фрикционных свойств к изменению рабочих параметров. Дальнейшие исследования подчеркнули важность понимания зависимости фрикционных свойств от состава композита и позволили определить способы повышения эффективности и долговечности фрикционных материалов [12]. Бханудас Баччхав с соавторами (Bhanudas Bachchhav et al.) [13] изучали износостойкость безасбестовых фрикционных материалов при скольжении по диску из серого чугуна. Результаты исследования позволили получить информацию о скорости износа материалов и облегчить выбор подходящих фрикционных материалов для тормозных систем [10–13].

Армирующие компоненты во фрикционных композитах

Введение армирующих компонентов улучшает механические и трибологические свойства фрикционных композитов [1]. Прахбу с соавторами (Prabhu et al.) исследовали влияние армирования бимодальными частицами. Композиты, армированные муллитом, продемонстрировали более высокие характеристики, чем композиты с кремнеземным наполнителем [14].

Абразивные компоненты во фрикционных композитах

Выбор абразивных компонентов играет решающую роль в определении износостойкости фрикционных композитов. Тедж Сингх и Амар Патнаик (Tej Singh и Amar Patnaik) [15] исследовали влияние различных абразивов на эффективность безасбестовых фрикционных материалов. Экспериментально было установлено, что фрикционные композиты, содержащие оксид алюминия, обладают более высокими эксплуатационными характеристиками. Результаты исследования предоставляют ценные сведения для выбора абразивных компонентов при разработке высокоэффективных безасбестовых фрикционных композиционных материалов [3–5].

Новые материалы для фрикционных композитов тормозных накладок

Недавние исследования демонстрируют преимущества включения новых материалов в состав тормозных композитов [10–13]. Властимил Матейка (Vlastimil Matějka) [16] оценил влияние g-C3N4 на формирование бессвинцовых фрикционных композитов тормозных колодок. Проведены обширные исследования по разработке эффективных безасбестовых материалов [15–19]. Введение высокопрочных компонентов и оптимизированных абразивов демонстрирует перспективу улучшения трибологических свойств [20–22]. Использование инновационных материалов, таких как графитовый нитрид углерода (g-C3N4), открывает возможности для разработки экологичных и высокоэффективных материалов тормозных колодок [3–17]. Трибологические испытания по схеме «штифт – диск» позволяют оценить износ, трение и долговечность, определяя пригодность материалов для использования в тормозных системах [23–25].

Представленное исследование вносит вклад в развитие знаний о фрикционных композитах тормозных накладок посредством анализа предшествующей литературы, фокусируясь на их фрикционных свойствах и износостойкости и предлагая альтернативные композиционные решения для тормозных систем. Результаты работы также определяют перспективы дальнейших исследований в области оптимизированного выбора фрикционных материалов для применения в тормозных системах.

Обзор литературы

Состав фрикционных материалов тормозных накладок

Фрикционные материалы, используемые в автомобильных тормозных накладках, представляют собой сложные смеси, которые состоят из множества компонентов, предназначенных для обеспечения необходимых фрикционных свойств и износостойкости. Их можно классифицировать на четыре основные группы:

– связующие – обеспечивают когезию всех остальных ингредиентов;

– армирующие волокна – повышают прочность матрицы композита;

– модификаторы трения – обеспечивают требуемый уровень смазки, стабилизируют коэффициент трения и регулируют формирование трибологических пленок на поверхности контакта;

– наполнители – в основном используются для снижения себестоимости композита и частичной модификации характеристик фрикционного материала [2, 3].

На рис. 1 схематично представлены ключевые функции основных компонентов фрикционного композита тормозной накладки. Выбор каждого ингредиента определяется необходимостью соответствия его свойств предъявляемым функциональным требованиям.

Волокна

Волокна играют важнейшую роль в составе фрикционных материалов тормозных накладок, обеспечивая необходимую прочность и долговечность в условиях высоких нагрузок, возникающих при торможении. Введение армирующих волокон способствует повышению общей прочности материала [3]. При выборе волокон для композитов тормозных колодок учитываются такие характеристики, как высокая прочность, стабилизация трения, износостойкость, низкая теплопроводность, шумопоглощение и совместимость со связующими [7]. В качестве армирующих волокон в составе тормозных колодок могут использоваться арамидные и базальтовые волокна. Арамидные волокна, обеспечивающие высокую прочность и износостойкость, оптимальны для условий интенсивного торможения. Базальтовые волокна благодаря исключительной термостойкости рекомендованы для высокотемпературных режимов торможения [9, 10].

Наполнители

Наполнители – важные компоненты фрикционных композитов, способствующие снижению

Рис. 1. Ключевые функции основных компонентов фрикционных композитов тормозных систем

Fig. 1. Key roles of crucial components of brake friction composites

шума и вибраций, а также повышению износостойкости. Введение наполнителей позволяет улучшить эксплуатационные характеристики фрикционных композитов тормозных колодок. К числу наиболее распространенных неорганических наполнителей относятся карбонат кальция, вспученный вермикулит, слюда, сульфат бария, каолиновая глина и титанаты щелочных металлов. Карбонат кальция ($CaCO_3$) позволяет снизить себестоимость и повысить износостойкость, что увеличивает срок службы тормозных колодок. Данный наполнитель снижает потери материала при торможении и повышает общую износостойкость. Сульфат бария ($BaSO_4$), обладающий высокой термической стабильностью, часто используется в качестве наполнителя, поскольку способен выдерживать экстремально высокие температуры, возникающие в процессе торможения [5–11].

