

Научная статья
УДК 629.3

Исследование влияния материалов, используемых во фрикционном слое колодок на показатели эффективности тормозных систем

Самар Ибрахим¹, Алексей Александрович Пегачков²

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

¹Samaribrahim548@gmail.com

²pegachkov@yandex.ru

Аннотация В процессе торможения на поверхности антифрикционного слоя тормозных колодок возникают несколько видов повреждений, способных при следующих циклах негативно влиять на эффективность торможения. Появление повреждений антифрикционного слоя напрямую зависит от ряда факторов, таких как коэффициент трения, состав антифрикционного слоя, а также наличие в составе армирующих и смазочных материалов.

Целью данного исследования является оценка влияния использования графитсодержащих материалов в антифрикционном слое тормозных колодок на эффективность торможения, которая оценивалась по следующим параметрам: длине тормозного пути, скорости износа, а также по изменению фрикционных свойств тормозных колодок.

Ключевые слова: тормозные колодки, фрикционный слой, износ, трение, микрографит, макрографит, связующее, армирование, длина тормозного пути.

Для цитирования: Ибрахим С., Пегачков А.А. Исследование влияния материалов, используемых во фрикционном слое колодок на показатели эффективности тормозных систем // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 3 (41).

Original article

Influence of materials used in the friction layer of pads on the performance of brake systems

Samar Ibrahim¹, Aleksey A. Pegachkov²

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

¹Samaribrahim548@gmail.com

²pegachkov@yandex.ru

№ 3(41)
сентябрь 2024

Abstract. In the braking process, we can face several types of damage of the anti-friction layer of brake pads which can negatively affect the braking performance during the next braking cycles. The appearance of damage to the anti-friction layer directly depends on a number of factors, such as the coefficient of friction, the composition of the anti-friction layer, as well as the presence of reinforcing and lubricating materials. The purpose of this researches is to assess the effect of the use of graphite-containing materials in the antifriction layer of brake pads on braking efficiency, which was evaluated by the following parameters: braking distance length, wear rate, as well as by changes in the frictional properties of brake pads.

Keywords: brake pads, friction layer, wear, friction, nanographite, micrographite, binder, reinforcement, braking distance length.

For citation: Ibrahim S., Pegachkov A.A. Influence of materials used in the friction layer of pads on the performance of brake systems. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. № 3 (41).

Введение

Тормозные колодки автомобиля, а точнее их фрикционный слой – один из важнейших компонентов тормозных систем. Материалы, используемые в фрикционном слое тормозных колодок должны обладать целым комплексом свойств, в том числе способностью защитить компоненты тормозных систем от высоких температур и перегрева.

Сегодня к автомобильным тормозным колодкам предъявляется ряд следующих требований:

1. *Требования к материалам фрикционного слоя.* Колодки должны быть изготовлены из высококачественных фрикционных материалов, таких как органические, металлические или керамические составляющие. Эти материалы обеспечивают необходимую эффективность торможения и износостойкость.

2. *Требования к значению коэффициента трения.* Коэффициент трения тормозных колодок должен быть стабильным в широком диапазоне температур и в различных эксплуатационных условиях.

3. *Требования к износостойкости.* Тормозные колодки должны обладать высокой износостойкостью, чтобы обеспечивать длительный срок службы и при этом, приводить к минимальному износу тормозных дисков.

4. *Требования по теплостойкости.* Колодки должны выдерживать высокие температуры, возникающие при интенсивных или многократных торможениях, без значительной потери свойств.

5. *Требования с ограничениями по уровню шумов и вибраций.* Колодки должны обеспечивать бесшумность работы тормозной системы.

6. *Конструкторские требования.* Колодки должны быть совместимы с конструкцией тормозных механизмов автомобиля, чтобы обеспечивать эффективную работу всей системы.

7. *Безопасность.* Колодки должны соответствовать всем требованиям безопасности, предъявляемым к конкретному типу автомобиля.

Соблюдение всех вышеперечисленных требований поможет обеспечить надежную, эффективную и безопасную работу тормозной системы автомобиля [1].

