

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С.3-8.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №1 (163). P.3-8.

Научная статья

УДК 621.891

doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-3-8

Анализ морфологии изношенной поверхности в полимерно-матричных фрикционных композитах

Фикрет Фахрадди Юсубов, д.ф. в обл. техн.

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Баку, Азербайджан

fikratyusub@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В этом исследовании изучается топография поверхности и механизмы износа полимерных матричных фрикционных композитов, используемых в тормозных колодках. Анализируя микроскопические изображения и трехмерные профили износа поверхности, исследование выявляет ключевые процессы износа и образование частиц третьего тела, которые влияют на поведение трения. В исследованиях использовались образцы, приготовленные традиционными методами порошковой металлургии на основе фенолформальдегида. Эксперименты включали испытания трения в различных условиях, и результаты продемонстрировали отдельные фазы в изменении коэффициента трения, подчеркивая реакцию композита на различные напряжения. Морфология поверхности после испытаний выявила несколько механизмов износа, включая абразивный и адгезионный износ.

Ключевые слова: тормозные колодки, полимерно-матричные композиты, трение, износ, морфология поверхности

Для цитирования: Юсубов Ф.Ф. Анализ морфологии изношенной поверхности в полимерно-матричных фрикционных композитах // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 3–8.
doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-3-8

Analyzing the morphology of worn surfaces in polymer matrix friction composites

Fikret F. Yusubov, PhD in Technology

Azerbaijan State University of Petroleum and Industry, Baku, Azerbaijan
fikratyusub@gmail.com

Abstract. This study examines the surface topography and wear mechanisms of polymer matrix friction composites used in brake pads. By analyzing microscopic images and three-dimensional surface wear profiles, the study identifies key wear processes and the formation of third body particles that influence the behavior of friction. The research used samples prepared by traditional methods of powder metallurgy based on phenol-formaldehyde. The experiments included friction tests under various conditions, and the results evidenced distinct phases in the variation of friction coefficient, being illustrative of the composite's response to various stresses. The morphology of the surface after testing revealed several wear mechanisms, including abrasive and adhesive wear.

Keywords: brake pads, polymer matrix composites, friction, wear, surface morphology

For citation: Yusubov F.F. Analyzing the morphology of worn surfaces in polymer matrix friction composites / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-3-8

Введение

Фрикционные композиты на основе полимерной матрицы – это материалы, разработанные для обеспечения оптимальных свойств трения и износа в таких областях применения, как тормозные колодки, сцепления и другие системы, связанные с трением. Эти композиты состоят из полимерной матрицы, армированной различными наполнителями и волокнами для улучшения фрикционных свойств и износостойкости [1]. В состав обычных фрикционных композитов в качестве связующего или матрицы входят фенольные смолы, которые обеспечивают хорошую термическую стабильность и механическую прочность. Наполнители, такие как графит, оксиды металлов и керамика, улучшают теплопроводность, фрикционную стабильность и износостойкость. Волокна, такие как арамид, углерод и стекло, повышают механическую прочность и долговечность [2]. Разработка фрикционных композитов на основе полимерной матрицы направлена на баланс трения, износа, шума и тепловых характеристик, что делает их критически важными в автомобильных и промышленных тормозных системах.

Морфологическая характеристика имеет решающее значение в контексте фрикционных композитов, поскольку она выявляет структурные детали, которые влияют на производительность [3]. Изучая распределение и ориентацию волокон и наполнителей в полимерной матрице, исследователи могут оптимизировать механическую прочность и фрикционные свойства композита. Наполнители в виде частиц, такие как керамические частицы, также играют решающую роль в повышении износостойкости, обеспечивая твердую фазу внутри более мягкой полимерной матрицы, которая устойчива к абразивному воздействию [4].

Высокая износостойкость означает менее частые замены, что экономически выгодно и сокращает отходы окружающей среды. Изучение структуры контактной поверхности очень важно, поскольку оно влияет на эффективную передачу нагрузки и определяет процесс изнашивания [5]. Понимание механизмов износа посредством детального анализа поверхности помогает в адаптации материалов для повышения износостойкости. Детальное структурное понимание помогает в оптимизации состава композита для лучшей производительности в различных приложениях.

