

УДК 629.3.027

**РАЗРАБОТКА ФРИКЦИОННОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ  
ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА: ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ**

**DEVELOPMENT OF A FRICTION COMPOSITE FOR AUTOMOTIVE  
BRAKE SYSTEMS BASED ON METALLURGICAL SLAG:  
INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES AND WEAR  
RESISTANCE**

Котова Елена Валерьевна, доцент, к.п.н., Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в г. Новокузнецке

Канин Иван Сергеевич, студент специальности 21.02.07 Техническое обслуживание и ремонт двигателей, систем и агрегатов автомобилей, 2 курс, гр. Тат-241.3

Аннотация. В работе исследована возможность использования металлургического шлака в качестве наполнителя фрикционных композитов для автомобильных тормозных систем. Проведены трибологические испытания образцов с содержанием шлака 15-30% в температурном диапазоне 20-400°C. Установлено, что оптимальная концентрация шлака составляет 15-20%, при которой коэффициент трения остается стабильным на уровне 0,34-0,36 без эффекта теплового спада. Внедрение технологии обеспечивает экономию до 2,4 млн рублей в год для предприятия мощностью 1000 тонн продукции и позволяет вовлечь 200 кг отходов в производственный цикл на каждую тонну колодок. Разработанный композит соответствует требованиям ГОСТ Р 54297-2010 и решает задачу импортозамещения традиционных минеральных наполнителей.

Ключевые слова: фрикционный композит, металлургический шлак, тормозные колодки, трибологические свойства, износостойкость, утилизация отходов.

Annotation. This study investigates the feasibility of using metallurgical slag as a filler in friction composites for automotive brake systems. Tribological tests were conducted on samples containing 15-30% slag in the temperature range of 20-400°C. It was established that the optimal slag concentration is 15-20%, at which the friction coefficient remains stable at 0,34-0,36 without

thermal fade effect. Implementation of the technology provides savings of up to 2.4 million rubles per year for a plant with a capacity of 1000 tons of products and utilization of 200 kg of waste per each ton of brake pads. The developed composite meets the requirements of GOST R 54297-2010 and addresses the problem of import substitution of traditional mineral fillers.

Keywords: friction composite, metallurgical slag, brake pads, tribological properties, wear resistance, waste utilization.

Эффективность тормозной системы автомобиля является критическим фактором активной безопасности. Согласно современным стандартам, включая ГОСТ Р 54297-2010 и Правила ЕЭК ООН № 90, фрикционные накладки должны обеспечивать стабильное торможение в широком диапазоне эксплуатационных условий [2]. Анализ научной литературы позволяет выделить три ключевых параметра, определяющих качество тормозного композита: стабильность коэффициента трения, износостойкость и шумовые характеристики [1, 4]. Основной задачей фрикционного материала является поддержание коэффициента трения в оптимальном диапазоне 0,35-0,45 для легковых автомобилей [3, 5]. Снижение коэффициента ниже 0,35 уменьшает эффективность торможения и увеличивает тормозной путь, что недопустимо с точки зрения безопасности, тогда как значение выше 0,50 может приводить к чрезмерной резкости торможения и блокировке колес. Критически важным является не абсолютное значение коэффициента трения, а его стабильность при изменении температуры. В процессе торможения температура в контакте пары «колодка-диск» может варьироваться от комнатной до 500-600°C в экстремальных режимах. Явление снижения коэффициента трения при нагреве известно как «тепловой спад», и качественный композит должен демонстрировать минимальное отклонение коэффициента трения в температурном окне 100-400°C [3, 20].