Связующие

Основная функция связующих веществ – обеспечение когезии компонентов композита и адгезии к другим элементам конструкции. Связующие обеспечивают необходимую структурную целостность материала тормозной колодки при воздействии термических и механических нагрузок. Связующее должно обладать хорошей текучестью при прессовании и отверждении для обеспечения равномерного распределения и связывания компонентов. Фрикционные композиты характеризуются хорошей адгезией и высокой термостойкостью, которые обеспечиваются применением полимерных связующих. Выбор типа полимера имеет большое значение для эффективной работы тормозной системы в широком диапазоне условий эксплуатации [2–10].

Модификаторы трения

Модификаторы трения – это добавки, влияющие на характеристики трения и износа тормозных колодок. Модификаторы играют важную роль в регулировании фрикционных свойств, таких как уровень шума, информативность педали тормоза и абразивность (агрессия) по отношению к контртелу. Для обеспечения эффективной работы тормозной системы необходимо поддерживать оптимальное соотношение смазывающих и абразивных компонентов в составе фрикционного материала [2–10].

Графит играет важную роль в снижении износа фрикционных материалов. Он повышает стабильность коэффициента трения в широком диапазоне температур, минимизирует шум и предотвращает проскальзывание, обеспечивая более плавное торможение [3–6].

Выбор оптимальных комбинаций компонентов

На рис. 2 представлены ожидаемые свойства компонентов, определяющие их пригодность для использования во фрикционных композитах тормозных систем.

Для выбора оптимальных комбинаций компонентов фрикционных композиционных мате-

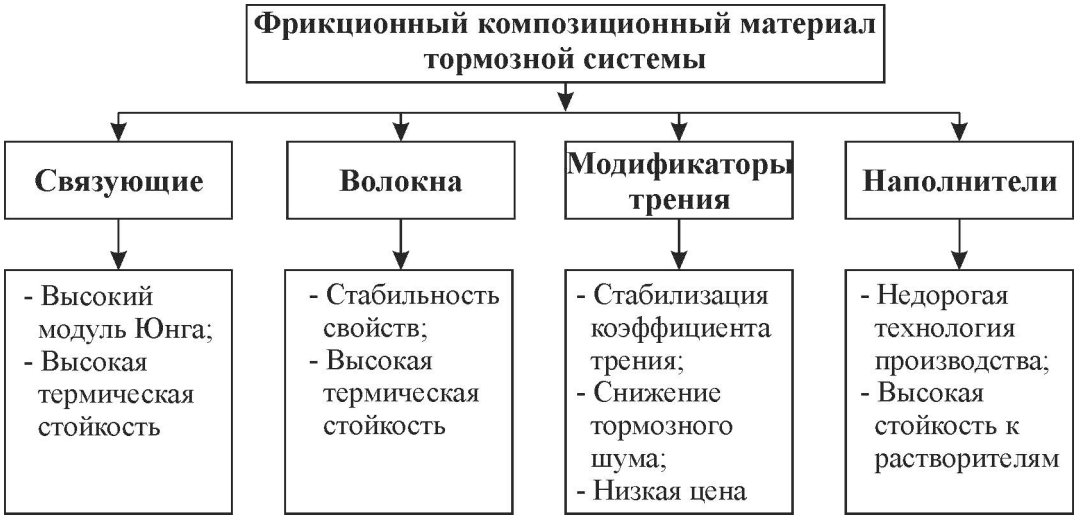


Рис. 2. Ожидаемые свойства компонентов фрикционных композитов тормозных систем

Fig. 2. Expected properties of components in brake friction composites

риалов тормозных накладок существуют следующие критерии:

– высокая эффективность торможения – обеспечение необходимого тормозного усилия, минимизация шума и снижение выбросов пыли и твердых частиц;

– высокая эксплуатационная надежность (долговечность) – устойчивость к износу, высоким температурам и воздействию окружающей среды.

Композиты на основе арамидных волокон с медным наполнителем обладают хорошей эксплуатационной надежностью благодаря высокой износостойкости меди и прочности арамидного волокна. Данная комбинация обеспечивает высокую эффективность торможения, а также снижает шум и выбросы пыли [7]. Использование базальтового волокна в сочетании с карбонатом кальция обеспечивает приемлемый уровень эксплуатационной надежности за счет высокой термостойкости базальта и износостойкости карбоната кальция [8].

На рис. 3, *а* и 3, *б* представлены образцы арамидного и базальтового волокна соответственно. Механические свойства арамидных и базальтовых волокон приведены в табл. 1 [9].

Методы

На основании результатов анализа данных из литературы, а также учитывая роль и свойства компонентов, для проведения экспериментальных испытаний на изнашивание предложены две композиции фрикционных материалов тормозных накладок: ФКТС1 и ФКТС2. Трибологические испытания материалов на трение и износ реализованы по кинематической схеме «штифт – диск». Выбранные составы разработаны с учетом уникальных свойств каждого компонента, что позволяет создать прочный, долговечный, термостойкий и экономичный фрикционный материал. Каждый компонент играет важную роль в обеспечении необходимых характеристик тормозной системы.

