

Received: 16.12.2022

Revised: 17.02.2023

Accepted: 28.02.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.054-064

THE EFFECT OF ABRASIVE ADDITIVES ON THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS FOR THE WHEEL–RAIL SYSTEM

L. F. Koroleva^{1, a)}, R. A. Savrai^{1, b), *}, E. Yu. Prosviryakov^{1, c)}, V. A. Kostarev^{1, d)},
S. V. Pavlyshko^{1, e)}, and P. V. Kostarev^{2, f)}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

²*B.N. Yeltsin Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

- a)  <https://orcid.org/0000-0001-6650-7494>  lq@imach.uran.ru;
b)  <https://orcid.org/0000-0001-9873-3621>  ras@imach.uran.ru;
c)  <https://orcid.org/0000-0002-2349-7801>  evgen_pros@mail.ru;
d)  ksmtkt@gvaik.mail.com;
e)  <https://orcid.org/0000-0003-0526-8500>  psv@imach.uran.ru;
f)  ksmtkt@gvaik.mail.com

* Corresponding author. E-mail: ras@imach.uran.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
Tel.: +7 (343) 362 3014

The paper studies the polishing power of a tribochemically active abrasive material based on a solid solution of iron and aluminum oxides, as well as a solid solution of aluminum and iron oxides modified by zirconium oxide and yttrium oxide additives, and the tribotechnical properties of a lubricant doped with these abrasive materials. The modified $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ powders prove to have an essentially higher polishing power producing a considerably lower surface roughness than that of the unmodified $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ powder. By varying the content of the modifying oxides, one can change the tribochemical activity of the abrasive powder and select the best composition depending on the material to be polished. The addition of these abrasive powders is shown to have an essential effect on the tribotechnical properties of the lubricant for the wheel–rail contact. The laboratory testing of the lubricant compositions suggests their effective applicability to the wheel–rail contact.

Keywords: tribochemically active abrasive material, polishing ability, surface roughness, lubrication for the wheel–rail system, welding load, wear spot diameter.

Acknowledgment

This study was performed within the state assignments for the IES UB RAS, reg. Nos. AAAA-A18-118020790142-9 and AAAA-A18-118020790147-4.

Optical profilometry and tribotechnical tests were performed in Collective Use Center “Plastometriya” of the Institute of Engineering Science UB RAS.

References

1. Tuvshintur B., Vinokurov D.I., Yakimova G.A., Gozbenko V.E. Lubricants for the wheel–rail system. Solution of an excessive wear problem with production wastes used. *Systems. Methods. Technologies*, 2015, No. 3 (27), pp. 23–31. (In Russian).
2. Artemov A.S. Polishing nanodiamonds. *Physics of the Solid State*, 2004, vol. 46, pp. 687–695. DOI: 10.1134/1.1711453.