На сегодняшний день, фрикционный слой тормозных колодок может включать в себя следующие органические и неорганические материалы:

- *Асбест.* Данный материал считается одним из первых материалов, который стали применять используемых при производстве тормозных колодок. Обеспечивается высокий коэффициент трения, но его использование на сегодняшний день запрещено.

- *Кевлар.* Данный материал с высокой стойкостью к истиранию и прочностью, но при этом, есть недостаток – слишком высокая себестоимость.

- *Графит.* Порошки, содержащие графит, могут использоваться для улучшения теплопроводности и снижения износа колодок. При этом, в зависимости от размера частиц, данные порошки можно отнести к графитам (чешуйчатые или пластинчатые частицы с размером от 0,5 до 1 мм),

микрографитам (частицы неправильной формы размером от 500 до 1 мкм) или нанографитам (сферические частицы размером 100 до 1 нм).

- *Медь*. Данный металл увеличивает теплопроводность и прочность колодок.

- *Высоколегированные стали*. Порошки или проволока, входящая в состав фрикционного слоя повышает прочность, износостойкость и устойчивость к коррозии.

В современных фрикционных слоях тормозных колодок сегодня используются и органические, и минеральные, и абразивные компоненты:

1. Волокна из различных материалов, например, стекловолокно или углеродное волокно, которые придают структуре фрикционного слоя прочность и износостойкость.

2. Абразивные материалы, такие как графит или оксиды металлов, которые помогают улучшить фрикционные свойства.

3. Связующие, такие как смолы и резина, которые помогают связать компоненты и придать композитному слою определенную пластичность.

Отметим, что ингредиенты тщательно смешиваются чаще всего с помощью механического смешивания или термического прессования, что обеспечивает однородное распределение компонентов по толщине фрикционного слоя.

Конечным результатом является тормозная колодка, способная выдерживать высокое давление и температуру в процессе торможения [2, 3].

Отметим, что на поверхности фрикционного слоя возникают различные виды износа, что дало основание для более подробного изучения составляющих компонентов и материалов, с целью повышения износостойкости фрикционного слоя в зависимости от изменения содержания материалов, входящих в их состав.

Методика проведения эксперимента

С целью экспериментального определения эффективности тормозной системы были проведены испытания трех тормозных фрикционных слоев, изготовленных из композиционных материалов, содержащих графит, микрографит и графит, сохраняя остальные материалы в составе. Были подготовлены по пять образцов с различными составами.

При определении влияния различных материалов на эффективность торможения, за основу был принят принцип соотношения масс в процентах от общей массы фрикционного слоя. Содержание порошков, входящих в состав фрикционного слоя образцов приведено в таблице 1.

Таблица 1

Составы изучаемых образцов составами фрикционного слоя

Образец и его состав	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Фенолформальдегидная смола	20	20	20
Медь (порошок)	10	10	10
Оксид алюминия (глинозем)	8	8	8
Составы на основе графита	10% микрографита	10% микрографита	10% графита
Латунь (порошок)	5	5	5
Органическая пыль (кешейю пыль)	10	10	10
Сталь (проволока или вата)	7	7	7
Барит (порошок)	35	35	35

В составе тормозных накладок использовалась фенолформальдегидная смола в качестве связующего, частицы меди в качестве модификатора трения, алюминий в качестве абразива, материалы, содержащие графит в

качестве твердой смазки, стальная проволока (вата) в качестве армирующего материала и порошок барита в качестве наполнителя [4, 5, 6].

Для проведения исследований были изготовлены три различных образца трения, содержащие по 10% микрографита, наногرافита и графита по объему, при условии, что остальные материалы в составе постоянны. Фрикционные свойства полученных образцов исследовались на специальном стенде (рис. 1).

В результате было обнаружено, что фрикционные накладки колодок, содержащие 10% наногرافита, улучшают фрикционную стабильность и устойчивость к изнашиванию.

Перед началом создания образцов, порошковые материалы, состав которых приведены в таблице 1, определялись с помощью весов с точностью до 0,1 г. Взвешенные материалы переносились в камеру смесительного устройства. Для обеспечения однородности смеси перемешивались при 150 об/мин в течение 10 минут.

Экспериментальная установка, приведенная на рисунке 1, использовалась для определения коэффициента трения и значения износа изготовленных образцов.