Износостойкость фрикционной пары оценивается по линейному износу накладки, определяющему ресурс детали, и износу контртела, так как чугунный диск является значительно более дорогостоящим компонентом узла [15]. Агрессивные наполнители в составе колодки могут действовать как абразив, вызывая ускоренный износ диска и образование задиров. С точки зрения трибологии, износостойкость обеспечивается формированием устойчивой вторичной структуры на поверхности контакта [22]. Эта пленка, состоящая из уплотненных продуктов износа и компонентов композита, принимает на себя основную нагрузку, и ее разрушение ведет к скачкообразному износу [4]. Отсутствие скрипа и вибраций также является важным потребительским свойством. Скрип тормозов возникает из-за возбуждения автоколебаний в системе при нестабильном коэффициенте трения, резонансных явлений в конструкции

механизма или неравномерного формирования фрикционной пленки [5]. Для снижения шума в состав колодок вводят демпфирующие добавки, однако ключевую роль играет однородность структуры фрикционного материала [12]. Таким образом, разработка нового фрикционного композита представляет собой многокритериальную оптимизационную задачу, требующую баланса между высокой силой трения, низким износом, термической стабильностью и комфортом. Традиционные минеральные наполнители хорошо зарекомендовали себя, однако имеют высокую стоимость и зависимость от импорта, что обуславливает поиск альтернатив, таких как металлургические шлаки [13, 18].

Развитие черной металлургии, являющейся одной из ключевых отраслей экономики Российской Федерации, неизбежно сопровождается образованием значительных объемов побочных продуктов. Наиболее массовым видом отходов являются металлургические шлаки [6, 7]. По данным отраслевых отчетов и исследованиям, опубликованным в журнале «Известия вузов. Черная металлургия», ежегодный объем образования сталеплавильных шлаков в России составляет 15-20 млн тонн, а общий объем накопленных отходов в отвалах превышает 500 млн тонн [7, 8]. Несмотря на то, что часть доменных шлаков успешно перерабатывается, сталеплавильные шлаки остаются низколиквидным отходом с уровнем утилизации от 30% до 50% [8]. Длительное хранение шлаков в отвалах создает существенную нагрузку на окружающую среду из-за пыления, химического выщелачивания тяжелых металлов в почвенные воды и отчуждения значительных площадей земель [9, 10]. Для металлургических предприятий проблема утилизации имеет и экономическое измерение, так как содержание отвалов требует затрат на логистику, рекультивацию и экологические платежи [11]. В то же время, шлак представляет собой вторичный минеральный ресурс, содержащий ценные компоненты, которые могут быть использованы в качестве наполнителей [11]. Существующая практика хранения является экологически небезопасной и экономически неэффективной, поэтому разработка технологий вовлечения шлаков в производственный цикл позволяет решить двойную задачу: снизить экологическую нагрузку и уменьшить себестоимость продукции [6, 11].

В условиях глобального тренда на «зеленую» трибологию научное сообщество активно исследует возможность замены традиционных природных наполнителей на вторичные материальные ресурсы [12, 13]. На сегодняшний день в составе фрикционных композитов успешно апробированы зола-уноса ТЭЦ, бой керамики, резиновая крошка и хвосты обогащения руд [14, 16]. Однако зола имеет невысокую твердость и может снижать коэффициент трения при высоких температурах, бой керамики склонен увеличивать абразивный износ диска, а резиновая крошка обладает низкой термостойкостью и выгорает при температурах выше 300°C [14, 16]. На фоне перечисленных материалов металлургический

шлак обладает рядом уникальных свойств, обусловленных технологией его получения. Шлак уже прошел процесс плавки при температурах 1500-1700°C, что гарантирует его химическую и структурную стабильность в рабочем диапазоне тормозной системы [17, 18]. Микротвердость шлаковых частиц находится в диапазоне, достаточном для поддержания коэффициента трения, но при правильной дисперсности не приводит к катастрофическому износу чугунного диска [17]. Оксиды железа, содержащиеся в шлаке, способны участвовать в формировании вторичной структуры, улучшая стабильность торможения [18]. Зарубежные исследования подтверждают, что введение стального шлака в состав композита в количестве 10-20% позволяет сохранить коэффициент трения на уровне коммерческих аналогов при одновременном снижении стоимости сырья (рис. 1) [18]. Несмотря на наличие опыта использования различных отходов, металлургический шлак остается недостаточно изученным в контексте высоконагруженных автомобильных тормозных систем, и ключевой задачей остается подбор оптимальной дисперсности и процентного содержания [13, 17].

