

Научная статья
УДК 629.3.02-592

Исследование влияния состава фрикционного слоя тормозных колодок на интенсивность изнашивания и тепловые показатели в зоне трения

Самар Ибрахим¹, Алексей Александрович Пегачков²

^{1,2}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹Samaribrahim548@gmail.com

²pegachkov@yandex.ru

Аннотация Состав фрикционного слоя тормозных колодок играет ключевую роль в обеспечении заданных производителями параметров тормозных систем. Известно, что в процессе эксплуатации тормозные колодки подвергаются значительным механическим и тепловым нагрузкам, что приводит к их постепенному износу, и что самое важное – к изменению значения коэффициента трения между диском и фрикционным слоем тормозной колодки.

Целью данных исследований является изучение и оценка влияния различных компонентов фрикционного слоя на износостойкость и показатели термостойкости тормозных колодок. Полученные результаты позволят оптимизировать состав тормозных колодок с целью повышения эффективности тормозных систем, а также с целью увеличения их ресурса.

Ключевые слова: тормозная система, параметры, тормозные колодки, фрикционный слой, компоненты, износ, коэффициент трения, тепловые характеристики, состав, компоненты, материалы, эффективность торможения.

Для цитирования: Ибрахим С., Пегачков А.А. Исследование влияния состава фрикционного слоя тормозных колодок на интенсивность изнашивания и тепловые показатели в зоне трения // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

Original article

Investigation of the effect of the composition of the friction layer of brake pads on the wear rate and thermal parameters in the friction zone

Samar Ibrahim¹, Aleksey A. Pegachkov²

^{1,2}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹Samaribrahim548@gmail.com

²pegachkov@yandex.ru

Abstract. The composition of brake pads friction layer plays the key role in ensuring the parameters of brake systems specified by manufacturers. It is known that brake pads are subjected to significant mechanical and thermal loads, which leads to their gradual wear, and most importantly, to a change in the coefficient of friction between the disc and the friction layer. The purpose of these studies is to investigate and evaluate the effect of various components of the friction layer on the wear resistance and heat resistance of brake pads. The results obtained will make it possible to optimize the composition of brake pads in order to increase the efficiency of brake systems, as well as to increase their durability.

Keywords: brake system, parameters, brake pads, friction layer, components, wear, friction coefficient, thermal characteristics, composition, components, materials, braking efficiency.

For citation: Ibrahim S., Pegachkov A.A. Investigation of the effect of the composition of the friction layer of brake pads on the wear rate and thermal parameters in the friction zone. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 1 (43).

Введение

Тормозные колодки автомобиля, а если быть еще более точным – их фрикционный слой, является одним из важнейших компонентов тормозных систем, поскольку именно от его характеристик зависит не только эффективность торможения, но и безопасность на дороге. Известно, что состав фрикционного слоя оказывает значительное влияние на такие параметры, как износостойкость, тепловые характеристики и долговечность тормозных систем [1, 2, 10].

Современные требования к тормозным колодкам включают не только необходимость достижения высокой эффективности торможения, обеспечение минимального износа, а также способность выдерживать высокие температуры и нагрузки, соответствуя задачным характеристикам по уровню шума. Для выполнения этих требований, необходимо провести исследования и оценить, как различные компоненты, входящие в состав фрикционного слоя влияют на износ и тепловые характеристики тормозных колодок [2, 3, 4, 5].

В итоге, все вышеуказанные требования напрямую связаны с составом фрикционного слоя тормозных колодок [2, 5, 6].

При этом, каждый компонент фрикционного материала оказывает различное влияние на износостойкость и тепловые характеристики тормозных колодок:

Асбест. Ранее асбест использовался для повышения коэффициента трения и улучшения теплопроводности фрикционного слоя. Однако, его использование было ограничено из-за того, что мелкие частицы асбеста являются канцерогенными и опасными для человеческого организма, несмотря на высокую эффективность в снижении износа. В современных материалах асбест заменяется на более безопасные компоненты [11, 12].

Кевлар. Волокнистый материал с высокой прочностью и устойчивостью к износу. Кевлар помогает значительно улучшить износостойкость фрикционного слоя, но его высокая стоимость ограничивает использование в массовом производстве. Этот материал также способствует стабилизации коэффициента трения при высоких температурах.