а *б*

Рис. 3. Листы арамидного волокна (*а*); листы базальтового волокна (*б*)

Fig. 3. Aramid fiber (*а*); basalt fiber (*б*) Sheets

Таблица 1

Table 1

Механические свойства арамидного и базальтового волокна [22]

Mechanical properties of aramid and basalt [22]

Свойства / Properties	Арамидное волокно / Aramid	Базальтовое волокно / Basalt
Временное сопротивление, ГПа / Tensile strength (GPa)	2,9…3,4	3,0…4,84
Модуль упругости, ГПа / Elastic modulus (GPa)	70…112	79,3…93,1
Плотность, г/см^3 / Density (g/cm^3)	1,43	2,90

Подготовка материалов

1. ФКТС1: базальтовое волокно, наполнитель из карбоната кальция, полимерное связующее, графитовый модификатор трения и балансирующие ингредиенты. Предлагаемый состав на основе предыдущих исследований:

– базальт: 30 масс. %;
– карбонат кальция: 30 масс. %;
– фенольная смола: 20 масс. %;
– графит: 10 масс. %;
– другие наполнители – оксид алюминия: 5 масс. %, медь: 5 масс. %.

2. ФКТС2: арамидное волокно, наполнитель из сульфата бария, полимерное связующее, графитовый модификатор трения и балансирующие ингредиенты. Предлагаемый состав на основе предыдущих исследований:

– арамид: 30 масс. %;
– сульфат бария: 30 масс. %;
– фенольная смола: 20 масс. %;
– графит: 10 масс. %;
– другие наполнители – оксид алюминия: 5 масс. %, медь: 5 масс. %.

Методика испытаний на износ (схема трения «штифт – диск»)

Трибологические испытания по схеме «штифт – диск» широко используются для оценки износостойкости материалов, применяемых в тормозных системах [6, 10, 18]. Суть метода заключается в измерении износа образца (штифта) при скольжении по поверхности вращающегося диска в лабораторных условиях.

На рис. 4 представлена схема установки «штифт – диск», предоставленной компанией Ducom Instruments Pvt. Ltd. Основными элементами установки являются цилиндрический штифт, прижимаемый перпендикулярно к плоскому вращающемуся диску, рычажный механизм для создания нагрузки на штифт, датчик перемещения (LVDT) для измерения износа и датчик силы для измерения силы трения. Датчик перемещения и датчик силы установлены на рычаге [18].

В ходе испытаний нормальная нагрузка (L) на штифт изменялась ступенчато: 10, 50 и 100 Н (стандартные условия испытаний). Размеры образцов штифтов: длина – 32 мм, диаметр – 10 мм. С целью обеспечения сопоставимости результатов для обоих составов, ФКТС1 и ФКТС2, были установлены одинаковые значения пути трения (d) и времени испытания (t). В ходе испытаний регистрировались следующие параметры: сила трения (F), износ, температура в зоне контакта. Полученные данные использовались для дальнейшего расчета трибологических характеристик материалов.

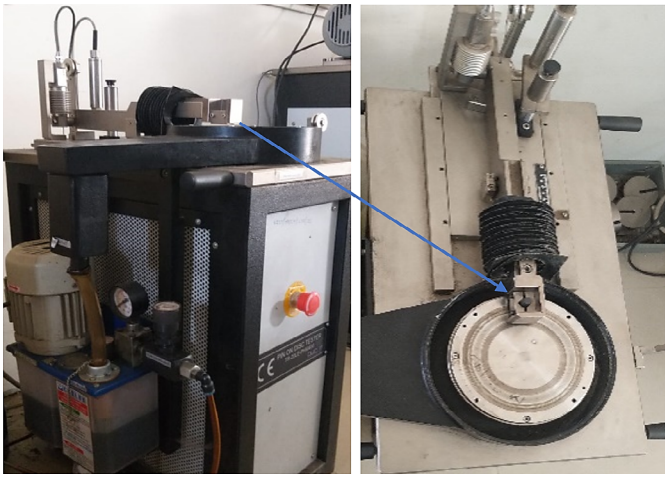


Рис. 4. Общий вид лабораторной установки для трибологических испытаний по схеме «штифт – диск»

Fig. 4. Pin on Disc test setup in laboratory

Коэффициент трения может быть рассчитан по следующему уравнению:

$$\mu = \frac{F}{L}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения материала образца; F – сила трения; L – приложенная нагрузка.

Объем материала цилиндрического штифта рассчитывается по следующему уравнению:

$$V = \pi r^2 h, \quad (2)$$

где V – объем штифта; r – радиус штифта; h – высота штифта.

Скорость изнашивания можно рассчитать по следующему упрощенному уравнению:

$$w = \frac{v_f - v_i}{d}, \quad (3)$$

где V_f – конечный объем штифта после испытания; V_i – начальный объем штифта до испытания; d – путь скольжения.

Эти уравнения позволяют оценить характеристики износа исследуемых материалов и предлагают альтернативные варианты для фрикционных материалов тормозных систем.

Результаты и их обсуждение

После проведения обширных исследований по подбору оптимальных ингредиентов для составов фрикционных материалов тормозных систем для дальнейшего тестирования и оценки были отобраны две ключевые комбинации. Влияние данных ингредиентов на износ композитов было исследовано методом испытания на трение и износ по схеме «штифт – диск».

