

УДК 678.5.067.017:620.178.162.2

ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО МЕХАНИЗМУ «ПАЛЕЦ-ДИСК»

Изучены трение и износ фрикционных композиционных материалов, изготовленных на основе метода порошковой металлургии. Триботехнические свойства образцов материалов исследовали на вертикальной установке ММВ-1 по механизму «палец-диск». Для анализа поверхности износа образцов использовали оптический микроскоп Amscope.

Ключевые слова: фрикционные композиционные материалы, механизм «палец-диск», наполнители, абразивы, трение, износ.

Эффективность выполнения таких важных операций, как движение и остановка, перевозка грузов из одного пункта в другой, во многом зависит от качества фрикционных материалов [1, 2]. Фрикционные материалы в рабочем диапазоне температур наряду с высоким и стабильным коэффициентом трения должны обладать также повышенной износостойкостью [3]. Основным недостатком используемых в настоящее время композиционных материалов — ухудшение их термомеханических характеристик в зависимости от скорости, нагрузки и других эксплуатационных показателей [4]. Изменение геометрических размеров поверхности материалов пар трения под влиянием тепла способствует резкому снижению эффективности [5]. По этой причине с ростом эксплуатационных требований современных агрегатов назрела необходимость в разработке новых устойчивых материалов, способных обеспечить нормальный режим работы узлов трения.

Одна из современных тенденций в разработке новых материалов — получение материалов, обладающих наиболее высокими качественными показателями с соблюдением экологических норм [6]. В настоящей статье приведены результаты исследований триботехнических характеристик новых безасбестовых композиционных материалов для фрикционных пар, работающих

в тяжелых эксплуатационных условиях. Материалы изготовлены на основе метода порошковой металлургии.

Информация о составе композиционных материалов, исследуемых в настоящей работе, приведена в табл. 1. Образцы М1, М2 и М3 изготавливали в следующей технологической последовательности: измельчение, смешивание исходных материалов, холодное прессование (~10 МПа) и прессование с нагревом (160 °С, 25,5 МПа), спекание (в течение 5 ч при 140 °С). Прессование проводили по двусторонней схеме. В качестве функционального наполнителя использовали частицы мед-графита, полученные электрохимическим методом (80 % Cu, 20 % C), в качестве модификатора-добавки — MgO, MoS₂ и рубленую латунную стружку.

Образцы композиционных материалов изготавливали в виде цилиндров диаметром 7 и длиной 13 мм. Для испытания на трение из образцов вырезали цилиндрические пальцы диаметром 4,7 и высотой 12,8 мм. Для получения гладкой поверхности каждый конец образца был отполирован бумагой из SiC зернистостью 500, 1000 и 2000. В результате контактная по-

Таблица 1. Состав образцов композиционных материалов, мас. %

Компонент	М1	М3	М7
Барит	25	25	25
Фенолоформальдегид	25	25	25
Волластонит	5	5	4
Оксид алюминия	7	7	6
Свинец	10	10	8
Олово	10	10	8
Диоксид кремния	7	5	5
Мед-графит	9	7	5
Модификаторы-добавки	2	6	14



Ф. Ф. Юсубов
E-mail: fikratyusub@gmail.com

верхность каждого образца составила 17,3 мм², контактное давление с заданными параметрами 9,6 МПа. Очистку образцов проводили в ультразвуковой ванне изопропиловым спиртом.

Твердость образцов измеряли на приборе Бринелля стальным шариком диаметром 2,5 мм (нагрузка 62,5 кг), плотность образцов — методом Архимеда (по ISO 2738). Испытания на трение проводили в вертикальном трибometре MMW-1 по механизму «палец-диск». Принцип испытаний на трение основан на одновременном вращении по часовой стрелке трех цилиндрических образцов на неподвижном стальном диске. Закаленная сталь твердостью 44–46 HRC была использована в качестве контртела (размеры диска: внешний диаметр 31,7, внутренний диаметр 16, толщина 10 мм). Нагрузка прикладывалась к диску движением ротора, который установлен в нижней части машины. Схема механизма узлов трения установки показана на рис. 1. При испытаниях, проведенных этим методом, момент трения измеряли через каждую секунду и автоматически передавали на компьютер.