В данном исследовании образцы тормозных колодок, изготовленные из компонентов на основе фенолформальдегида с низким содержанием металлов, были подвергнуты испытаниям на трение и проанализирована морфология контактной поверхности. Испытания на трение проводились в различных режимах для морфологических сравнений с целью исследования изношенных поверхностей.

Материалы и методы

Образцы для испытаний на трение были изготовлены в цилиндрической форме. Для приготовления образцов были выбраны следующие виды сырья: барит, фенольная смола, оксид алюминия, свинец, олово, порошок спеченный медно-графитовый композит (80 % Cu, 20 % C), диоксид кремния, синтетический волластонит, оксид магния, дисульфид молибдена и латунная стружка (0,1...0,2 мм). Процессы, использованные при приготовлении образцов, включают измельчение материала, механическое смешивание, прессование (25,5 МПа) и спекание (160°C). Сырье измельчали в лабораторном вибрационном шаровом мельнице, а затем порошкообразные материалы механически смешивали в горизонтальном барабанном смесителе (60 циклов/мин в течение 16 ч) в сухих условиях. При прессовании для уменьшения трения между частицами порошка и стенкой пресс-формы в качестве внешней смазки использовался парафин. Для улучшения прессуемости порошка в качестве внутренней смазки применялся глицерин (5...8 % масс.).

Экспериментальная часть

Испытания на сухое трение скольжения проводились с использованием вертикального трибометра MMW-1 по схеме «палец-диск» при комнатной температуре (25 °C). В этих испытаниях вращающиеся образцы прижимались к неподвижному диску из низкоуглеродистой стали с шероховатостью поверхности 0,2 мкм, как показано на рис. 1. Стальной диск имел внешний диаметр 31,7 мм, внутренний диаметр 16 мм и толщину 10 мм. Площадь контакта образца составила 17,35 мм². Перед испытанием поверхности образцов полировались под водой на вращающемся диске с использованием абразивных дисков SiC зернистостью 1000 и 2000.

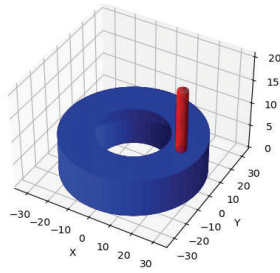


Рис. 1. Схема испытаний по схеме «палец–диск»

Fig. 1. Test pattern for the «finger–disk» scheme

Изображения под оптическим микроскопом были получены с использованием микроскопа AmScope (серия ME520) с программным обеспечением для микрофотографирования AmScope 3.7.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 представлены избранные режимы испытаний на трение и их результаты соответственно.

1. Условия испытания на трение для композитных образцов тормозных колодок

1. Friction test conditions for composite brake pad samples

Тест №	Нормальная нагрузка, Н	Скорость скольжения, м/с	Расстояние скольжения, км
1	50	2,50	1,275
2	100	1,57	1,590
3	150	0,64	0,960

2. Результаты испытаний на трение

2. Friction test results Figure

Тест №	Коэффициент трения μ	Скорость изнашивания, г/ч	Температура диска, °C
1	0,441	0,038	330...350 °C
2	0,374	0,018	330...350 °C
3	0,409	0,026	330...350 °C

Проведенные испытания показали, что характер изменения коэффициента трения очень близки друг к другу для всех режимов. Близость характеристик трения для всех режимов можно объяснить тем, что состав образцов одинаков. Однако разные режимы

повлияли на механизмы изнашивания. На рис. 2 представлены результаты испытания с самым длинным путем трения (тест 2). На графике можно выделить несколько фаз.