На рис. 5 представлены основные компоненты тормозного фрикционного композита ФКТС1, а на рис. 6 – основные компоненты тормозного фрикционного композита ФКТС2.

Для оценки эксплуатационных характеристик разработанных композитов использовались результаты испытаний коэффициента трения μ при различных приложенных нагрузках. Оценка тормозных фрикционных композитов проводилась при трех различных нагрузках: 10, 50 и 100 Н.

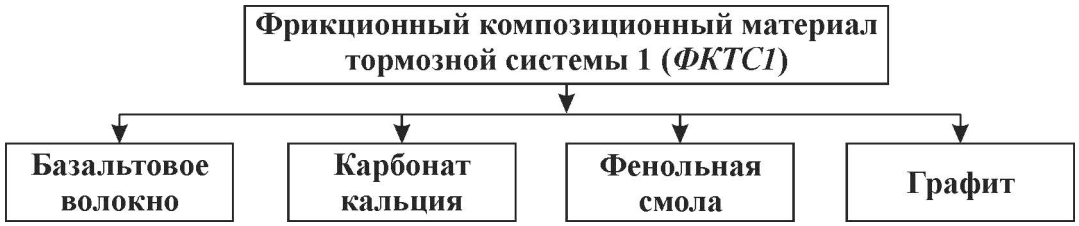


Рис. 5. Основные компоненты ФКТС1

Fig. 5. Major Ingredients of *BFC1*

Рис. 6. Основные компоненты ФКТС2

Fig. 6. Major Ingredients of *BFC2*

В табл. 2 представлены результаты испытаний среднего коэффициента трения μ для ФКТС1 и ФКТС2, а в табл. 3 – результаты испытаний средней потери массы *g* для ФКТС1 и ФКТС2.

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента трения μ от нагрузки для ФКТС1 и ФКТС2, а на рис. 8 – зависимость потери массы *g* от нагрузки для ФКТС1 и ФКТС2.

Общий средний коэффициент трения μ для всех вариантов приложенных нагрузок составил 0,42 для композита ФКТС1 и 0,48 для композита ФКТС2, что соответствует приемлемым значениям согласно инженерным стандартам [19, 20]. Для каждого композита увеличение приложенной нагрузки приводило к увеличению коэффициента трения μ.

Для сравнительной оценки предложенных тормозных фрикционных композитов в табл. 4 представлены значения коэффициента трения и потери массы.

Более высокий коэффициент трения материала ФКТС2, выявленный в результате сравнения, свидетельствует о его большей эффективности в тормозных системах. Большая потеря массы ФКТС1 при испытаниях на износ указывает на его меньшую износостойкость по сравнению с ФКТС2. Более высокий коэффициент трения способствует улучшению тормозных характеристик, а меньшая скорость изнашивания – повышению долговечности тормозных фрикционных композитов.

В качестве эталона ранее были испытаны широко используемые тормозные фрикционные композиты на основе керамического и латунного волокна. В данном эталонном исследовании фрикционный композит на основе керамического волокна показал лучшие результаты, чем

Таблица 2
Table 2

Результаты определения среднего коэффициента трения для композитов ФКТС1 и ФКТС2
Test results for average coefficient of friction of the BFC1 and BFC2

Состав / Composition	Нагрузка, Н / Load (N)	Средний коэффициент трения / Mean coefficient of friction	Средний коэффициент трения μ / Average coefficient of friction 'μ'
ФКТС1 / BFC1	10	0,38	0,42
	50	0,43	
	100	0,46	
ФКТС2 / BFC2	10	0,44	0,48
	50	0,47	
	100	0,52	

Таблица 3
Table 3

Результаты оценки средней потери массы для ФКТС1 и ФКТС2
Test results for average weight loss of the BFC1 and BFC2

Состав / Composition	Нагрузка, Н / Load (N)	Средняя потеря массы, г / Mean weight loss (*g*)	Средняя потеря массы, г / Average weight loss (*g*)
ФКТС1 / BFC1	10	0,042	0,084
	50	0,091	
	100	0,118	
ФКТС2 / BFC2	10	0,006	0,011
	50	0,010	
	100	0,018	

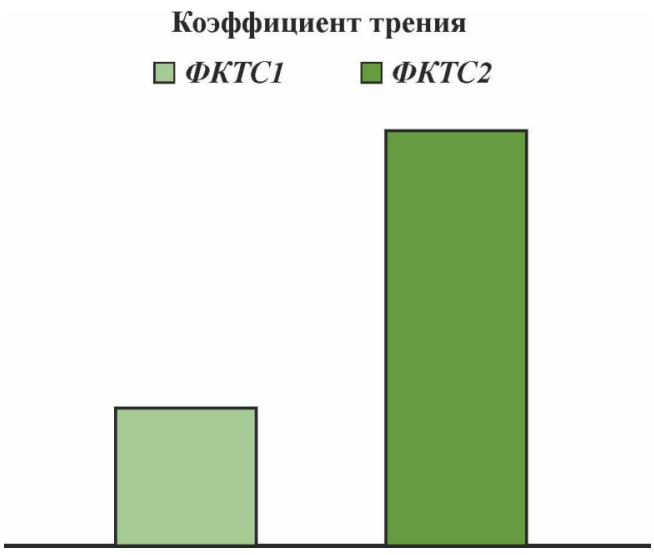


Рис. 7. Коэффициент трения для ФКТС1 и ФКТС2

Fig. 7. Coefficient of friction for the *BFC1* and *BFC2*

Рис. 8. Потеря массы образцов ФКТС1 и ФКТС2 в результате испытаний на износ

Fig. 8. Weight loss of samples for the *BFC1* and *BFC2*

Таблица 4
Table 4

Сравнительный анализ свойств фрикционных композитов тормозных систем
Comparison of properties for the brake friction composites