Для измерения износа образцы взвесили на электронных весах до и после испытания. Удельную степень износа W_s рассчитали по формуле

$$W_s = \frac{\Delta V}{F_n L_s} = \frac{\Delta V}{F_n \cdot 2\pi R v t}$$

где ΔV — износ по массе; F_n — номинальная нагрузка; L_s — путь трения; R — радиус трения; v — скорость трения; t — время трения.

Скорость трения v определили по формуле

$$v = \omega r = \frac{\pi n}{30} r,$$

где ω — угловая скорость; r — радиус трения; n — число оборотов.

Износ по массе рассчитали по формуле

$$\Delta V = \frac{W_1 - W_2}{\rho} \cdot 1000,$$

где W_1 и W_2 — масса до и после испытаний соответственно; ρ — плотность.

Стабильность трения Φ_c вычислили по формуле

$$\Phi_c = \frac{\mu_{\text{сред}}}{\mu_{\text{макс}}} \cdot 100 \%,$$

где $\mu_{\text{сред}}$ — средний коэффициент трения; $\mu_{\text{макс}}$ — максимальный коэффициент трения.

Несмотря на то что в литературе имеется некоторая информация о влиянии используемых материалов MgO, MoS₂ и рубленой латунной стружки, проведенные триботехнические испытания помогли шире изучить процессы, происходящие при трении материалов, при изменении количества вводимой модификатора-добавки [7, 8]. В табл. 2 приведены триботехнические показатели образцов. Как видно, самый высокий коэффициент трения получен

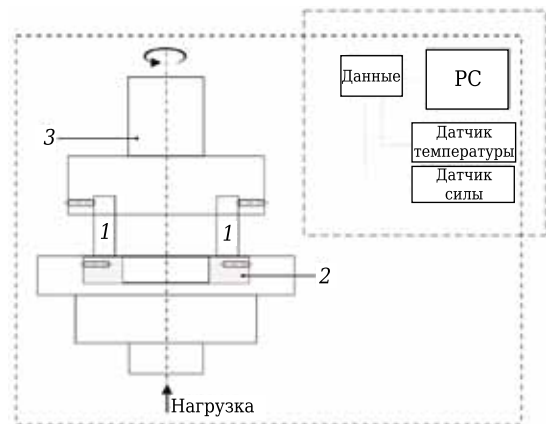


Рис. 1. Схема механизма узлов трения трибometра MMW-1: 1 — образцы; 2 — диск; 3 — шпиндель (механизм для вращения)

Таблица 2. Триботехнические показатели образцов

Образец	$\mu_{\text{сред}}$	Фрикционная стабильность, %	$W_s, 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}$
M1	0,44	87,8	5,824
M3	0,26	72,4	6,010
M7	0,14	85,2	7,354

у образца M1. Хотя в образце M7 коэффициент трения относительно низкий, другой важный показатель, обеспечивающий надежность и эффективность трущихся пар, — фрикционная стабильность образца M7 — был высоким. В этом образце резкого снижения и увеличения коэффициента трения, особенно в диапазоне пути трения до 700 м, не наблюдалось (рис. 2). Это состояние можно принять как эффект влияния фрикционного слоя, созданного MgO совместно с MoS₂. Гладкость поверхности композита M7 можно видеть на рис. 3, в. Но так как физические показатели образца M7 были низкие (табл. 3), под влиянием температуры на поверхности трения вскоре начали появляться трещины. В результате удельная степень износа была высокой (см. табл. 2). При повышении номинальной нагрузки поверхность образца сжимается к диску и шероховатые области обеих поверхностей контактируют друг с другом [8]. Поскольку твердость материала диска намного выше, чем твердость композита, образец изнашивается вращательным движением с высокой скоростью, и большинство частиц, отделенных от образца, остаются на контактной поверхности и вновь присоединяются к процессу трения. По мере появления нового слоя с увеличением числа циклов изношенные частицы постепенно деформируются, измельчаются и сжимаются.