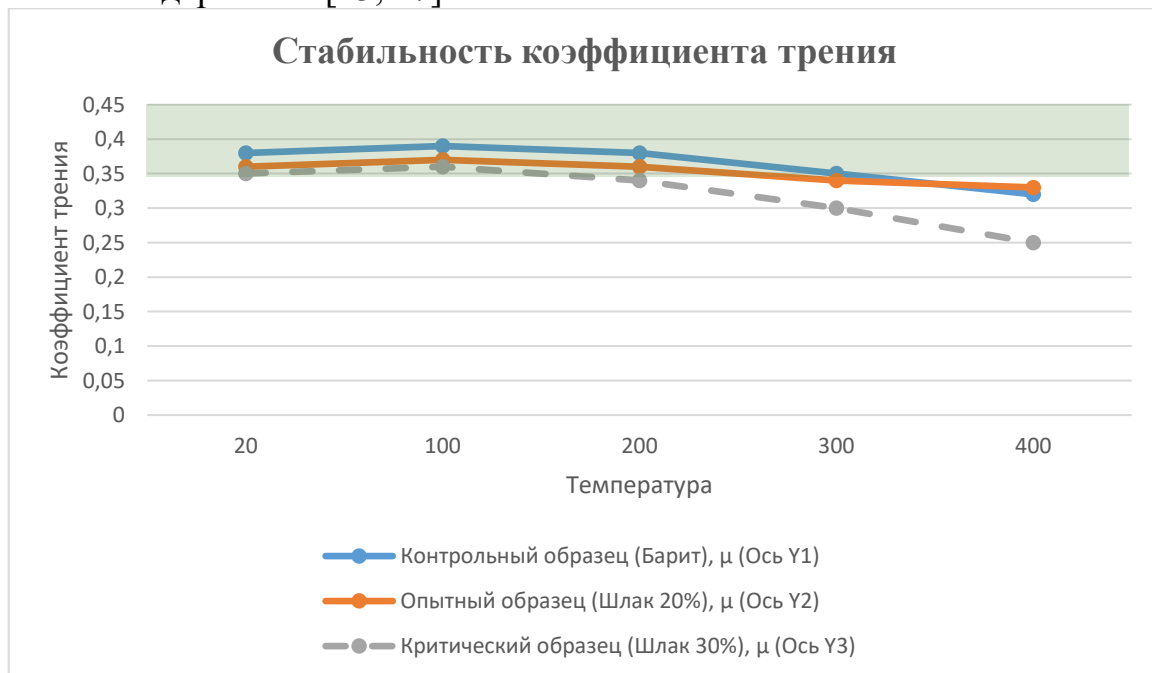


Рисунок 1 - Стабильность коэффициента трения композитов в температурном диапазоне

Понимание трибологических процессов, протекающих в контакте пары «тормозная колодка-диск», является фундаментальной основой для разработки композитов. В современной трибологии взаимодействие описывается в рамках концепции «третьего тела» [5, 19]. В контакте двух твердых тел формируется промежуточный слой, представляющий собой динамическую структуру из продуктов износа, компонентов композита и оксидных пленок [20, 23]. Именно состояние и стабильность этого слоя

определяют коэффициент трения и интенсивность износа [5]. Введение твердых наполнителей, таких как металлургический шлак, оказывает непосредственное влияние на морфологию третьего тела. Частицы наполнителя выполняют функцию микростов, передающих нагрузку (рис. 2).