3. Jackson M.J., Mills B., Hitchiner M.P. Controlled wear of vitrified abrasive materials for precision grinding applications. *Sadhana*, 2003, vol. 28, No. 5, pp. 897–914. DOI: 10.1007/BF02703320.
4. Bakharev V.P. Dispersion of Ceramics and Composites in Diamond Finishing by Free Abrasive. *Russ. Engin. Res.*, 2009, vol. 29, No. 2, pp. 162–168. DOI: 10.3103/S1068798X09020129.
5. Filatov Y.D., Yashchuk V.P., Filatov A.Y., Heisel U., Storchak M. and Monteil G. Assessment of surface roughness and reflectance of nonmetallic products upon diamond abrasive finishing. *J. Superhard Mater.*, 2009, vol. 31, pp. 338–346 DOI: 10.3103/S1063457609050098 .
6. Storozhenko P.A., Guseinov Sh.L., and Malashin S.I. Nanodispersed powders: synthesis methods and practical applications. *Nanotekhnol. Russia*, 2009, vol. 4, Nos. 5–6, pp. 262–274. DOI: 10.1134/S1995078009050024.
7. Pokropivnyi V.V., Silenko P.M. Silicon carbide nanotubes and nanotubular fibers: synthesis, stability, structure and classification. *Theor. Exp. Chem.*, 2006, vol. 42, No. 1, pp. 3–15. DOI: 10.1007/s11237-006-0010-y.
8. Khanra A.K. Production of boron carbide powder by carbothermal synthesis of gel material. *Bull. Mater. Sci.*, 2007, vol. 30, No. 2, pp. 93–96. DOI: 10.1007/s12034-007-0016-7.
9. Bogdanov S.P. Influence of superstoichiometric boron on the synthesis of cubic boron nitride. *Glass Physics and Chemistry*, 2008, vol. 34, No. 3, pp. 336–339. DOI: 10.1134/S1087659608030164 .
10. Degtyareva E.V., Kabakova I.I., Skorodumova E.B., Armyanovskii V.E. An abrasive-resistant corundum ceramic for drawing microwires. *Refractories*, 1982, vol. 23, Nos. 1–2, pp. 82–87. DOI: 10.1007/BF01397952.
11. Garshin A.P., Gropyanov V.M., and Lagunov Yu.V. *Abrazivnye materialy* [Abrasive Materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. (In Russian).
12. Viktorov V.V., Fotiev A.A., and Badich V.D. Abrasive and Thermal Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ Solid Solutions. *Inorg. Mater.*, vol. 32, No. 1, pp. 55–57.
13. Kotov Yu.A., Samatov O.M. Characteristics of aluminum oxide powders produced by impulse wire heating. *Poverkhnost*, 1994, nos. 10–14, pp. 90–94. (In Russian).
14. Belousov V.M., Chertov V.M., Rozhkova É.V., Litvin V.I. and Zazhigalov V.A. A sol-gel method for synthesizing porous iron-aluminum oxide substances and regulating their physicochemical characteristics. *Theor. Exp. Chem.*, 1997, vol. 33, No. 2, pp. 103–105. DOI: 10.1007/BF02765955.
15. Koroleva L.F. Tribochemical Activity of Mixed-Oxide Abrasive Materials in Metal Polishing. *Fiz. Khim. Obrab. Mater.*, 2006, No. 4, pp. 84–92. (In Russian).
16. Kim Nan-Hoon, Lim Jond-Heun, Kim Sang-Yong, Chang Eui-Goo. Semi-abrasive free slurry with acid colloidal silica for copper chemical mechanical planarization. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 2005, vol. 16, pp. 629–632. DOI: 10.1007/s10854-005-3241-0 .
17. Marchenko E. A. *O prirode razrusheniya poverkhnosti metallov pri trenii* [On the Nature of Metal Surface Fracture in Friction]. Moscow, Nauka Publ., 1979. (In Russian).
18. Rebinder P.A. The significance of physicochemical processes in mechanical failure and processing of solids in engineering. *Vestnik AN SSSR*, 1940, No. 8, pp. 5–28. (In Russian).
19. Koroleva L.F. Modified nanoparticle oxides for final polishing. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2016, iss. 2, pp. 48–73. DOI: 10.17804/2410-9908.2016.2.048-073. Available at: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2016_Koroleva_L.F._048_073.pdf
20. Koroleva L.F. Synthesis and abrasive properties of nanoparticulate modified solid solutions of aluminum and iron oxides. *Inorganic Materials*, 2019, vol. 55 (6), pp. 556–562. DOI: 10.1134/S0020168519060074.
21. Koroleva L.F. Synthesis and abrasive properties of nanoparticulate MoO_2 -modified $\text{Al}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ and $\text{Fe}_{2-y}\text{Al}_y\text{O}_3$ solid solutions. *Inorg. Materials*, 2010, vol. 46, No. 12, pp. 1330–1336. DOI: 10.1134/S0020168510120113.
22. Koroleva L.F. Final polishing of metals to obtain nanoroughened surface. *Nanotechnologies in Russia*, 2012, vol. 7, Nos. 1–2, pp. 67–75. DOI: 10.1134/S1995078012010119.