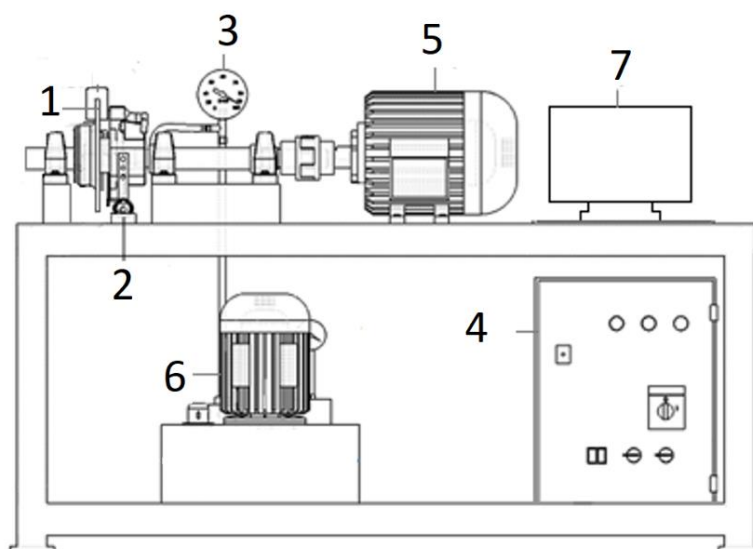


Рис. 1. Устройство для проверки тормозных накладок: 1 – тормозной диск; 2 – тензодатчик; 3 – манометр; 4 – панель управления; 5 – электродвигатель; 6 – гидравлический насос; 7 – ПК и монитор для вывода данных.

Тензодатчик 2 использовался для измерения силы трения между накладкой и тормозным диском во время вращения в экспериментальной установке, где возможно установить скорость вращения диска в пределах от 100 до 1500 об/мин. Дополнительно, с помощью луча бесконтактного инфракрасного термометра с периодичностью каждые 30 секунд проводились измерения температуры в зоне трения. Рабочий диапазон ИК термометра составляет от – 50 до 1000 °С. Основная задача термометра не допустить возможного перегрева контактной зоны.

В эксперименте использовался тормозной диск из серого чугуна твердостью 116 HB (41,86 HRA) диаметром 280 мм.

Изготовленные образцы помещались в испытательное устройство с помощью специальных зажимов, после чего проводилась приработка поверхностей при скорости 3 м/с под давлением 0,7 МПа в течение трех минут (до момента соприкосновения 95% поверхности образца с поверхностью диска).

Испытания проводились при поверхностном давлении 1,05 МПа и скорости, равной 6 м/с. Полученные значения коэффициента трения – это среднее арифметическое значение, полученное для пяти образцов, изготовленных с одинаковым составом смеси. Коэффициент трения для каждого образца регистрировался в течение 10 минут с интервалом в 10 секунд.

Учитывая силу, приложенную к фрикционному слою образцов, коэффициент трения, полученный на устройстве, рассчитывался по формуле, согласно апробированным методикам [7, 8]:

$$\mu = \frac{f_s}{f_n}, \quad (1)$$

где f_s – сила трения (Н); f_n – приложенная нормальная сила, Н.

Нормальную силу f_n можно рассчитать по формуле (2):

$$f_n = P * S \quad (2)$$

где P – давление, приложенное к колодке, Мпа;

S – площадь поверхности фрикционного слоя, мм².

Расчет удельной скорости износа проводился с помощью формулы (3):

$$V = \frac{m_1 - m_2}{2 \cdot \pi \cdot Rn \cdot f_s \cdot \rho} \quad (3)$$

где V – удельная скорость изнашивания, см³/Нм.

R – расстояние между центром накладке и центром диска, мм.

m_1 и m_2 – масса тормозной накладке до и после испытаний, г.

N – частота вращения диска, об/мин

ρ – плотность тормозной накладке (г/см³)

f_s – средняя сила трения (Н).