Свойства / Properties	Состав ФКТС1 / Composition *BFC1*	Состав ФКТС2 / Composition *BFC2*
Коэффициент трения μ / Friction coefficient μ	0,42	0,48
Потеря массы, г / Weight loss (*g*)	0,084	0,011

фрикционный композит на основе латунного волокна. В текущей работе средние коэффициенты трения для материалов ФКТС1 (0,42) и ФКТС2 (0,48) оказались выше, чем у эталонного композита на основе керамического волокна (0,38). ФКТС2 также продемонстрировал более низкую скорость изнашивания по сравнению с эталонным фрикционным композитом на основе керамического волокна.

Арамидные волокна используются во фрикционных материалах благодаря их высокой прочности и износостойкости. Было установлено, что взаимодействие арамидных волокон с наполнителями на основе сульфата бария увеличивает абразивность материала. Известно, что наполнители, такие как карбонат кальция, усиливают адгезионное взаимодействие с контртелом, что повышает трение, но может увеличить и износ [23]. Применение арамидных волокон также способствует снижению общей массы тормозных систем благодаря их низкой плотности, что приводит к повышению топливной эффективности [7, 10, 19]. Введение частиц графита в качестве модификатора трения обеспечивает стабильные фрикционные свойства и высокую износостойкость [3, 19]. Полимерное связующее играет важную роль, обеспечивая надлежащую адгезию различных компонентов, а также обладая высокой термической стабильностью, что необходимо для эффективного торможения [20, 21].

Заключение

Для обеспечения долговечности и безопасности автомобильных тормозных систем применяются высокоэффективные фрикционные композиционные материалы, обладающие улучшенными эксплуатационными характеристиками. Достижение этих характеристик обеспечивается оптимальным выбором и комбинированием компонентов в составе фрикционных композиционных материалов.

Предлагаемый состав ФКТС1 был получен путем смешивания и прессования следующих ключевых ингредиентов: базальтового волокна, наполнителя на основе карбоната кальция, связующего на основе фенолового полимера и графитового модификатора трения. Предлагаемый состав ФКТС2 преимущественно состоял из смеси арамидного волокна, наполнителя на основе сульфата бария, связующего на основе фенолового полимера и графитового модификатора трения. Трибологические испытания данных составов были проведены на установке, реализующей схему «штифт – диск». Сравнительный анализ, основанный на значениях коэффициента трения и скорости изнашивания, позволил сформулировать следующие ключевые выводы.

– Композит ФКТС2, содержащий арамидные волокна, продемонстрировал более высокие фрикционные свойства по сравнению с ФКТС1, что обусловлено более высоким коэффициентом трения, обеспечиваемым арамидными волокнами.

– ФКТС2, содержащий арамидные волокна (обеспечивающие высокую прочность на разрыв и износостойкость) и наполнитель на основе сульфата бария (увеличивающий жесткость и несущую способность), продемонстрировал меньшую потерю массы в процессе трения и, как следствие, меньшую скорость изнашивания по сравнению с ФКТС1, что положительно влияет на эксплуатационную надежность (долговечность) композиционного материала.

– Результаты трибологических испытаний, выполненных в рамках настоящего исследова-

ния, позволяют рекомендовать композиты на основе арамидных и базальтовых волокон в качестве экологически безопасных альтернатив традиционным фрикционным композиционным материалам, применяемым в автомобильных тормозных системах.

– Результаты данного исследования могут быть использованы для дальнейшего совершенствования автомобильных тормозных систем.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются оптимизация составов композиционных материалов для повышения совокупности эксплуатационных характеристик фрикционных тормозных композиционных материалов. Использование результатов данного исследования позволит производителям тормозных систем принимать обоснованные решения при выборе оптимальных компонентов для фрикционных композиционных материалов. Полученные результаты также подтверждают, что разработка фрикционных композиционных материалов – это динамично развивающаяся область, требующая постоянного проведения исследований и внедрения инновационных решений для обеспечения устойчивой безопасности и надежности автомобильных тормозных систем.

Список литературы

1. Tribological performance of brass powder with different copper and zinc content in the brake pad / K.A. Ahmed, S.R. Mohideen, M.A.S. Balaji, B.S. Rajan // Tribology in Industry. – 2020. – Vol. 42 (2). – P. 177–190. – DOI: 10.24874/ti.783.10.19.03.

2. Study of the interaction between microstructure, mechanical and tribo-performance of a commercial brake lining material / A. Sellami, M. Kchaou, R. Elleuch, A.-L. Cristol, Y. Desplanques // Materials & Design. – 2014. – Vol. 59. – P. 84–93. – DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.025.

3. *Österle W., Dmitriev A.I.* The role of solid lubricants for brake friction materials // Lubricants. – 2016. – Vol. 4 (1). – P. 5. – DOI: 10.3390/lubricants4010005.