23. Koroleva L.F. Nanoparticulate zirconia-modified solid solutions of aluminum-iron oxides for polishing titanium metal. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structure*, 2015, iss. 1, pp. 90–102. DOI: 10.17804/2410-9908. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2015_Koroleva_L._F..pdf
24. Koroleva L.F. *Modifitsirovannye oksidy, oksidiroksid, shpineli khroma, dlya abrazivnykh i pigmentnykh materialov* [Modified Oxides, Oxyhydroxide, Chromium Spinels for Abrasive and Pigmentary Materials]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2002, 217 p. ISBN 5-7691-1236-0. (In Russian).
25. Koroleva L.F. Abrasive properties of aluminum iron oxide nanoparticles. *Inorganic Materials*, 2009, vol. 45 (10), pp. 1158–1165. DOI: 10.1134/S0020168509100148.
26. Isasi-Marín J., Pérez-Estébanez M., Díaz-Guerra C., Castillo J.F., Correcher V., Cuervo-Rodríguez M.R. Structural, magnetic and luminescent characteristics of Pr³⁺-doped ZrO₂ powders synthesized by a sol–gel method. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, No. 7. DOI: 10.1088/0022-3727/42/7/075418.

Подана в журнал: 16.12.2022

УДК 621.892.8:620.178.162

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.054-064

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО–РЕЛЬС»

Л. Ф. Королева^{1, а)}, Р. А. Саврай^{1, б)}, * Е. Ю. Просвирыков^{1, в)}, В. А. Костарев^{1, г)},
С. В. Павлышко^{1, д)}, П. В. Костарев^{2, е)}

¹Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия

- а)  <https://orcid.org/0000-0001-6650-7494>  lq@imach.uran.ru;
б)  <https://orcid.org/0000-0001-9873-3621>  ras@imach.uran.ru;
в)  <https://orcid.org/0000-0002-2349-7801>  evgen_pros@mail.ru;
г)  ksmtkt@gvaik.mail.com;
д)  <https://orcid.org/0000-0003-0526-8500>  psv@imach.uran.ru;
е)  ksmtkt@gvaik.mail.com

* Ответственный автор. Эл. почта: ras@imach.uran.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

Тел.: +7 (343) 362–30–14

В работе исследованы полирующая способность трибохимически активного абразивного материала на основе твердого раствора оксидов железа и алюминия, а также твердого раствора оксидов алюминия и железа, модифицированного добавками оксидов циркония и иттрия, и триботехнические свойства смазки с добавками данных абразивных материалов. Установлено, что модифицированные порошки $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ обладают существенно более высокой полирующей способностью и обеспечивают существенно более низкую шероховатость поверхности, чем немодифицированный порошок $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$. При этом, варьируя содержание модифицирующих оксидов, можно менять трибохимическую активность абразивного порошка и подбирать наилучший состав в зависимости от полируемого материала. Показано, что добавка данных абразивных порошков оказывает существенное влияние на триботехнические свойства смазки для контакта «колесо–рельс». По результатам лабораторных испытаний исследуемых смазочных композиций можно предположить эффективность их использования для контакта «колесо–рельс».

Ключевые слова: трибохимически активный абразивный материал, полирующая способность, шероховатость поверхности, смазка для системы «колесо–рельс», нагрузка сваривания, диаметр пятна износа.

1. Введение

Смазка является одним из наиболее эффективных путей обеспечения надежности и долговечности подвижных сопряжений деталей машин и механизмов, минимизации энергетических потерь при их эксплуатации, обеспечения устойчивой работы сопряжений. Для снижения износа систем «колесо–рельс» железнодорожного транспорта также используются различные смазки. К смазкам, наносимым в зону трения «колесо–рельс», предъявляется широкий набор требований: в частности, эти смазки должны обладать высокими адгезионными, противозадирными, противоизносными и антикоррозионными свойствами, а также безопасностью и экологичностью [1]. Однако существующие смазки не в полной мере удовлетворя-

ют современным требованиям по износу железнодорожных рельсов и колес. При контакте колеса и рельса возникают силы, направляющие движение подвижного состава, так называемые силы крипа (от англ. creep – ползти). Они обусловлены тем, что материалы колеса и рельса не абсолютно твердые. В контакте наблюдаются микродеформации рельса и колеса, что определяет постепенное нарастание силы крипа с ростом относительного проскальзывания колеса по рельсу и соответствующим увеличением износа. Поэтому разработка новых смазочных композиций для использования в системе «колесо–рельс» является важнейшей научной и практической задачей.