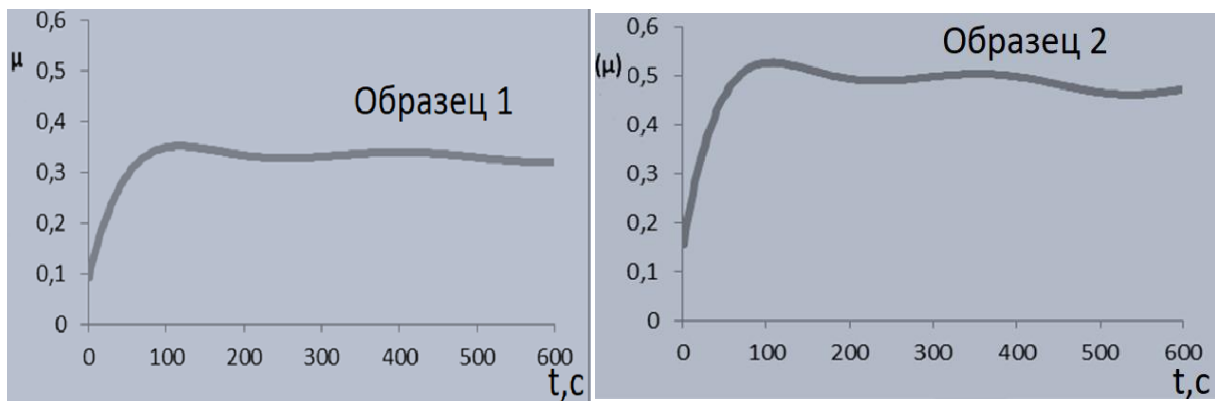
Результаты полученных данных и выводы

Одной из наиболее важных характеристик, предъявляемых к тормозным колодкам, является требование, что изменение коэффициента трения не должно превышать 10%, из-за возможного увеличения температуры поверхности трения [6, 8, 9].

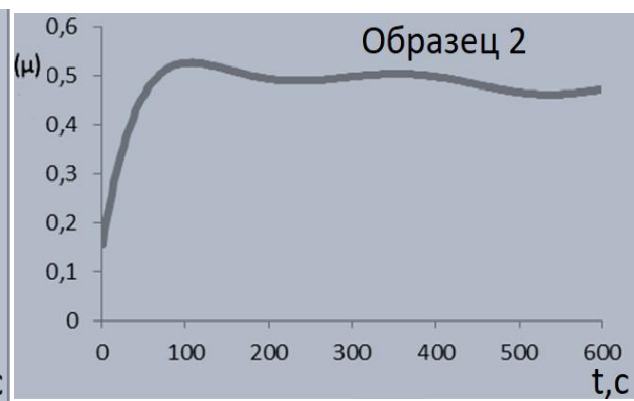
Согласно результатам полученных данных Образец 1, содержащий 10% микрографита по массе, показал среднее наименьшее значение коэффициента трения, равное 0,33. Образец 2, содержащий 10% по массе нанографита, дал среднее самое высокое значение коэффициента трения, равное 0,47.

При исследовании поверхности фрикционного слоя Образца 3 было выявлено, что вся поверхность фрикционного слоя получила повреждения, что повлияло на непрерывность коэффициента трения (0.41) [10,11].

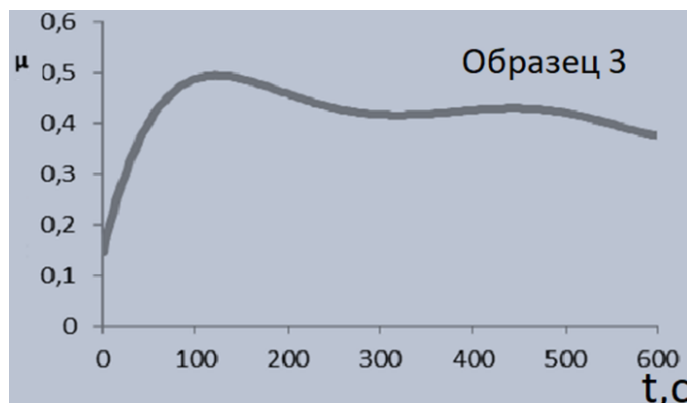
Температура в зоне контакта составляла от 25 °С до 241 °С. Среднее значение коэффициента трения составило 0,33, а стабильность трения – не менее 78%



А.



Б.



В.