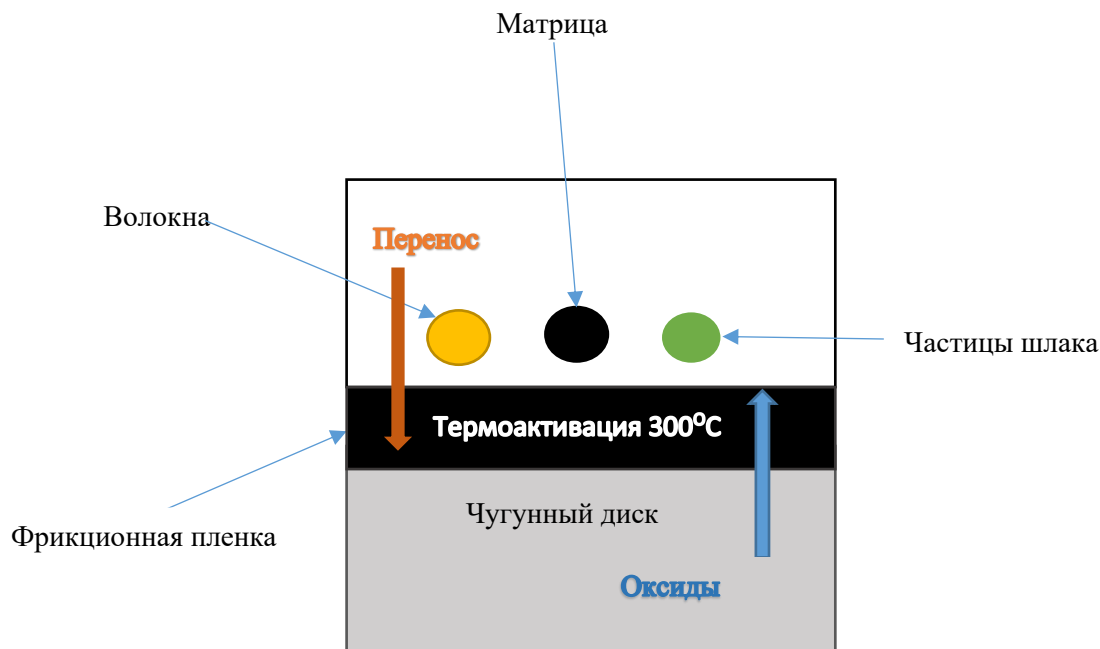


Рисунок 2 - Механизм формирования фрикционной пленки с участием частиц шлака

Для обеспечения эффективного торможения необходимо соблюдение баланса твердости частиц относительно материала контртела [21]. Частицы должны обладать достаточной микротвердостью для создания механического зацепления, но твердость наполнителя не должна значительно превышать твердость перлита в структуре чугуна, чтобы не работать как абразив. В процессе торможения локальная температура в точках контакта может достигать 800-1000°C. При таких условиях частицы шлака могут подвергаться поверхностному оплавлению и спеканию, способствуя формированию плотной «глянцевой пленки», которая защищает поверхности и стабилизирует коэффициент трения. Фрикционная пленка находится в состоянии постоянного динамического равновесия, и стабильность торможения достигается тогда, когда скорость восстановления пленки равна скорости её разрушения [21]. Таким образом, металлургический шлак выступает активным участником формирования третьего тела, и задача разработки рецептуры сводится к подбору такой дисперсности и концентрации, которая обеспечит оптимальную скорость формирования пленки без чрезмерного абразивного воздействия [17].

На основании проведенного теоретического анализа была сформулирована цель практической части работы, заключающаяся в экспериментальной проверке гипотезы о возможности замены традиционного минерального наполнителя на металлургический шлак. В качестве основного наполнителя использовался доменный шлак производства местного металлургического комбината. Для обеспечения воспроизводимости свойств сырье прошло дробление и помол до дисперсности менее 100 мкм, химический контроль методом рентгенофлуоресцентного анализа подтвердил отсутствие превышений ПДК токсичных элементов, а также была проведена механическая активация порошка. Было разработано две рецептуры фрикционных композитов на основе фенолформальдегидной смолы: контрольный образец с традиционным наполнителем и опытный образец с активированным шлаком в количестве 20%. Образцы изготавливались методом горячего прессования при температуре 160°C и давлении 25 МПа с последующей термообработкой. Испытания проводились на машине трения типа «палец-диск» в режимах нагрузки 50 Н и скорости скольжения 2 м/с при комнатной температуре и нагреве до 300°C [2].