Графит. Графит и его разновидности (микрографит, нанографит) играют важную роль в улучшении теплопроводности и снижении износа. Они обеспечивают равномерное распределение тепла по поверхности фрикционного слоя, предотвращая перегрев и поддерживая стабильный коэффициент трения при различных температурных режимах. Микрографит и нанографит позволяют достичь высокой износостойкости при более низком тепловом напряжении [6].

Медь. Медь добавляется для повышения теплопроводности тормозных колодок. Медь способствует быстрому рассеиванию тепла, что снижает вероятность перегрева фрикционного слоя и улучшает его долговечность, особенно при интенсивных торможениях.

Высоколегированные стали. Эти компоненты повышают прочность и износостойкость фрикционного слоя, а также улучшают его устойчивость к механическим повреждениям и коррозии. Включение высоколегированных сталей в состав фрикционного материала позволяет достичь высокой термостойкости и устойчивости к физическому износу.

Кроме того, современный фрикционный слой тормозных колодок может включать в себя различные волокна и абразивные материалы, такие как стекловолокно или углеродное волокно, которые увеличивают прочность и износостойкость. Эти компоненты помогают улучшить механические характеристики и устойчивость к нагрузкам, особенно при многократных и длительных циклах торможений [6, 8, 9].

Процесс смешивания этих материалов при производстве тормозных колодок осуществляется с использованием механического смешивания и термического прессования, что позволяет обеспечить равномерное распределение компонентов и улучшить их взаимодействие [10, 11]. Итоговым результатом является фрикционный слой, который эффективно выдерживает высокий уровень нагрузок и температуру, не теряя своих заданных рабочих характеристик.

Таким образом, влияние компонентов фрикционного слоя тормозных колодок на их износ и тепловые характеристики и зависит от множества факторов, в том числе от сочетания используемых материалов. Дальнейшее изучение этого влияния позволит оптимизировать состав фрикционного слоя тормозных колодок с целью повышения их эффективности и долговечности.

Методика проведения эксперимента

Целью экспериментальных исследований являлась оценка как состава фрикционного слоя в целом, так и его отдельных компонентов тормозных колодок на износ и тепловые характеристики [5, 8]. Испытания проводились с целью оптимизации состава по двум критериям: скорости износа

фрикционного слоя и температуры в зоне трения. Основная цель исследований – найти пути снижения скорости износа а также повысить теплопроводность фрикционного слоя за счет применения оптимальных компонентов.

Экспериментальные исследования проводилось на лабораторной машине трения М-22П, которая позволяет измерять коэффициент трения, размер износа, а также температуру в зоне трения (рис. 1) На рис. 1 представлен общий вид лабораторной машины трения М-22П, а на рис. 2 – 3D-модель узла трения машины трения М-22П.



Рис. 1. Общий вид лабораторной машины трения М-22П

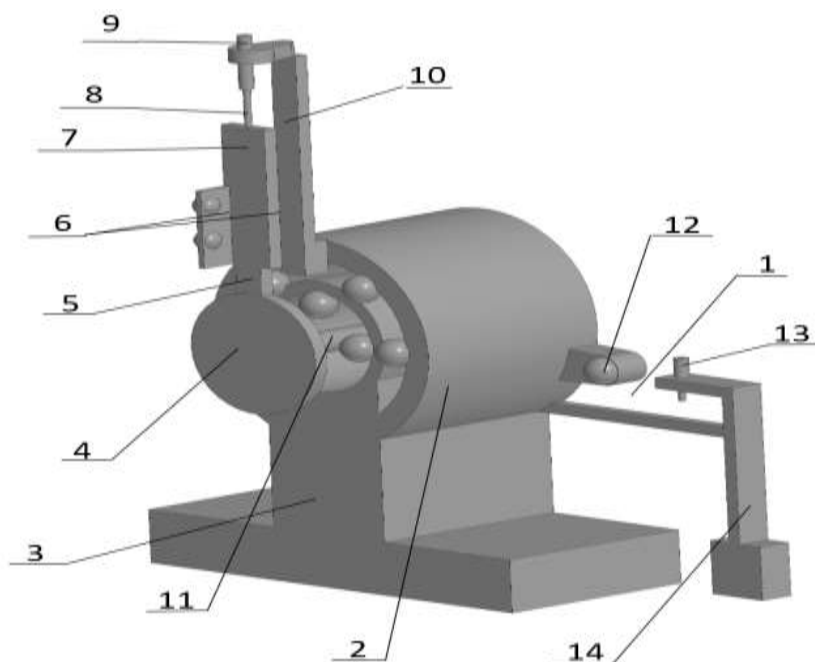


Рис. 2. 3D-модель узла трения машины трения М-22П, где:
1 – динамометрическая пружина; 2 – каретка; 3 – корпус; 4 – подвижный образец;
5 – неподвижный образец; 6 – направляющие; 7 – суппорт; 8 – стержень; 9 – датчик
линейных перемещений; 10 – кронштейн каретки; 11 – вал; 12 – упор каретки;
13 – датчик линейных перемещений; 14 – стойка.