Как правило, улучшение эксплуатационных характеристик смазок достигается за счет введения в их состав различных присадок. В этой связи в качестве добавки к смазке для рельсов и колес целесообразно рассмотреть возможность использования тонкодисперсных абразивных материалов, используемых для финишного полирования прецизионных изделий. Обычно для получения минимально шероховатой поверхности механическим полированием применяют абразивные дисперсные материалы с высокой твердостью, например нанодиазидные порошки (как природные, так и синтетические), а также карбиды бора и кремния, кубический нитрид бора с зернистостью от 0,01–0,3 до 6–10 мкм; находят применение и ультрамикропорошки на основе корунда. При использовании этих материалов отмечаются длительность и многостадийность процесса, при котором доводочное полирование прецизионных изделий осуществляется за 3–5 операций с последовательным уменьшением зернистости абразива в составе паст и суспензий, используемых на операциях предварительной, чистовой и тонкой доводки [2–14]. Предыдущие исследования показали, что для получения шероховатости поверхности $Ra < 0,02$ мкм абразив должен обладать химической (трибохимической) активностью в процессе трения [15–18] и что для обеспечения высокой производительности и нанощероховатости поверхности в процессе финишного полирования различных металлических материалов эффективно использование тонкозернистых трибохимически активных абразивных материалов [19–23]. Полирование с использованием таких абразивных материалов можно представить как совокупность процессов механического, адсорбционного, адгезионного смачивания и окисления поверхностного слоя. При этом абразивный материал, полученный методом термообработки аммонийных гидроксокарбонатов алюминия и железа, имеет более высокую полирующую способность, чем корунд или карбид бора [15, 19–23]. Исходя из уникальных полирующих свойств трибохимически активных абразивных материалов, можно ожидать, что добавка такого материала к маслу, смазывающему пару «колесо–рельс», окажется эффективной для повышения эксплуатационных характеристик смазки, однако этот вопрос до настоящего времени не был исследован. Поэтому целью данной работы явилось исследование полирующей способности трибохимически активного абразивного материала на основе твердого раствора оксидов железа и алюминия, а также твердого раствора оксидов алюминия и железа, модифицированного добавками оксидов циркония и иттрия, и триботехнических свойств смазки с добавками данных абразивных материалов.

2. Материал и методика эксперимента

Порошки на основе твердого раствора оксидов алюминия и железа ($Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$), а также твердого раствора оксидов алюминия и железа, модифицированного оксидами циркония и иттрия ($Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$), получали термообработкой осажденных аммиачных гидроксокарбонатов в интервале температур 1000–1150 °С. В процессе осаждения вводили цирконил-ионы в виде 0,1 М раствора $ZrOSO_4$ и ионы иттрия в виде 0,1 М раствора YCl_3 . Концентрацию оксида железа в готовом продукте варьировали в интервале 0,12–0,2 мол. %, концентрацию оксидов циркония и иттрия – в интервале 0,005–0,01 мол. %. Концентрацию алюминия, железа, и модифицирующих оксидов в образцах определяли по стандартным методикам рентгенофлуоресцентного анализа с применением энергодисперсионного спектрометра Shimadzu EDX-900HS с относительной погрешностью $\pm 0,0005$ мол. %. Концентрацию

NH_4^+ определяли фотометрическим методом; концентрацию CO_3^{2-} определяли волнометрическим методом с улавливанием углекислого газа раствором щелочи после нагревания при 220–250 °С образцов, высушенных при комнатной температуре; концентрацию суммы OH^- и CO_3^{2-} групп определяли оксалатным методом. Различные аспекты синтеза порошков на основе твердого раствора оксидов железа и алюминия подробно рассмотрены в [21–26].