В материале M3 стабильность трения была низкой, значительно ниже, чем в других материалах. На рис. 3, б показана неровная и подвергшаяся разрушению поверхность образца M3. Частицы, отколовшиеся от маленьких тре-

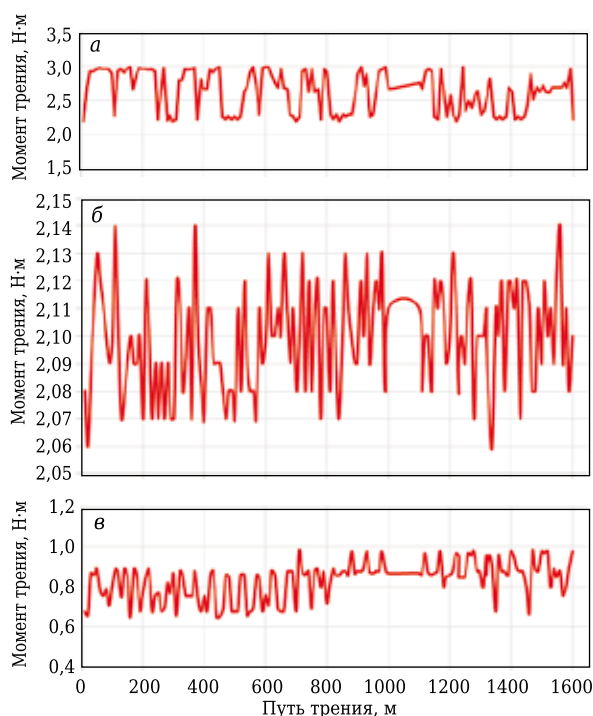


Рис. 2. Зависимости момента трения образцов *M1* (а), *M3* (б) и *M7* (в) от пути трения

Таблица 3. Физические показатели образцов

Образец	Твердость <i>НВ</i>	Плотность, г/см ³
<i>M1</i>	43,7	2,336
<i>M3</i>	42,6	2,305
<i>M7</i>	41,2	2,204

щин, возникших еще на начальном этапе трения, сыграв роль абразива, ускоряют процесс изнашивания. Это, в свою очередь, отражается на трибологическом поведении материала (см. рис. 2, б). Если не принимать во внимание следы износа в направлении трения в образце *M1*, в общем в нем серьезных структурных изменений не произошло (см. рис. 3, а). Однако приблизительно через 1000 м пути трения в композите *M1* можно видеть нестабильность коэффициента трения (см. рис. 2).

На рис. 4 показано линейное изменение среднего коэффициента трения образцов в зависимости от времени. В композите *M1* наблюдается постепенное снижение коэффициента трения. В итоге уменьшение его среднего значения до минимума в процессе испытания можно связать с ухудшением триботехнических характеристик с течением времени. С ростом числа периодов повышение температуры в контактной поверхности снижает коэффициент трения. Фрикционная теплота влияет на окисление, термостойкость и пластичность материала. Дegradaция органических компонентов из-за температурных воздействий является одной из основных причин ухудшения трибологических свойств в полимерных фрикционных композиционных материалах