Рис. 2. Изменение коэффициента трения во времени

Fig. 2. Change of the friction coefficient within the period of time

Коэффициент трения изначально начинается с более низкого значения и резко увеличивается в течение начальной фазы (0...100 с), вероятно, из-за шероховатости поверхности или первоначального укладывания материала. В средней фазе (100...400 с) он значительно колеблется между 0,3 и 0,5, что указывает на нестабильное поведение трения, возможно, на

которое влияют изменения в контакте с поверхностью, изменения температуры или другие внешние факторы. В стабильной области (400...500 с) коэффициент трения стабилизируется около 0,4, что предполагает более постоянную силу трения, потенциально представляющую собой устойчивое состояние. Фаза спада (500...700 с) показывает

постепенное снижение коэффициента трения, что может быть результатом износа, полировки поверхности, термических эффектов или распада смазки. Наконец, в последней фазе (700...800 с) коэффициент трения стабилизируется на более низком значении, что указывает на то, что система достигла нового равновесия или фрикционный материал значительно

изношен или претерпел фазовое изменение. На рис. 3 показаны оптические изображения контактных поверхностей фрикционных композитов с полимерной матрицей после прохождения испытаний на трение. Каждое изображение представляет различные топографии поверхности и механизмы износа, которые развились в определенных условиях испытаний.

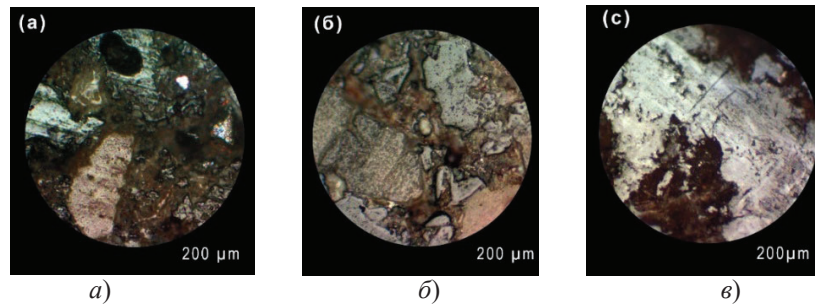


Рис. 3. Оптические изображения контактной поверхности после испытания на трение:
а – тест № 1; б – тест № 2; в – тест № 3

Fig. 3. Optical images of the contact surface after the friction test:
a – test No. 1; b – test No. 2; c – test No. 3

Различные топографии и механизмы износа указывают на свойства композита к различным фрикционным напряжениям и условиям. Контактное напряжение в контексте композитов тормозных колодок относится к распределению напряжений на границе между тормозной колодкой и ротором при применении тормозов [6]. Представленные оптические изображения дают четкое визуальное различие между механизмами износа, действующими на фрикционные композиты с полимерной матрицей, которые показывают различные закономерности износа – абразивный и адгезионный износ.

Присутствие более крупных, более ярких частиц на рис. 3, а предполагает обнажение более твердых армирующих материалов

внутри полимерной матрицы. Более темные области могут указывать на области, где более мягкая полимерная матрица была преимущественно изношена, обнажая внедренные частицы или наполнители. Вторая изношенная поверхность показывает более равномерный износ с уплощенными областями, что указывает на более гладкие области, которые могли быть подвергнуты более постоянному скользящему контакту (рис. 3, б). Более темные пятна предполагают наличие остатков износа или локального размазывания полимерной матрицы, возможно, из-за механизмов адгезионного износа, где произошел перенос материала между контактными поверхностями. Этот процесс можно лучше визуализировать на контурной и трехмерной карте износа (рис. 4).

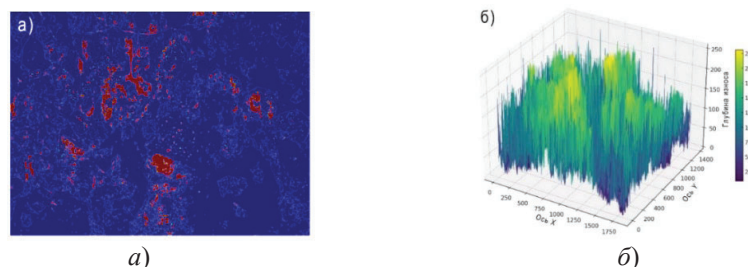


Рис. 4. Карта износа (а) и топографический поверхностный график глубины износа образца тормозной колодки (б)

Fig. 4. Wear map (a) and topographic surface graph of the wear depth of the brake pad sample (b)

Контурный график (рис. 4. б) выделяет пятна износа на поверхности с более темными областями, указывающими на области

значительной разницы в шероховатости. Эти более темные области предполагают механизмы износа, возможно, из-за частиц износа

или неравномерного распределения нагрузок во время торможения. На рис. 5 представлены результаты ЭДС анализа слоев трения, наблюдаемых на поверхности износа для испытания № 2.