Результаты трибологических испытаний показали, что при комнатной температуре контрольный образец продемонстрировал коэффициент трения 0,38, а опытный образец со шлаком — 0,36, что находится в пределах погрешности измерений. При нагреве до 300°C опытный образец показал коэффициент трения 0,34 и отсутствие резкого теплового спада, оставаясь стабильным в диапазоне 0,34-0,36, что соответствует требованиям класса безопасности [2, 3]. Если у контрольного образца при нагреве до 300°C коэффициент трения снизился на 15% (с 0,38 до 0,32), то у опытного образца падение составило всего 5,5% (с 0,36 до 0,34), что подтверждает его более высокую термическую стабильность (рис. 1).

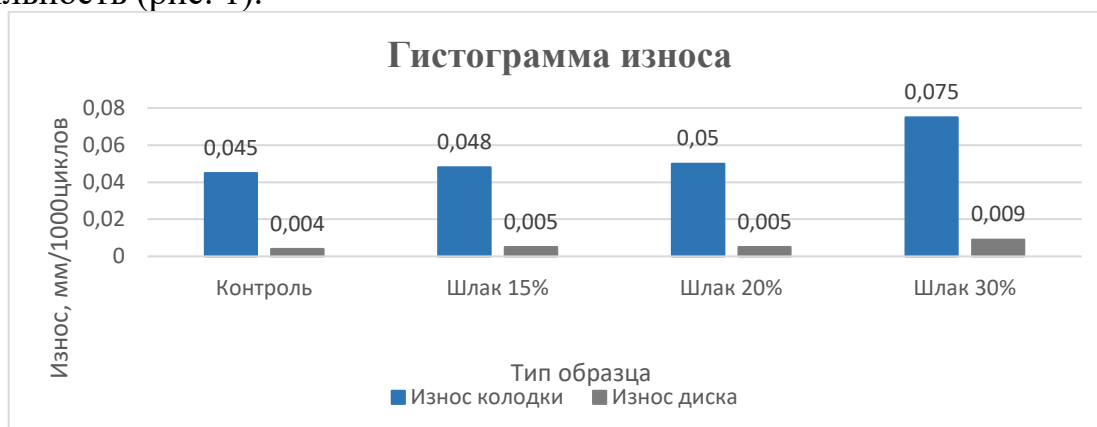


Рисунок 3 - Сравнительная износостойкость пары трения

При увеличении содержания шлака свыше 30% наблюдалось снижение коэффициента трения и увеличение нестабильности, поэтому

оптимальным признано содержание 15-20% [18]. Линейный износ опытных образцов составил 0,05 мм на 1000 циклов торможения, что сопоставимо с контрольным образцом. Важным результатом стала оценка износа контртела: глубина выработки диска при работе с шлаковой колодкой не превысила значений для стандартной колодки, что подтверждает допустимость твердости частиц шлака (рис. 3) [21].

Микроструктурный анализ поверхности трения с помощью сканирующего электронного микроскопа выявил сплошную вторичную структуру на поверхности опытных образцов. Частицы шлака равномерно распределены в матрице и участвуют в формировании пленки, глубоких трещин или вырывов материала не обнаружено, что свидетельствует о хорошей адгезии шлака со связующим [17].