Рис. 2. Изменение значений коэффициента трения от времени для образцов 1 (А), 2 (Б) и 3 (В)

При изучении зависимостей, можно увидеть, что у всех образцов наблюдается постоянное, но незначительное снижение коэффициента трения, что связано с постоянным ростом температуры в зоне трения.

Этот факт подтверждает многочисленные выводы исследователей [11, 12, 13, 14], поскольку температура, возникающая в зоне контакта фрикционного слоя и диска, напрямую влияет на стабильность трения.

Фрикционные свойства и физические свойства образцов представлены в таблице 2.

Образец, содержащий 10% наногرافита (Образец 2), показал самые высокие значения коэффициента трения, тогда как образец, содержащий 10% микрографита (Образец 1), показал самые низкие его значения.

Согласно исследованиям [7, 8, 14], значение коэффициента трения в подобных тормозных системах составляет от 0,2 до 0,7.

Таблица 2

Экспериментальные данные, полученные при испытаниях образцов с различными графитсодержащими материалами

Образцы	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Средний коэффициент трения, $\mu_{\text{ср}}$	0.33	0.47	0,41
Удельная скорость износа, (см ³ /нм)	$2.742 \cdot 10^{-6}$	$1.937 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$

Выводы

Использование нанографита положительно повлияло на коэффициент трения при торможении, при этом, скорость износа фрикционного слоя образцов, содержащих микрографит, была значительно выше, чем образцов, содержащих нанографит.

Фрикционные слои, содержащие нанографит, образующиеся на поверхности тормозной накладке, увеличивают сцепление между диском и тормозной накладкой, что увеличивает коэффициент трения, сокращая тормозной путь.

Основной полученный вывод – применение нанографита во фрикционном слое тормозных колодок (не менее 10% от предложенного в таблице 1 состава фрикционного слоя) позволяет получить оптимальные значения коэффициента трения при минимальном удельном износе.

Также можно сделать дополнительный вывод, что на сегодняшний день не существует единственного правильного или оптимального состава при выборе материалов, входящих в состав фрикционного слоя тормозных колодок, поскольку возможно многочисленное количество вариантов

использования материалов и сочетаний этих составляющих в процентах, а для получения достоверных результатов необходимо проводить подобные исследования со всеми вариантами этих сочетаний.

За основной критерий при подборе состава фрикционного слоя можно взять существующие требования к длине тормозного пути или требуемые значения показателей эффективности торможения (ГОСТ Р 41.13-2007), согласно которым состав фрикционного слоя будет дополнительно подбираться еще по ряду характеристик, таких как максимальная температура в зоне контакта, скорость коррозии, уровень шумов и вибраций. Кроме того, необходимо будет учесть и критерии себестоимости.

Исследования в данном направлении будут продолжены, поскольку финальной целью является создание математической модели износа для оптимизации параметров пары трения тормозных колодок дисковых тормозов с целью повышения эффективности тормозных систем.

Список источников

1. Баженов, Ю. В. Оценка работоспособности тормозной системы, оборудованной АБС / Ю. В. Баженов, М. Ф. Кунин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – С. 130. – EDN PBIQWH.
2. 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.
3. Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes / W. Österle, M. Griepentrog, Th. Gross, I. Urban // Wear. – 2001. – Vol. 251, No. 1-12. – P. 1469-1476. – EDN KHYOOP.
4. Sugözü, İ. Investigation of The Effect of Solid Lubricant Particle Sizes on Friction and Wear Properties in Friction Composites: An Experimental Case Study with Graphite / İ. Sugözü, B. Sugözü // International Journal of Automotive Science And Technology. – 2021. – Vol. 5(3). – P. 179-183. – DOI 10.30939/ijastech..928581.
5. Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb₂S₃, MoS₂) for automotive brake friction materials / M. H. Cho, J. Ju, S. J. Kim, H. Jang // Wear. – 2006. – Vol. 260, No. 7-8. – P. 855-860. – DOI 10.1016/j.wear.2005.04.003. – EDN KHZERB.