Для исследования фазового состава порошков применяли ИК-спектроскопический метод с использованием спектрофотометра Shimadzu JR-475 (порошки прессовали в таблетки с KBr) и рентгенофазовый анализ (РФА) с использованием дифрактометра STOE STADI-P с программой, включающей сопоставление дифракционных максимумов с данными картотеки JCPDS-JCDD PDF2, в CuK_α -излучении (никелевый фильтр), в области спектра 2θ от 5 до 70° с шагом сканирования 0,03° и подсчетом секунд от 5 до 25 для каждого шага. Гранулометрический состав порошков получали методом седиментации с помощью центрифугального седиментографа Shimadzu Analyzier SA-CP2 (вязкость дисперсионной среды 0,0093 П, плотность жидкой фазы 1,0 г/см³).

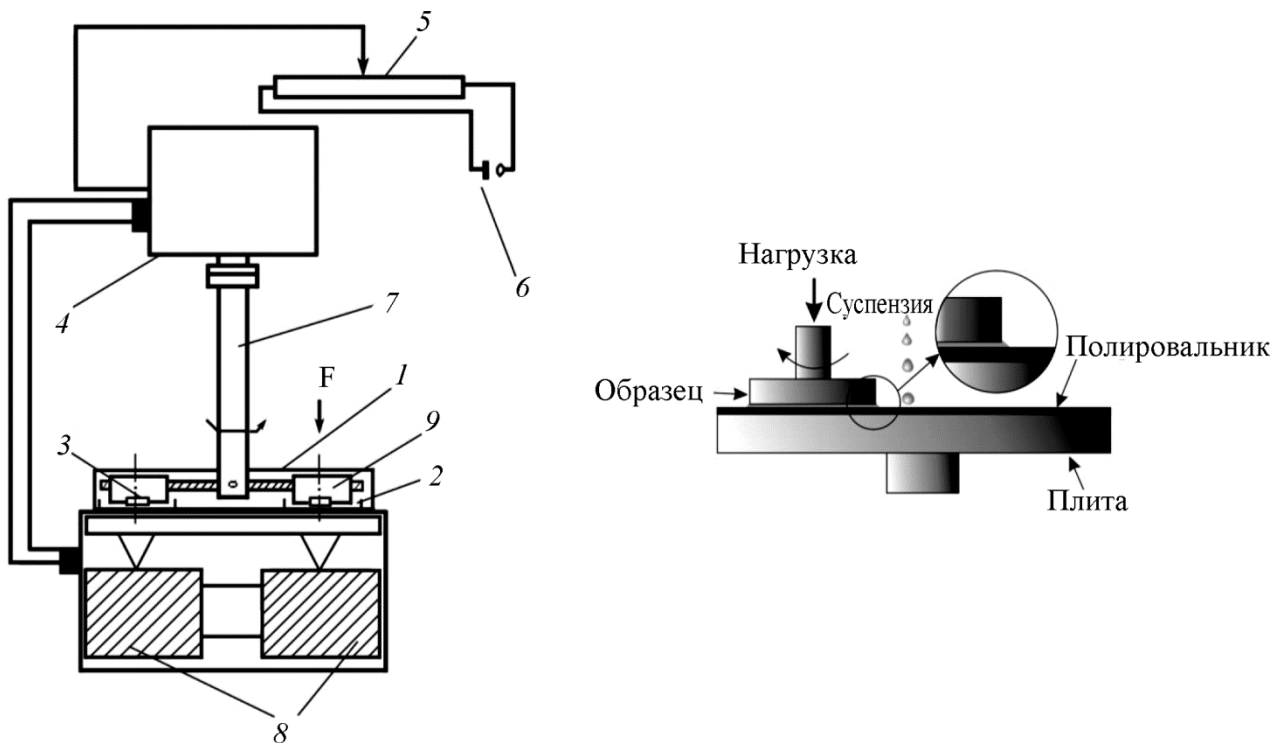


Рис. 1. Схема установки полирования: 1 – плита; 2 – лоток для полировальной пасты; 3 – образец; 4 – электродвигатель; 5 – резистор; 6 – источник энергии; 7 – шпиндель; 8 – электромагниты; 9 – нагрузка