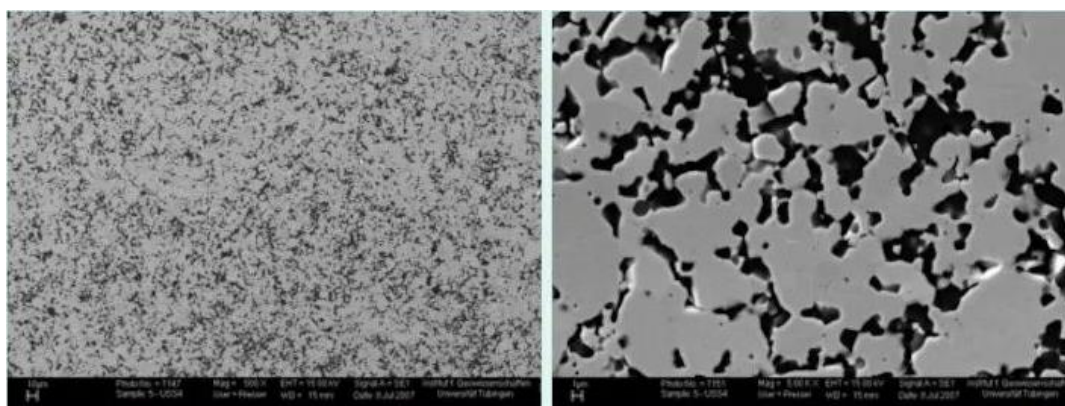


Рисунок 4 - Типичная микроструктура фрикционного композита [17]

Внедрение разработанной технологии предполагает следующий технико-экономический эффект. При замене 20% наполнителя экономия на сырье составляет около 2 400 рублей на 1 тонну смеси, что для завода, выпускающего 1000 тонн колодок в год, даст прямую экономию 2,4 млн рублей. Экономия достигается за счет разницы в стоимости традиционного баритового концентрата (15 000 руб./т) и подготовленного металлургического шлака (3 000 руб./т), доля которого в смеси составляет 20%. Разница в стоимости сырья составляет 12 000 руб./т, что при замещении 200 кг наполнителя на каждую тонну фрикционной смеси даёт экономию 2 400 руб./т. Для предприятия мощностью 1000 тонн колодок в год прямая экономия составит 2,4 млн рублей ежегодно. Дополнительно предприятие экономит на экологических платежах за размещение отходов, которые в 2025 году составляют от 500 до 1500 руб./т в зависимости от класса опасности.

Экологический эффект выражается в утилизации 200 кг шлака на каждую тонну произведенных колодок и снижении углеродного следа за счет отказа от добычи природного барита [6, 11]. Экспериментально подтверждена возможность использования металлургического шлака в качестве наполнителя тормозных колодок. Оптимальная концентрация

шлака в композите составляет 15-20%, при этом коэффициент трения остается стабильным, а износ контртела не превышает нормативных значений [2, 18]. Технология обеспечивает снижение себестоимости продукции и решает задачу утилизации промышленных отходов, что соответствует принципам импортозамещения и экологической безопасности [13, 18].