4. Effect of material selection and surface texture on tribological properties of key friction pairs in water hydraulic axial piston pumps: a review / Y. Liang, W. Wang, Z. Zhang, H. Xing, C. Wang, Z. Zhang, T. Guan, D. Gao // Lubricants. – 2023. – Vol. 11 (8). – P. 324. – DOI: 10.3390/lubricants11080324.

5. *Kumar M., Bijwe J.* Studies on reduced scale tribometer to investigate the effects of metal additives on friction coefficient – temperature sensitivity in brake materials // Wear. – 2010. – Vol. 269 (11–12). – P. 838–846. – DOI: 10.1016/j.wear.2010.08.012.

6. *Saffar A., Shojaei A., Arjmand M.* Theoretical and experimental analysis of the thermal, fade and wear characteristics of rubber-based composite friction materials // Wear. – 2010. – Vol. 269 (1–2). – P. 145–151. – DOI: 10.1016/j.wear.2010.03.021.

7. *Aranganathan N., Mahale V., Bijwe J.* Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests // Wear. – 2016. – Vol. 354. – P. 69–77. – DOI: 10.1016/j.wear.2016.03.002.

8. *McElheny D., Frydman V., Frydman L.* A solid-state 13C NMR analysis of molecular dynamics in aramid polymers // Solid State Nuclear Magnetic Resonance. – 2006. – Vol. 29 (1–3). – P. 132–141. – DOI: 10.1016/j.ssnmr.2005.08.010.

9. *Prasad V.V., Talupula S.* A review on reinforcement of basalt and aramid (Kevlar 129) fibers // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 5993–5998. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.202.

10. Review on the friction and wear of brake materials / X. Xiao, Y. Yin, J. Bao, L. Lu, X. Feng // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8 (5). – DOI: 10.1177/1687814016647300.

11. *Kumar M., Bijwe J.* Composite friction materials based on metallic fillers: sensitivity of μ to operating variables // Tribology International. – 2011. – Vol. 44 (2). – P. 106–113. – DOI: 10.1016/j.triboint.2010.09.013.

12. *Kumar M., Bijwe J.* NAO friction materials with various metal powders: tribological evaluation on full-scale inertia dynamometer // Wear. – 2010. – Vol. 269 (11–12). – P. 826–837. – DOI: 10.1016/j.wear.2010.08.011.

13. *Bachchhav B.D., Hendre K.N.* Wear performance of asbestos-free brake pad materials // Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 16 (4). – P. 459–469.

14. *Prabhu T.R.* Effect of bimodal size particles reinforcement on the wear, friction and mechanical properties of brake composites // Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces. – 2016. – Vol. 10 (4). – P. 163–171. – DOI: 10.1080/17515831.2016.1262587.

15. Performance assessment of phenolic-based non-asbestos organic brake friction composite materials with different abrasives / T. Singh, A. Patnaik, R. Chauhan, I. Bíró, E. Jánosi, G. Fekete // Acta Polytechnica Hungarica. – 2020. – Vol. 17 (5). – P. 49–67. – DOI: 10.12700/APH.17.5.2020.5.3.

16. The role of graphitic carbon nitride in the formulation of copper-free friction composites designed for automotive brake pads / V. Matějka, M. Leonardi, P. Praus, G. Straffelini, S. Gialanella // Metals. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 123. – DOI: 10.3390/met12010123.

17. Effect of space fillers in brake friction composites on airborne particle emission: a case study with $BaSO_4$, $Ca(OH)_2$, and $CaCO_3$ / J. Park, J. Gweon, H. Seo, W. Song, D. Lee, J. Choi, Y.C. Kim, H. Jang // Tribology International. – 2022. – Vol. 165. – P. 107334. – DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107334.

18. Prediction of wear rate of glass-filled PTFE composites based on machine learning approaches / A.R. Deshpande, A.P. Kulkarni, N. Wasatkar, V. Gajalkar, M. Abdullah // Polymers. – 2024. – Vol. 16 (18). – P. 2666. – DOI: 10.3390/polym16182666.

19. Влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом FDM: исследование для имплантата тазобедренного сустава / Й.Б. Дама, Б.Ф. Джоги, Р. Паваде, А.П. Кулкарни // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 19–40. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40.

20. *Hendre K., Bachchhav B.* Tribological behavior of non-asbestos brake pad material // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38. – P. 2549–2554. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.560.

21. Mechanical and wear behavior of LM25 aluminium matrix hybrid composite reinforced with boron carbide, graphite and iron oxide / V. Suresh, P. Vikram, R. Palanivel, R.F. Laubscher // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5 (14). – P. 27852–27860. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.023.

22. *Sethupathi P.B., Chandradass J., Saibalaji M.A.* Comparative study of disc brake pads sold in Indian market – impact on safety and environmental aspects // Environmental Technology & Innovation. – 2021. – Vol. 21. – P. 101245. – DOI: 10.1016/j.eti.2020.101245.

23. *Chowdhury I.R., Pemberton R., Summerscales J.* Developments and industrial applications of basalt fibre reinforced composite materials // Journal of Composites Science. – 2022. – Vol. 6 (12). – P. 367. – DOI: 10.3390/jcs6120367.

24. Effect of basalt fibers for reinforcing resin-based brake composites / X. Zhao, J. Ouyang, H. Yang, Q. Tan // Minerals. – 2020. – Vol. 10 (6). – P. 490. – DOI: 10.3390/min10060490.