6. Sugözü, Banu Investigation of the Use of a New Binder Material in Automotive Brake Pad / Banu Sugözü, Ilker Sugözü // *International Journal of Automotive Science And Technology*. – 2020. – Vol. 4(4). – P. 258-263. – DOI 10.30939/ijastech.772922.
7. TSE 555. Highway Vehicles-Brake System-Brake Pads for Friction Brake. Turkish Standard Institute. Ankara, Turkey. – 1992.
8. Nano-abrasives in friction materials-influence on tribological properties / J. Bijwe, N. Aranganathan, S. Sharma [et al.] // *Wear*. – 2012. – Vol. 296. – P. 693-701. – DOI 10.1016/j.wear.2012.07.023. – EDN RIPGNZ.
9. Tabor, D. Friction as a dissipated process, Friction of organic poly-mers in fundamentals of friction / D. Tabor // *Macroscopic and Microscopic Processes*. – 1996. – № 3:220.
10. Persson, B.N.J. Theory of Friction – the Role of Elasticity in Boundary Lubrication / B.N.J. Persson // *Physical Review B*. – 1994. – № 50 (7). – P. 4771-4786.
11. Ostermeyer, G. P. On the dynamics of the friction coefficient / G. P. Ostermeyer // *Wear*. – 2003. – Vol. 254, No. 9. – P. 852-858. – DOI 10.1016/S0043-1648(03)00235-7. – EDN BJFGSF.
12. Anderson, A.E. Friction and Wear of Automotive Brakes / A.E. Anderson // *ASM Handbook. Friction, Lubrication and Wear Technology*. – 1992. – Vol. 18
13. Moore, D.F. *Principles and application tribology* / D.F. Moore. – Oxford: Pergamon Press, 1975. – P. 109-156.
14. Jeganmohan, S. Usage of powder pinus brutia cone and colemanite combination in brake friction composites as friction modifier / S. Jeganmohan, B. Sugozi // *Materials Today Proceedings*. – 2020. – Vol. 27(3). – P. 2072-2075. – DOI 10.1016/j.matpr.2019.09.070.

References

1. Bazhenov YU.V., Kunin M.F. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 4, pp. 130.
2. Shravan H. Gawande, Konkala Balashowry, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 21(10):1-10, pp. 144-153, DOI 10.1080/14484846.2020.1831133.
3. Österle W., Griepentrog M., Gross Th., Urban I. *Wear*, 2001, vol. 251, no. 1-12, pp. 1469-1476.
4. Sugözü İ., Sugözü B. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 2021, vol. 5(3), pp. 179-183, DOI 10.30939/ijastech..928581.
5. Cho M. H., Ju J., Kim S. J., Jang H. *Wear*, 2006, vol. 260, no. 7-8, pp. 855-860, DOI 10.1016/j.wear.2005.04.003.
6. Sugözü Banu, Sugözü Ilker. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 2020, vol. 4(4), pp. 258-263, DOI 10.30939/ijastech..772922.

7. Highway Vehicles-Brake System-Brake Pads for Friction Brake. Turkish Standard Institute, TSE 555, Ankara, Turkey, 1992.
8. Bijwe J., Aranganathan N., Sharma S., Dureja N., Kumar R. *Wear*, 2012, Vol. 296, pp. 693-701, DOI 10.1016/j.wear.2012.07.023.
9. Tabor D. *Macroscopic and Microscopic Processes*, 1996, no. 3:220.
10. Persson B.N.J. *Physical Review B*, 1994, no. 50 (7), pp. 4771-4786.
11. Ostermeyer G.P. *Wear*, 2003, vol. 254, no. 9, pp. 852-858, DOI 10.1016/S0043-1648(03)00235-7.
12. Anderson A.E. *ASM Handbook. Friction, Lubrication and Wear Technology*, 1992, vol. 18.
13. Moore D.F. *Principples and application tribology*, Oxford, Pergamon Press, 1975, pp. 109-156.
14. Jeganmohan S., Sugozi B. *Materials Today Proceedings*, 2020, vol. 27(3), pp. 2072-2075, DOI 10.1016/j.matpr.2019.09.070.

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 01.07.2024; одобрена после рецензирования 09.07.2024; принята к публикации 12.09.2024.

The article was submitted 01.07.2024; approved after reviewing 09.07.2024; accepted for publication 12.09.2024.