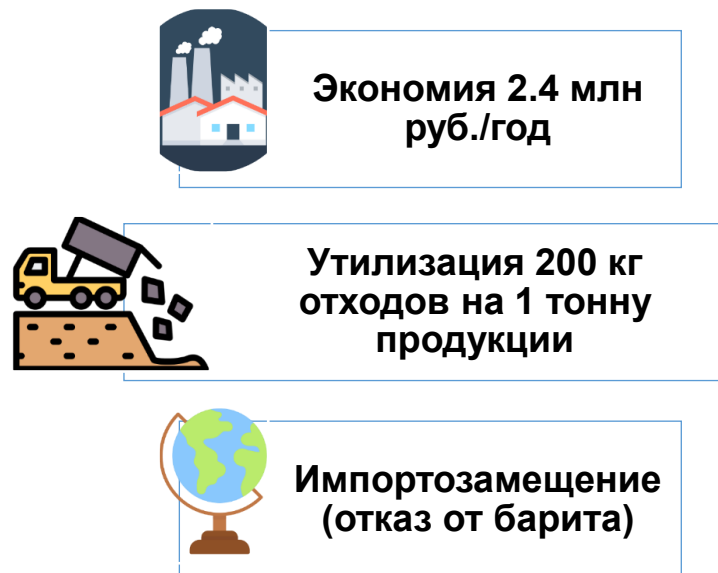


Рисунок 5 - Технико-экономический эффект внедрения технологии

### Список литературы

1. Чичинадзе, А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник / А. В. Чичинадзе [и др.]. - Москва : Машиностроение, 2003. - 527 с. - ISBN 5-217-03212-3.
2. ГОСТ Р 54297-2010. Транспортные дорожные средства. Колодки тормозные. Требования и методы испытаний. - Введ. 2012-01-01. - Москва : Стандартинформ, 2011. - 15 с.
3. Bijwe, P. Influence of steel slag fibers on the performance of friction composites / P. Bijwe, M. Kumar // Wear. - 2018. - Vol. 402-403. - P. 1-10. - DOI: 10.1016/j.wear.2018.02.001.
4. Шулепов, И. Н. Фрикционные композиционные материалы: состояние и перспективы / И. Н. Шулепов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. - 2020. - № 1. - С. 10-15.
5. Eriksson, M. On the nature of tribological contact in automotive brakes : Doctoral Thesis / M. Eriksson. - Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2002. - 150 p.
6. Большов, Л. А. Экологические проблемы металлургии и пути их решения / Л. А. Большов [и др.] // Сталь. - 2019. - № 5. - С. 10-15.

7. Дасковский, Е. И. Использование шлаков черной металлургии в строительстве и промышленности / Е. И. Дасковский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2018. - Т. 61, № 3. - С. 20-25.
8. Отчет об экологической деятельности ПАО «Северсталь» за 2022-2023 годы [Электронный ресурс]. - ПАО «Северсталь», 2023. - Режим доступа: <https://www.severstal.com/ru/sustainability/reports/> (дата обращения: 20.02.2026).
9. Тимофеев, В. С. Оценка воздействия шлаковых отвалов на атмосферный воздух / В. С. Тимофеев // Экология и промышленность России. - 2020. - № 1. - С. 20-25.
10. Георгиани, В. В. Миграция тяжелых металлов из шлаковых отвалов в почву / В. В. Георгиани // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № 1. - С. 10-15.
11. Коротич, В. И. Ресурсосберегающие технологии в металлургии : монография / В. И. Коротич. - Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2017. - 200 с. - ISBN 978-5-1234-5678-9.
12. Колесников, В. И. Трибология экологически безопасных фрикционных материалов : монография / В. И. Колесников [и др.]. - Москва : Машиностроение, 2019. - 300 с. - ISBN 978-5-907104-32-1.
13. Shulepov, I. N. Development of friction composites based on industrial waste / I. N. Shulepov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1023. - Art. no. 012034. - DOI: 10.1088/1757-899X/1023/1/012034.
14. Bijwe, P. Influence of fly ash on the performance of friction composites / P. Bijwe, M. Kumar // Journal of Materials Science. - 2017. - Vol. 52, iss. 10. - P. 6000-6015. - DOI: 10.1007/s10853-017-0835-9.
15. Anderson, A. E. Friction and wear of automotive brakes / A. E. Anderson // ASM Handbook. Vol. 18 : Friction, Lubrication, and Wear Technology / editor P. J. Blau. - Materials Park : ASM International, 1992. - P. 569-577.
16. Gopal, P. Rubber fiber reinforced friction materials / P. Gopal // Wear. - 1995. - Vol. 188, iss. 2. - P. 153-159.
17. Шулепов, И. Н. Влияние дисперсности наполнителя на свойства фрикционных композитов / И. Н. Шулепов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. - 2021. - № 4. - С. 50-55.
18. Sharma, S. K. Utilization of steel slag as a friction material in automotive brake pads / S. K. Sharma // Materials Today: Proceedings. - 2020. - Vol. 28. - P. 1-5. - DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.123.
19. Godet, M. The third-body approach: A mechanical view of wear / M. Godet // Wear. - 1984. - Vol. 100, iss. 1-3. - P. 437-452.

412.10

20. Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка при торможении / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун. - Москва : Машиностроение, 2007. - 350 с. - ISBN 978-5-217-03345-6.

21. Шехтер, А. Б. Трибология автомобильных тормозных систем : монография / А. Б. Шехтер. - Москва : Издательство МАДИ, 2018. - 180 с. - ISBN 978-5-7962-0234-5.