Представленный спектр EDS подчеркивает присутствие таких ключевых элементов, как углерод C, кислород O, медь Cu, свинец Pb, барий Ba, магний Mg, марганец Mn, олово Sn и алюминий Al, которые являются неотъемлемой частью структуры и характеристик композитного материала. Наличие указанных элементов в слое трения указывает на возможность адгезионного износа.

Трехмерный график поверхности иллюстрирует глубину износа по всей композитной поверхности. Профиль износа характеризуется высокими пиками и глубокими впадинами, что указывает на сильное удаление материала и

деградацию поверхности. Изменение в значении серого указывает на разницу в глубине износа, при этом более высокие пики представляют области с меньшим износом, а более глубокие впадины показывают области с более значительным удалением материала. Наличие адгезия между контактирующими поверхностями может вызвать скольжение поверхностей в процессе трения, требующее приложения дополнительной силы, а также отрыв материала от поверхности. Неравномерная глубина износа свидетельствует о том, что процесс износа не является однородным, что может быть обусловлено такими факторами, как неоднородность материала, колебания температуры или наличие изношенных частиц.

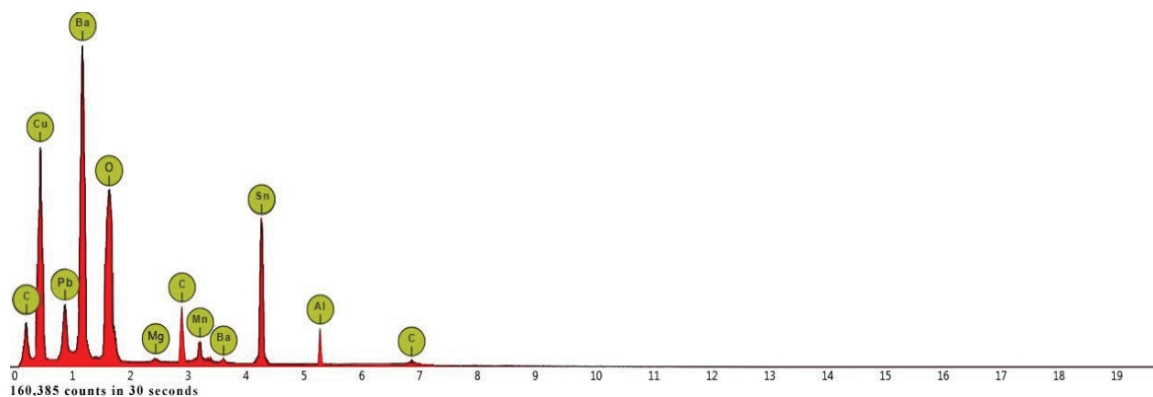


Рис. 5. Спектральный анализ EDS слоя трения на изношенной поверхности

Fig. 5. Spectral analysis of the EDS friction layer on the worn surface

Представленный спектр EDS подчеркивает присутствие таких ключевых элементов, как углерод C, кислород O, медь Cu, свинец Pb, барий Ba, магний Mg, марганец Mn, олово Sn и алюминий Al, которые являются неотъемлемой частью структуры и характеристик композитного материала. Наличие указанных элементов в слое трения указывает на возможность адгезионного износа.

Трехмерный график поверхности иллюстрирует глубину износа по всей композитной поверхности. Профиль износа характеризуется высокими пиками и глубокими впадинами, что указывает на сильное удаление материала и деградацию поверхности. Изменение в значении серого указывает на разницу в глубине износа, при этом более высокие пики представляют области с меньшим износом, а более глубокие впадины показывают области с более значительным удалением материала. Наличие адгезия между контактирующими

поверхностями может вызвать скольжение поверхностей в процессе трения, требующее приложения дополнительной силы, а также отрыв материала от поверхности. Неравномерная глубина износа свидетельствует о том, что процесс износа не является однородным, что может быть обусловлено такими факторами, как неоднородность материала, колебания температуры или наличие изношенных частиц.