Образцы для полирования изготавливали из рельсовой стали М76 (вырезали из рельса РП75). Начальное значение шероховатости образцов составило $R_a = 0,3\text{--}1,2$ мкм. Для моделирования процесса полирования была сконструирована лабораторная установка на базе вибрационно-полировального станка Metapolan-2 (рис. 1). Образцы помещали в специальные держатели на платформе, покрытой сукном, куда каждые 15 мин наносили полировальную пасту. Паста была подготовлена из абразивного порошка (10 г) и дистиллированной воды (90 мл) со значением рН среды, равным 7–8. Агломерация пасты отсутствовала в течение всего процесса полировки. Контактное давление составляло 12–18 кПа, вращение образцов осуществляли за счет вращения шпинделя от электродвигателя, скорость вращения составляла 89 об./мин (1,4 м/с). Абразивные свойства образцов в процессе полирования исследова-

ли согласно стандартным методикам измерения производительности (полирующей способности) и шероховатости поверхности Ra, оцениваемой с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100 как среднее арифметическое значение неровностей профиля на базовой длине 0,08 мм. Производительность процесса полирования (полирующую способность) вычисляли по формуле

$$P = \frac{\Delta M}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

где ΔM – среднее изменение массы образцов в процессе полирования, мг; S – площадь полируемой поверхности образцов, см^2 ; τ – длительность полирования, мин.

Для триботехнических испытаний использовали смазку полужирную ПУМА для контакта «колесо–рельс» промышленного производства, в которую добавляли порошки $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ в различном количестве (табл. 1). Испытания в условиях трения скольжения по схеме четырех шариков проводили на машине трения ЧМТ-1. Условную нагрузку сваривания P_c определяли путем нагружения пирамиды из трех шариков диаметром 12,70 мм из стали ШХ-15 шариком такого же диаметра, вращающимся со скоростью 1460 об./мин. Режим нагружения – по 10 секунд с интервалом 50 кгс, начиная с нагрузки 100 кгс. За условную нагрузку сваривания принимали среднее значение между нагрузкой, предшествующей задиру, и нагрузкой, при которой произошел гарантированный задир. Диаметр пятна износа $D_{\text{и}}$ определяли в соответствии с ГОСТ 9490-75 путем нагружения пирамиды из шариков аналогично схеме, использованной при определении нагрузки сваривания. Режим нагружения – 60 минут с нагрузкой 20 кгс. За диаметр пятна износа принимали среднее арифметическое значение диаметров пятен износа трех шариков. Диаметр пятна износа каждого шарика определяли как среднее значение между большой и малой осями лунок износа.

Таблица 1

Состав исследуемых смазочных композиций

Наименование образца	Состав образца
Образец № 1 (базовый)	Без добавки
Образец № 2	1 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
Образец № 3	0,5 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$
Образец № 4	1,0 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены кинетические кривые изменения полирующей способности, а на рис. 3 – кинетические кривые изменения шероховатости поверхности при полировании стали М76 порошками различного состава. Из этих данных видно, что модифицированные порошки $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ обладают существенно более высокой полирующей способностью и обеспечивают существенно более низкую шероховатость поверхности, чем немодифицированный порошок $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. При этом варьирование содержания ZrO_2 в составе модифицированного порошка также оказывает влияние и на полирующую способность, и на шероховатость поверхности. В частности, увеличение содержания ZrO_2 от 0,004 до 0,008 мол. % в составе модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ повышает его полирующую способность, но увеличивает шероховатость (снижает качество) полируемой поверхности. Это может быть обусловлено повышенной трибохимической активностью модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$, содержащего 0,008 моль % ZrO_2 . Следовательно, варьируя содержание модифицирующих оксидов, можно менять трибохимическую активность

абразивного порошка и подбирать наилучший состав в зависимости от полируемого материала.