Для проведения эксперимента было выбрано четыре типа тормозных колодок, отличающихся базовым составом фрикционного слоя [6]:

1. Керамические – включают керамические волокна и абразивные частицы.
2. Полуметаллические – содержат металлические порошки и частицы, включая стальную вату и медный порошок.
3. Безасбестовые органические (NAO) – содержат волокнистые структуры, включая арамидные волокна и стекловолокно.
4. Углеродные – состоят из смеси углерода, металлических волокон и керамики.

Образцы для проведения испытаний на машине трения были изготовлены из тормозных колодок различных типов.

Отметим, что все образцы имели одинаковые размеры и одинаковую площадь фрикционного слоя, равную 1 см². Данные размеры образцов были

определены в соответствии с требованиями лабораторной машины трения М-22П, описанных в ГОСТ 26614-85.

При этом, размеры (длина, ширина, высота) образцов были выбраны таким образом, чтобы обеспечивать корректное взаимодействие с диском трения и гарантировать воспроизводимость результатов. Процентное содержание базовых компонентов в исследуемых образцах приведены в Табл. 1.

Таблица 1

Состав фрикционного слоя испытуемых образцов

Тип тормозных колодок	Компонент	Процентное содержание %
Керамические колодки	Керамические волокна	20-30
	Наполнители (сульфат бария, карбонат кальция)	10-20
	Фенольные смолы	10-15
	Модификаторы трения (графит, оксиды металлов)	10-20
	Цветные металлы (медь, цинк)	5-10
	Оксиды алюминия	5-10
	Различные добавки (частицы резины)	2-5
Металлические колодки	Металлические компоненты (стальная вата, железный порошок)	30-70
	Графит	10-20
	Абразивы (металлические оксиды)	5-10
НАО (безасбестовые органические) колодки	Органические волокна (стекловолокно)	10-30
	Наполнители (частицы резины)	10-20
	Модификаторы трения (графит, молибден)	10-20
	Металлические частицы (медь)	5-10
Углеродные материалы	Углеродные волокна	20-40
	Графитовый углерод	10-20
	Углеродно-керамическая матрица	30-50
	Термореактивные смолы	5-15
	Металлические и стальные частицы	5-15
	Оксиды кремния	5-10

Отметим, что в испытаниях принимали участие по три образца каждого типа колодок, вырезанных на гидроабразивном станке.

Дополнительно поверхность образцов, еще до установки в машину трения притиралась для обеспечения оптимального контакта с диском трения во время испытаний. Это позволило минимизировать погрешности, связанные с неровностями и неоднородностью материала, и обеспечить равномерное распределение нагрузки. Эксперимент проводился на лабораторной машине трения М-22П, имитирующей рабочие условия тормозной системы.

Далее приведем поэтапный процесс испытаний:

1. Перед каждым циклом испытаний контролировалась и фиксировались как масса, так и геометрические размеры образцов.
2. Перед началом каждого этапа эксперимента проводилась настройка начальных условий давления и скорости вращения диска.
3. Размеры каждого образца фиксировались с помощью микрометра, полученные данные фиксировались в журнале испытаний.
4. Испытуемый образец закреплялся на фрикционном диске испытательной установки, при этом проверялась надежность фиксации для предотвращения вибраций или проскальзывания.
5. Запускался мотор машины трения (на первом этапе проводится плавный запуск, чтобы избежать ударных нагрузок), далее образец вступал в контакт с вращающейся поверхностью при заданной скорости и нагрузке [8].
6. В процессе испытаний устройство автоматически фиксировало ключевые параметры каждые 5 секунд, включая продолжительность испытаний, температуру фрикционного слоя, коэффициент трения, нагрузку и пройденное расстояние.
7. После завершения испытаний образец извлекался, после чего повторно измерялись его геометрические параметры. Разница в измерениях с

начальными показателями позволяет оценить размер износа фрикционного слоя.