На изображении рис. 3, в виден более выраженный механизм абразивного износа с видимыми царапинами или канавками на поверхности. Эта топография предполагает присутствие более твердых абразивных частиц, возможно, третьего тела, которые создали микроканавки в результате вспахивания. Контактное давление на поверхность «палеца», контактирующую со стальным диском, находилось в пределах 1...10 МПа. Материал из фенольной смолы должен эффективно работать при таких

нагрузках, обеспечивая надежное трение и тормозное усилие, сохраняя при этом долговечность. Стальной аналог, будучи намного прочнее, вряд ли испытает какую-либо деформацию под этим напряжением.

Выводы

Анализ поверхности изнашивания тормозного фрикционного композита выявил сложное взаимодействие механизмов изнашивания, включая абразивный и адгезионный износ. Во всех тестах на трение исследование выявило отдельные фазы динамики коэффициента трения, включая первоначальное быстрое увеличение, за которым следовали значительные колебания, период стабилизации и возможное снижение. Наличие абразивного износа, о котором свидетельствуют видимые канавки и царапины, позволяет предположить, что абразивные частицы третьего тела играют роль в процессе износа, особенно в более агрессивных условиях испытаний. Адгезионный механизм изнашивания наблюдался в местах, где происходил перенос материала между контактными поверхностями, что приводило к локальному размазыванию полимерной матрицы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Pujar V., Devarajaiah R.M., Suresha B., Bharat V.** A review on mechanical and wear properties of fiber-reinforced thermoset composites with ceramic and lubricating fillers / *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 46, P. 7701–7710.
2. **Parikh H.H., Gohil P.P.** Tribology of fiber reinforced polymer matrix composites – A review / *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, Vol. 34, № 16, P. 1340–1346.
3. **Byeong-Choon G., In-Sik C.** Microstructural analysis and wear performance of carbon-fiber-reinforced SiC

composite for brake pads / *Materials*, 2017, Vol. 10, № 7, p. 701.

4. **Шакина А.В., Фадеев В.С., Штанов О.В.** Вагонные тормозные колодки повышенной износостойкости // *Техника железных дорог*, 2014. Том 4, С. 28.

5. **Ostermeyer GP., Müller M., Abendroth H., Wernitz B.** Surface topography and wear dynamics of brake pads / *SAE Technical Paper*; 2006 Oct 8. P. 1–26.

6. **Afzal A., Sirajuddin M., Kumar M., Moolya N.I.** Stress analysis and contact pressure distribution in different disc brake rotors / *In AIP Conference Proceedings. Emerging trends In mechanical engineering 10–11 August 2018. Karnataka, India Vol. 2080, №. 1. P. 040001–8.*

REFERENCES

1. **Pujar V., Devarajaiah R.M., Suresha B., Bharat V.** A review on mechanical and wear properties of fiber-reinforced thermoset composites with ceramic and lubricating fillers / *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 46, P. 7701–7710.
2. **Parikh H.H., Gohil P.P.** Tribology of fiber reinforced polymer matrix composites – A review / *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, Vol. 34, № 16, P. 1340–1346.
3. **Byeong-Choon G., In-Sik C.** Microstructural analysis and wear performance of carbon-fiber-reinforced SiC composite for brake pads / *Materials*, 2017, Vol.10, № 7, p. 701.
4. **Shakina A.V., Fadeev V.S., Shtanov O.V.** Railcar brake shoes with increased wear resistance. *Railway Engineering*, 2014, vol. 4, p. 28.
5. **Ostermeyer GP., Müller M., Abendroth H., Wernitz B.** Surface topography and wear dynamics of brake pads / *SAE Technical Paper*; 2006 Oct 8. P. 1–26.
6. **Afzal A., Sirajuddin M., Kumar M., Moolya N.I.** Stress analysis and contact pressure distribution in different disc brake rotors / *In AIP Conference Proceedings. Emerging trends In mechanical engineering 10–11 August 2018. Karnataka, India Vol. 2080, №. 1. P. 040001–8.*

Статья поступила в редакцию 08.09.2024; одобрена после рецензирования 06.10.2024; принята к публикации 31.10.2024.

The article was submitted 08.09.2024; approved after reviewing 06.10.2024; assepted for publication 31.10.2024.