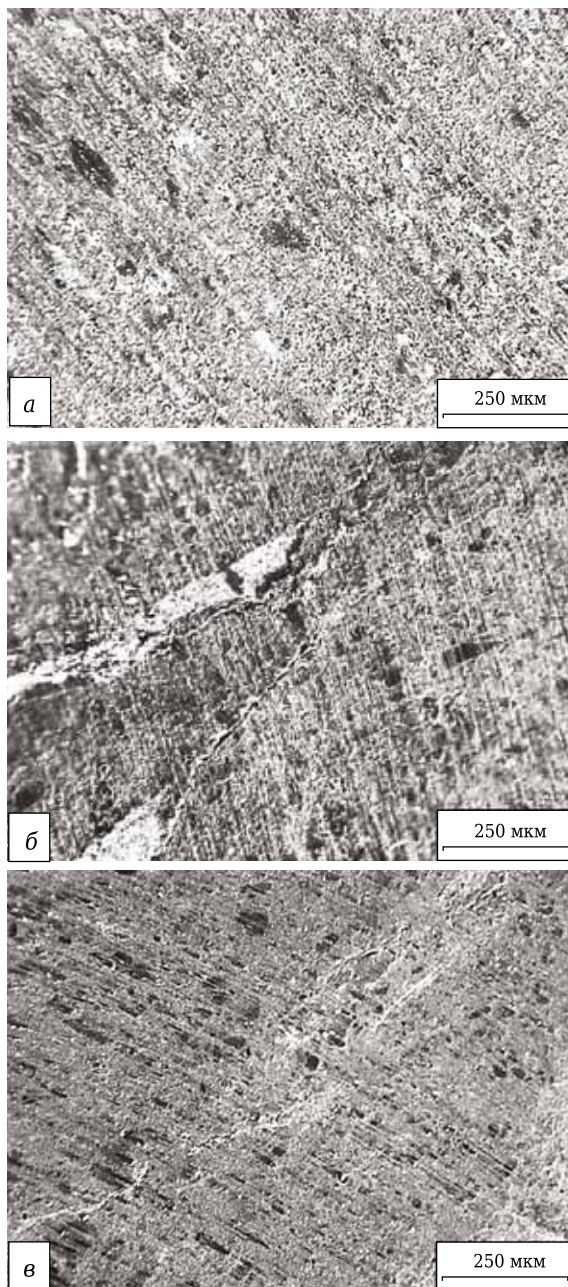


Рис. 3. Поверхность износа образцов *M1* (а), *M3* (б) и *M7* (в)

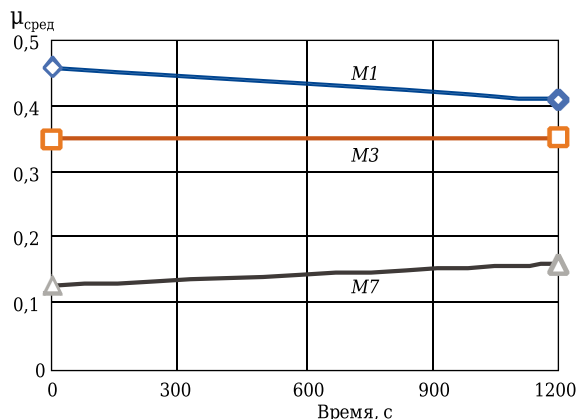


Рис. 4. Закономерность изменения среднего коэффициента трения в зависимости от времени

[9]. Эти изменения во взаимодействии между поверхностями в результате структурных превращений отражаются на поведении композитов при сухом трении.

В образцах МЗ и М7 изменение коэффициента трения с растущей линейной закономерностью в соответствии с числом оборотов показывает, что в исследуемом диапазоне влияние фрикционной теплоты на эти материалы невелико. Этот факт подтверждает также мысль о повышении теплопроводности материала при введении таких модификаторов-добавок, как MoS_2 . Именно по этой причине линейное увеличение коэффициента трения в образце М7 больше, чем в образцах М1 и МЗ, хотя общее среднее значение коэффициента трения в образце М7 самое низкое.