8. Для обеспечения воспроизводимости результатов, испытания повторялись для трех образцов каждого типа. Все собранные данные автоматически сохранялись в программу для сбора информации с целью последующего анализа.

Анализ экспериментальных данных

При анализе данных по износу тормозных колодок были построены регрессионные модели, учитывающие два основных критерия оптимизации – значения износа (y_1) и коэффициента трения (y_2). В процессе создания регрессионного уравнения учитывались следующие факторы – температура в зоне трения (x_2) а также процентное содержание трех ключевых компонентов фрикционного слоя (x_1, x_3, x_4).

Базовое уравнение регрессии для износа можно представить в виде зависимости 1:

$$y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_5x_1 + b_7x_5x_2 + b_8x_5x_3 + b_9x_5x_4 \quad (1)$$

где y_1 – износ образцов, мм;

x_1, x_2, x_3, x_4 – процентное содержание компонентов фрикционного слоя, %;

x_5 – температура в зоне трения, °C;

b_0 – свободный член уравнения регрессии;

b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 – коэффициенты, отражающие влияние отдельных факторов;

b_6, b_7, b_8, b_9 – коэффициенты, определяющие взаимное взаимодействие факторов.

Регрессионный анализ позволяет определить, каким образом изменение состава фрикционного материала в сочетании с различными температурными режимами влияет на износ фрикционного слоя тормозных колодок.

Коэффициенты уравнения были определены на основе экспериментальных данных с помощью программы STATISTICA 13, что обеспечило статистически значимую аппроксимацию зависимости износа от входных параметров [9].

В таблице 2 приведены данные по износу образцов 4-х типов тормозных колодок.

Таблица 2

Износ образцов по результатам проведенных испытаний

Тип тормозных колодок	Номер образца	Высота фрикционного слоя до эксперимента	Высота фрикционного слоя после эксперимента	Износ (мм)
1	1-1	17.58	13.72	3.86
	1-2	17.57	14.78	2.79
	1-3	17.58	14.61	2.97
2	2-1	16.72	16.47	0.25
	2-2	16.72	16.55	0.17
	2-3	16.72	16.57	0.15
3	3-1	15.42	14.29	1.13
	3-2	15.41	14.19	1.22
	3-3	15.42	14.44	0.98
4	4-1	13.51	13.37	0.14
	4-2	13.50	13.37	0.13
	4-3	13.52	13.31	0.21

При обработке результатов экспериментальных исследований в программе STATISTICA 13, далее, как результат, была получена регрессионная зависимость 2 между износом тормозных колодок, температурой и составом фрикционного слоя:

$$y_1 = 0.12 + 3.23 \cdot x_1 - 169.56 \cdot x_2 + 2.59 \cdot x_3 - 7.77 \cdot 10^{-13} x_4 + 6.47 x_5 + 12.25 x_5 \cdot x_1 - 20.08 x_5 \cdot x_2 + 9.80 x_5 \cdot x_3 + 1.42 \cdot 10^{-12} x_5 \cdot x_4 \quad (2)$$

где x_1 – содержание углерода, %; x_2 – содержание металлических компонентов, %, x_3 – содержание керамических частиц, %; x_4 – содержание медного порошка, %, x_5 – температура, °C.

Приведем физическую интерпретацию полученной зависимости:

1. x_1 (содержание углеродных частиц) – увеличивает износ ($3.23 \cdot x_1$), особенно при высокой температуре ($12.25 x_5 \cdot x_1$).
2. x_2 (металлические частицы) уменьшают износ ($-169.56 \cdot x_2$), особенно при высокой температуре ($-20.08 x_5 \cdot x_2$).
3. x_3 (керамические частицы) увеличивают износ ($2.59 \cdot x_3$), а при высокой температуре ещё больше ($9.80 x_5 \cdot x_3$).
4. x_4 (медь) не оказывает значительного влияния (очень малые коэффициенты).
6. x_5 (температура) существенно увеличивает износ ($6.47 \cdot x_5$), особенно в сочетании с углеродом и керамикой.

Выводы

На основании анализа полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные исследования подтверждают, что температура оказывает значительное влияние на скорость износа тормозных колодок. Согласно анализу полученных данных, при повышении температуры на каждые 50°C износ тормозных колодок увеличивается в среднем на 18%, что связано с изменением свойств материалов фрикционного слоя, приводящих к потере механической прочности и ускоренному износу. Особенно подвержены температурному влиянию безасбестовые органические (NAO) и керамические колодки. Керамические колодки, обладая высокой жесткостью, могут становиться хрупкими при резких термических колебаниях, что также

способствует ускоренному износу. Металлические и углеродные колодки, напротив, демонстрируют высокую устойчивость к термическому разрушению за счёт повышенной теплопроводности данных компонентов.