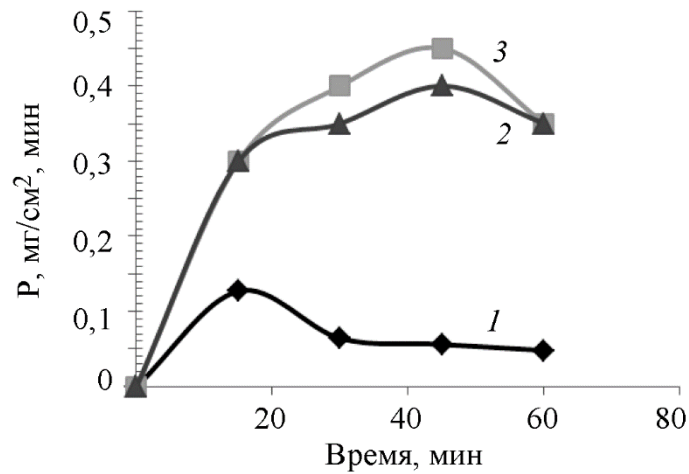


Рис. 2. Кинетические кривые изменения полирующей способности P при полировании стали М76 порошками $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (1) и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ при содержании ZrO_2 в количестве 0,008 мол. % (2) и 0,004 мол. % (3)

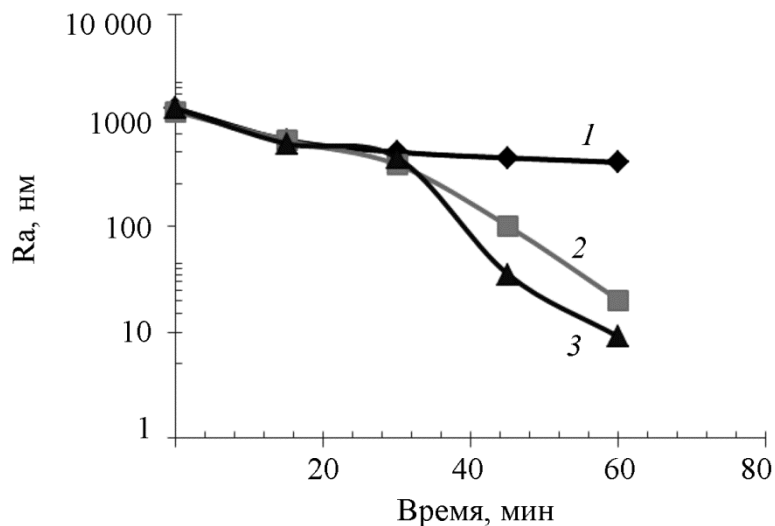


Рис. 3. Кинетические кривые изменения шероховатости R_a при полировании стали М76 порошками $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (1) и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ при содержании ZrO_2 в количестве 0,008 мол. % (2) и 0,004 мол. % (3)

Результаты испытаний исследуемых смазочных композиций в условиях трения скольжения по схеме четырех шариков представлены в табл. 2. Из этих данных видно, что добавка порошков $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ оказывает существенное влияние на триботехнические свойства смазки ПУМА для контакта «колесо–рельс». В частности, смазочная композиция с добавкой 1 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ демонстрирует увеличение условной нагрузки сваривания на 26,7 % по сравнению с испытаниями базового образца, однако при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 48,3 %. Следовательно, данная смазочная композиция обладает более высокими антизадирными свойствами, но более низкими противоизносными свойствами по сравнению с базовым образцом. Смазочная композиция с добавкой 0,5 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ демонстрирует сохранение условной нагрузки сваривания на том же уровне по сравнению с испытаниями базового образца, однако при

этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 12,7 %. Следовательно, данная смазочная композиция обладает близкими антизадирными свойствами, но более низкими противоизносными свойствами по сравнению с базовым образцом. Смазочная композиция с добавкой 1,0 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ демонстрирует уменьшение условной нагрузки сваривания на 33,3 % по сравнению с испытаниями базового образца, и при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 20 %. Следовательно, данная смазочная композиция обладает более низкими антизадирными свойствами и более низкими противоизносными свойствами по сравнению с базовым образцом.