25. Influence of binder on thermomechanical and tribological performance in brake pad / B.S. Rajan, M.A.S. Balaji, K. Sathickbasha, P. Hariharasakthisudan // Tribology in Industry. – 2018. – Vol. 40 (4). – P. 654–669. – DOI: 10.24874/ti.2018.40.04.12.

26. High frictional stability of braking material reinforced by basalt fibers / K. Yu, X. Shang, X. Zhao, L. Fu, X. Zuo, H. Yang // Tribology International. – 2023. – Vol. 178. – P. 108048. – DOI: 10.1016/j.triboint.2022.108048.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

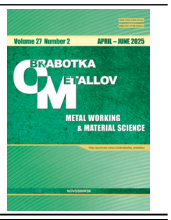
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 2 pp. 29–42
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-29-42

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



A comparative evaluation of friction and wear in alternative materials for brake friction composites

Naren Kate [1, a], *Atul Kulkarni* [1, b, *], *Yogiraj Dama* [2, c]

[1] Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Maharashtra, Pune - 411048, India
[2] Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Lonere, Raigad, Maharashtra, 402103, India

[a] https://orcid.org/0009-0001-1502-8570, naren.kate@viit.ac.in; [b] https://orcid.org/0000-0002-6452-6349, atul.kulkarni@viit.ac.in;
[c] https://orcid.org/0009-0008-5404-4347, yogirajdama@dbatu.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 17 January 2025
Revised: 17 February 2025
Accepted: 17 March 2025
Available online: 15 June 2025

Keywords:
Non-Asbestos alternatives
Brake friction materials
composite
Wear
Pin-on-disc testing

ABSTRACT

Introduction: this study examines research and development efforts aimed at developing non-asbestos brake friction composites (*BFCs*) to improve the safety and performance of automotive brake systems. The evolution of *BFCs* from asbestos-based materials to safer alternatives is studied, and an analysis is performed to develop alternative material combinations. The critical roles of key components — fibers, binders, friction modifiers and fillers — in creating durable brake friction composites for brake systems is emphasized. A composite material based on basalt fiber with calcium carbonate filler is compared to a composite material based on aramid fiber with barium sulfate filler through pin-on-disc tribological testing. Based on the test results, it is determined that the alternative composite materials show promise for application in brake systems. This work also provides a foundation for further development of eco-friendly brake friction composites by selecting optimal formulations. The present work defines an approach for subsequent research aimed at varying the components and their ratios in the creation of composite materials. This research will further improve the functionality of automotive brake systems. **Purpose of the work:** this research is focused on the development of non-asbestos brake friction composites (*BFCs*) with the goal of improving the safety and performance of automotive brake systems. Eco-friendly alternatives to asbestos are investigated, and the roles of fibers, binders, friction modifiers, and fillers are analyzed. The objective of the research is to identify optimal formulations for creating durable, sustainable brake materials, paving the way for further implementation of innovative solutions in practice. **Methods of investigation:** a pin-on-disc tribological method is used to evaluate wear, friction, and durability, as well as to assess the suitability of the developed materials for use in brake systems. This research is dedicated to analyzing the influence of components (fibers, binders, friction modifiers, and fillers) on the properties of friction composites for brake systems. Two compositions were experimentally studied: basalt fiber with calcium carbonate and aramid fiber with barium sulfate. **Results and discussion:** the results of the research demonstrate the effectiveness of using basalt fiber with calcium carbonate and aramid fiber with barium sulfate as components in friction composites for brake systems. It is shown that these materials provide high levels of wear resistance and friction performance. The potential for further optimization of compositions to improve eco-friendliness and enhance the operational properties of braking systems is emphasized. The obtained results also highlight the importance of component selection for the development of safe and sustainable brake friction composites.

For citation: Kate N., Kulkarni A.P., Dama Y.B. A comparative evaluation of friction and wear in alternative materials for brake friction composites. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 29–42. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-29-42. (In Russian).

References

1. Ahmed K.A., Mohideen S.R., Balaji M.A.S., Rajan B.S. Tribological performance of brass powder with different copper and zinc content in the brake pad. *Tribology in Industry*, 2020, vol. 42 (2), pp. 177–190. DOI: 10.24874/ti.783.10.19.03.

*** Corresponding author**
Kulkarni Atul P., Professor
Vishwakarma Institute of Information Technology,
Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk),
Pune - 411048, Maharashtra, India
Tel.: 91-2026950419, **e-mail:** atul.kulkarni@viit.ac.in

2. Sellami A., Kchaou M., Elleuch R., Cristol A.L., Desplanques Y. Study of the interaction between microstructure, mechanical and tribo-performance of a commercial brake lining material. *Materials & Design*, 2014, vol. 59, pp. 84–93. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.025.

3. Österle W., Dmitriev A.I. The role of solid lubricants for brake friction materials. *Lubricants*, 2016, vol. 4 (1), p. 5. DOI: 10.3390/lubricants4010005.

4. Liang Y., Wang W., Zhang Z., Xing H., Wang C., Zhang Z., Guan T., Gao D. Effect of material selection and surface texture on tribological properties of key friction pairs in water hydraulic axial piston pumps: a review. *Lubricants*, 2023, vol. 11 (8), p. 324. DOI: 10.3390/lubricants11080324.