2. Изучено влияние состава фрикционного слоя на износ фрикционного слоя различных типов тормозных колодок, что позволило сделать выводы о возможности использования и эффективности тормозных колодок различных типов, поскольку испытания проводились в идентичных условиях.

В результате, керамические тормозные колодки, а также колодки на основе углеродных волокон показали наименьшие показатели по износу, при этом сохраняя и максимальные показатели по среднему значению коэффициента трения. Металлические и безасбестовые тормозные колодки показали повышенный износ при пониженных средних значениях коэффициента трения

Ниже приведем полученные результаты по тормозным колодкам 4-х типов:

2.1. Наибольшие сравнительные показатели износа зафиксированы у колодок 1-го типа из бесасбестового органического материала (NAO) содержащего органические волокна. Так, например, образец 1.1, за время испытаний потерял 3,86 мм, что составляет более 30% от первоначальной толщины фрикционного слоя и указывает на повышенную пористость и пониженную термостойкость данного материала.

2.2. Керамические тормозные колодки 2-го типа, состоящие из керамических волокон, а также сульфата бария и карбоната кальция и оксидов алюминия показали высокую износостойкость, потеряв не более 1,58% от толщины фрикционного слоя.

2.3 Металлические тормозные колодки 3-го типа, в состав которых входят стальная вата и металлические порошки, что показали умеренный износ потерей всего 9,9%. Так, например, образец 3.2 потерял 1,22 мм, что

значительно меньше, чем у колодок 1-го типа, но больше, чем у углеродных и керамических. Основная причина такой скорости изнашивания связана с тем, что металлические компоненты обеспечивают повышенную механическую прочность, но теряют свою эффективность при повышенных температурах.

2.4. Тормозные колодки 4-го типа, изготовленные из углеродного волокна и углеродно-керамической матрицы, обеспечили самое низкое значение износа, высокую термостойкость и низкий износ. Данные образцы показали наименьшие потери материала, скорость коррозии составила 1,3%, что свидетельствует об их высокой эффективности даже при максимальных тепловых нагрузках (при многократных торможениях).

Так, например, образец 3.1 за время испытаний потерял 0,14 мм, что составляет менее 1,2% от первоначальной толщины фрикционного слоя.

3. Регрессионный анализ полученных данных подтвердил наличие значительной корреляции между температурой и составом тормозных колодок. По результатам исследований можно сделать вывод, что керамические волокна усиливают износ при высоких температурах, что указывает на их склонность к перегреву. При этом, металлические и стальные компоненты, замедляют скорость износа фрикционного слоя, благодаря повышенной теплопроводности и стойкости к термическому разрушению, но до определенных пороговых значений, а керамические и углеродные волокна могут выдерживать более температуры, выше на 200 °С без изменения влияния на коэффициент трения пары между тормозным диском и фрикционным слоем.

4. Для повышения стойкости тормозных колодок к перегреву необходимо использовать материалы с высокой теплопроводностью и термостойкостью, такие как металлические и углеродные волокна. Поэтому, с целью увеличения срока службы тормозных колодок в условиях высоких

температур, планируется увеличить долю керамических компонентов и углеродных волокон в образцах, а также оптимизировать содержание модификаторов трения.

5. Исследования в данной области будут продолжены, полученные данные будут полезны для дальнейшей разработки новых составов фрикционных слоев тормозных автомобильных колодок, в том числе для колодок используемых в зоне температур выше 450 °С.