Библиографический список

1. **Hutchings, I.** Tribology: friction and wear of engineering materials; 2nd ed. / I. Hutchings, P. Shipway. — Butterworth-Heinemann Ltd, 2017. — 412 p.
2. **Barros, L. Y.** Morphological analysis of pad-disc system during braking operations / L. Y. Barros, P. D. Neis, N. F. Ferreira [et al.] // Wear. — 2016. — Vol. 352/353. — P. 112–121.
3. **Singh, M. K.** Mechanical and tribological properties of plastically deformed copper metal matrix nano composite / M. K. Singh, R. K. Gautam // Materials Today: Proceedings. — 2018. — Vol. 5, № 2. — P. 5727–5736.
4. **Straffelini, G.** Wear behavior of a low metallic friction material dry sliding against a cast iron disc: Role of the heat-treatment of the disc / G. Straffelini, P. C. Verma, I. Metinoz [et al.] // Wear. — 2016. — Vol. 348/349. — P. 10–16.
5. **Jakob, M.** Application of high performance composite polymers with steel counterparts in dry rolling/sliding contacts / M. Jakob, G. Florian, S. Florian [et al.] // Polymer Testing. — 2018. — Vol. 66. — P. 371–382.
6. **Yelong, X.** Mechanical and tribological behaviors of copper metal matrix composites for brake pads used in

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что содержание модификаторов-добавок более 6 мас. % в образцах неэффективно, поскольку их физические и триботехнические показатели при этом становятся хуже.

Стабильность трения в образце М7 была высокой из-за фрикционного слоя, сформировавшегося на поверхности трения. Установлено, что:

- самые высокие коэффициент трения и фрикционная стабильность в образце М1. Средний коэффициент трения в образце М1 составил 0,44;
- удельная степень износа самая высокая в образце М7 ($7,354 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}$), а самая низкая в образце М1 ($5,824 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}$);
- стабильность трения самая высокая в образцах М1 (87,8 %) и М7 (85,2 %).

high-speed trains / X. Yelong, P. Zhongyi, K. Yaao [et al.] // Tribology International. — 2018. — Vol. 119. — P. 585–592.

7. **Nilov, A. S.** Analysis of friction materials and technologies developed to make brake shoes for heavily loaded brake systems with disks made of a ceramic composite / A. S. Nilov, V. I. Kulik, A. P. Garshin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 402–412.

Нилов, А. С. Анализ фрикционных материалов и технологий изготовления тормозных колодок для высоконагруженных тормозных систем с дисками из керамического композиционного материала / А. С. Нилов, В. И. Кулик, А. П. Гаршин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 7. — С. 57–68.

8. **Xiao, X.** Review on the friction and wear of brake materials / X. Xiao, Y. Yin, J. Bao [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. — 2016. — Vol. 8, № 5. — P. 1–14.

9. **Jiusheng, B.** Wear modalities and mechanisms of the mining non-asbestos composite brake material / B. Jiusheng, Y. Yin, Z. Zhu [et al.] // Appl. Compos. Mater. — 2012. — Vol. 20, № 4. — P. 331–339. ■

Получено 23.06.20
© Ф. Ф. Юсубов, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



IX Межвузовская конференция-конкурс «Физическая химия — основа новых технологий и материалов»

18 ноября 2020 г., Санкт-Петербург (издание включено в РИНЦ)

IX Межвузовская конференция-конкурс имени чл. корр. АН СССР А. А. Яковкина «Физическая химия — основа новых технологий и материалов» на лучшую научную работу студентов, обучающихся по химическим, химико-технологическим, биотехнологическим, биомедицинским, материаловедческим направлениям и специальностям имеет статус конференции-конкурса студентов высших учебных заведений России с международным участием.

Научные работы, представляемые на конкурс, должны быть экспериментального или теоретического характера в рамках тематики конкурса и соответствовать следующим секциям:

- Секция 1.** Физико-химические аспекты разработки новых технологий
- Секция 2.** Физическая химия в конструировании, синтезе и анализе материалов
- Секция 3.** Физическая химия в медицине, фармакологии и биотехнологии
- Секция 4.** Физико-химические аспекты развития зеленой энергетики
- Секция 5.** Физико-химические аспекты безопасности атомной энергетики



При обращении к организаторам мероприятия обязательно ссылайтесь на сайт «Конференции.ru» как на источник информации. Последний день подачи заявки — 31 октября 2020 г.

Контактная информация: Еникеева Мария Олеговна <https://yakovkin.technolog.edu.ru/>
Эл. почта: yakovkin@technolog.edu.ru