5. Kumar M., Bijwe J. Studies on reduced scale tribometer to investigate the effects of metal additives on friction coefficient – temperature sensitivity in brake materials. *Wear*, 2010, vol. 269 (11–12), pp. 838–846. DOI: 10.1016/j.wear.2010.08.012.

6. Saffar A., Shojaei A., Arjmand M. Theoretical and experimental analysis of the thermal, fade and wear characteristics of rubber-based composite friction materials. *Wear*, 2010, vol. 269 (1–2), pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.wear.2010.03.021.

7. Aranganathan N., Mahale V., Bijwe J. Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests. *Wear*, 2016, vol. 354, pp. 69–77. DOI: 10.1016/j.wear.2016.03.002.

8. McElheny D., Frydman V., Frydman L. A solid-state 13C NMR analysis of molecular dynamics in aramid polymers. *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*, 2006, vol. 29 (1–3), pp. 132–141. DOI: 10.1016/j.ssnmr.2005.08.010.

9. Prasad V.V., Talupula S. A review on reinforcement of basalt and aramid (Kevlar 129) fibers. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (2), pp. 5993–5998. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.202.

10. Xiao X., Yin Y., Bao J., Lu L., Feng X. Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8 (5). DOI: 10.1177/1687814016647300.

11. Kumar M., Bijwe J. Composite friction materials based on metallic fillers: sensitivity of μ to operating variables. *Tribology International*, 2011, vol. 44 (2), pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.09.013.

12. Kumar M., Bijwe J. NAO friction materials with various metal powders: tribological evaluation on full-scale inertia dynamometer. *Wear*, 2010, vol. 269 (11–12), pp. 826–837. DOI: 10.1016/j.wear.2010.08.011.

13. Bachchhav B.D., Hendre K.N. Wear performance of asbestos-free brake pad materials. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 2022, vol. 16 (4), pp. 459–469.

14. Prabhu T.R. Effect of bimodal size particles reinforcement on the wear, friction and mechanical properties of brake composites. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 2016, vol. 10 (4), pp. 163–171. DOI: 10.1080/17515831.2016.1262587.

15. Singh T., Patnaik A., Chauhan R., Bíró I., Jánosi E., Fekete G. Performance assessment of phenolic-based non-asbestos organic brake friction composite materials with different abrasives. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2020, vol. 17 (5), pp. 49–67. DOI: 10.12700/APH.17.5.2020.5.3.

16. Matějka V., Leonardi M., Praus P., Straffelini G., Gialanella S. The role of graphitic carbon nitride in the formulation of copper-free friction composites designed for automotive brake pads. *Metals*, 2022, vol. 12 (1), p. 123. DOI: 10.3390/met12010123.

17. Park J., Gweon J., Seo H., Song W., Lee D., Choi J., Kim Y.C., Jang H. Effect of space fillers in brake friction composites on airborne particle emission: a case study with $BaSO_4$, $Ca(OH)_2$, and $CaCO_3$. *Tribology International*, 2022, vol. 165, p. 107334. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107334.

18. Deshpande A.R., Kulkarni A.P., Wasatkar N., Gajalkar V., Abdullah M. Prediction of wear rate of glass-filled PTFE composites based on machine learning approaches. *Polymers*, 2024, vol. 16 (18), p. 2666. DOI: 10.3390/polym16182666.

19. Dama Y., Jogi B., Pawade R., Kulkarni A. Vliyanie napravleniya pechati na kharakter iznosa PLA-biomateriala, poluchennogo metodom FDM: issledovanie dlya implantata tazobedrennogo sustava [Impact of print orientation on wear behavior in FDM printed PLA Biomaterial: Study for hip-joint implant]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 19–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40.

20. Hendre K., Bachchhav B. Tribological behavior of non-asbestos brake pad material. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pp. 2549–2554. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.560.

21. Suresh V., Vikram P., Palanivel R., Laubscher R.F. Mechanical and wear behavior of LM25 aluminium matrix hybrid composite reinforced with boron carbide, graphite and iron oxide. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (14), pp. 27852–27860. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.023.

22. Sethupathi P.B., Chandradass J., Saibalaji M.A. Comparative study of disc brake pads sold in Indian market – impact on safety and environmental aspects. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 21, p. 101245. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101245.

23. Chowdhury I.R., Pemberton R., Summerscales J. Developments and industrial applications of basalt fibre reinforced composite materials. *Journal of Composites Science*, 2022, vol. 6 (12), p. 367. DOI: 10.3390/jcs6120367.

24. Zhao X., Ouyang J., Yang H., Tan Q. Effect of basalt fibers for reinforcing resin-based brake composites. *Minerals*, 2020, vol. 10 (6), p. 490. DOI: 10.3390/min10060490.

25. Rajan B.S., Balaji M.A.S., Sathickbasha K., Hariharasakthisudan P. Influence of binder on thermomechanical and tribological performance in brake pad. *Tribology in Industry*, 2018, vol. 40 (4), pp. 654–669. DOI: 10.24874/ti.2018.40.04.12.

26. Yu K., Shang X., Zhao X., Fu L., Zuo X., Yang H. High frictional stability of braking material reinforced by Basalt fibers. *Tribology International*, 2023, vol. 178, p. 108048. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.108048.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).