Список источников

1. Методика и результаты экспериментального определения коэффициентов трения некоторых автомобильных тормозных колодок / Н. В. Хольшев, А. Ю. Конев, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 1(89). – С. 114-124. – DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124. – EDN SOGIJL.
2. Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments / P. Chandra Verma, L. Menapace, R. Ciudin [et al.] // Wear. – 2015. – Vol. 322-323. – P. 251-258. – DOI 10.1016/j.wear.2014.11.019. – EDN SPTKUN.
3. Gawande, Shravan H. Study on wear analysis of substitute automotive brake pad materials / Shravan H. Gawande, Konkala Balashowry // Australian Journal of Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 21(10):1-10. – P. 144-153. – DOI 10.1080/14484846.2020.1831133.
4. Янюшкин, Ю. М. Решение балансовой задачи контактного теплообмена системы тел: тормозная колодка и вращающийся тормозной диск в процессе торможения / Ю. М. Янюшкин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2019. – № 11. – С. 504-507. – EDN YVCXEE.
5. Ибрахим, С. Исследование влияния износа тормозных колодок и дисков на эффективность тормозной системы автомобилей / С. Ибрахим, А. А. Пегачков // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2024. – № 2(40). – EDN APQUZT.
6. Хрусталева, Д. А. Современные материалы и методы исследований трибологических свойств тормозных колодок автомобилей / Д. А. Хрусталева, Н. А. Кабакова, П. Н. Кузнецов // Наука и Образование. – 2023. – Т. 6, № 2. – EDN GNKVPF.
7. ГОСТ Р 50507-93 Изделия фрикционные тормозные. Общие технические требования / Госстандарт России. – Москва : Стандартинформ, 2013.
8. Ибрахим, С. Исследование влияния материалов, используемых во фрикционном слое колодок на показатели эффективности тормозных систем / С. Ибрахим, А. А. Пегачков // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2024. – № 3(41). – EDN KENORR.

9. Вероятностная модель прогнозирования износа тормозных колодок / И. А. Успенский, Н. В. Лимаренко, Е. А. Ракул [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 112-119. – DOI 10.36508/RSATU.2021.91.36.016. – EDN QDXZZE.
10. Кокарев, О. П. Реализация ресурса элементов тормозной системы в эксплуатации / О.П. Кокарев, А. Г. Кириллов // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 3-1(86). – С. 83-90. – DOI 10.33979/2073-7432-2024-3-1(86)-83-90. – EDN OBNXGS.
11. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials / H. Jang, K. Ko, S. J. Kim [et al.] // Wear. – 2004. – Vol. 256, No. 3-4. – P. 406-414. – DOI 10.1016/S0043-1648(03)00445-9. – EDN KHYMZV.
12. Borawski, A. Laboratory Tests on the Possibility of Using Flax Fibers as a Plant-Origin Reinforcement Component in Composite Friction Materials for Vehicle Braking Systems / A. Borawski, D. Szpica, G. Mieczkowski // Materials. – 2024. – Vol. 17, No. 12. – P. 2861. – DOI 10.3390/ma17122861. – EDN AOYANF.

References

1. Khol'shev N.V., Konev A.Yu., Vedishchev S.M., Prokhorov A.V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2023, vol. 20, no. 1(89), pp. 114-124.
2. Chandra Verma P., Menapace L., Ciudin R. et al. *Wear*, 2015, vol. 322-323, pp. 251-258.
3. Shravan H. Gawande, Konkala Balashowry, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 21(10):1-10, pp. 144-153.
4. Yanyushkin Yu. M. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2019, no. 11, pp.504-507.
5. Ibrakhim S., Pegachkov A.A. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2024, no. 2(40).
6. Khrustalev D.A. Kabakova, N.A., Kuznetsov P.N. *Nauka i Obrazovaniye*, 2023, vol. 6, no. 2.
7. Gosstandart of Russia. *Izdeliya friktsionnyye tormoznyye. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya GOST R 50507-93 (Friction brake products. General technical requirements GOST R 50507-93)*, Moscow, Standartinform, 2013.
8. Ibrakhim S., Pegachkov A.A. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2024, no. 3(41).
9. Uspenskiy I.A., Limarenko N.V., Rakul Ye.A. et al. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 112-119.
10. Kokarev O.P., Kirillov A.G. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*, 2024, no. 3-1(86), pp. 83-90.

11. Jang H., Ko K., Kim S.J. et al. *Wear*, 2004, vol. 256, no. 3-4, pp. 406-414.
12. Borawski A., Szpica D., Mieczkowski G. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 12, pp.2861.

Рецензент: Н.И. Баурова, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Ибрахим Самар, магистрант, МАДИ.

Пегачков Алексей Александрович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Information about the authors

Ibrahim Samar, undergraduate, MADI.

Pegachkov Aleksey A., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Статья поступила в редакцию 12.03.2025; одобрена после рецензирования 20.03.2025; принята к публикации 27.03.2025.

The article was submitted 12.03.2025; approved after reviewing 20.03.2025; accepted for publication 27.03.2025.