Таблица 2

Условная нагрузка сваривания P_c и диаметр пятна износа $D_{и}$ при испытаниях исследуемых смазочных композиций в условиях трения скольжения по схеме четырех шариков

Наименование образца	P_c , кгс	$D_{и}$, мм
Образец № 1 (базовый)	750	0,300
Образец № 2	950	0,445
Образец № 3	750	0,338
Образец № 4	500	0,360

Важно отметить, что повышение нагрузки сваривания и увеличение диаметра пятна износа характерно для абразивных присадок, что и наблюдается у смазочной композиции с добавкой 1 масс. % $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Отсутствие роста или уменьшение условной нагрузки сваривания для смазочных композиций с добавкой $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ может быть обусловлено ростом адгезии в паре трения за счет снижения шероховатости трущихся поверхностей под воздействием трибохимически активного абразивного материала (см. рис. 3). Отметим также, что, несмотря на существенно более высокую полирующую способность модифицированных порошков $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ (см. рис. 2), диаметр пятна износа у смазочных композиций с добавкой данных порошков существенно ниже, чем у смазочной композиции с добавкой немодифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (см. табл. 2). Таким образом, по результатам лабораторных испытаний исследуемых смазочных композиций можно предположить эффективность их использования для контакта «колесо–рельс». Однако, чтобы сделать однозначный вывод, необходимы испытания, приближенные к реальным условиям эксплуатации, или натурные испытания.

4. Заключение

Исследованы полирующая способность трибохимически активного абразивного материала на основе твердого раствора оксидов железа и алюминия, а также твердого раствора оксидов алюминия и железа, модифицированного добавками оксидов циркония и иттрия, и триботехнические свойства смазки с добавками данных абразивных материалов.

Установлено, что модифицированные порошки $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ обладают существенно более высокой полирующей способностью и обеспечивают существенно более низкую шероховатость поверхности, чем немодифицированный порошок $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. При этом варьирование содержания ZrO_2 в составе модифицированного порошка также оказывает влияние и на полирующую способность, и на шероховатость поверхности. В частности, увеличение содержания ZrO_2 от 0,004 до 0,008 мол. % в составе модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ повышает его полирующую способность, но увеличивает шероховатость (снижает качество) полируемой поверхности. Это может быть обусловлено повышенной трибохимической активностью модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$, содержащего 0,008 мол. % ZrO_2 . Следовательно, варьируя содержа-

ние модифицирующих оксидов, можно менять трибохимическую активность абразивного порошка и подбирать наилучший состав в зависимости от полируемого материала.

Показано, что добавка порошков $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ и $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ оказывает существенное влияние на триботехнические свойства смазки ПУМА для контакта «колесо–рельс». В частности, смазочная композиция с добавкой 1 масс. % $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ демонстрирует увеличение условной нагрузки сваривания на 26,7 % по сравнению с испытаниями базового образца, однако при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 48,3 %. Смазочная композиция с добавкой 0,5 масс. % $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ демонстрирует сохранение условной нагрузки сваривания на том же уровне по сравнению с испытаниями базового образца, однако при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 12,7 %. Смазочная композиция с добавкой 1,0 масс. % $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ демонстрирует уменьшение условной нагрузки сваривания на 33,3 % по сравнению с испытаниями базового образца, и при этом наблюдается увеличение диаметра пятна износа на 20 %. Таким образом, по результатам лабораторных испытаний исследуемых смазочных композиций можно предположить эффективность их использования для контакта «колесо–рельс». Однако, чтобы сделать однозначный вывод, необходимы испытания, приближенные к реальным условиям эксплуатации, или натурные испытания.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по темам № АААА-А18-118020790142-9 и № АААА-А18-118020790147-4.

Оптическая профилометрия и триботехнические испытания выполнены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Применение смазки для системы «колесо–рельс». Решение проблемы износа с использованием отходов производства / Б. Тувшинтур, Д. И. Винокуров, Г. А. Якимова, В. Е. Гозбенко // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 3 (27). – С. 23–31.
2. Artemov A. S. Polishing nanodiamonds // Phys. Solid State. – 2004. – Vol. 46. – P. 687–695. – DOI: 10.1134/1.1711453.
3. Jackson M. J., Mills B., Hitchiner M. P. Controlled wear of vitrified abrasive materials for precision grinding applications // Sadhana. – 2003. – Vol. 28, No. 5. – P. 897–914. – DOI: 10.1007/BF02703320.
4. Bakharev V. P. Dispersion of Ceramics and Composites in Diamond Finishing by Free Abrasive // Russ. Engin. Res. – 2009. – Vol. 29, No. 2. – P. 162–168. – DOI: 10.3103/S1068798X09020129.
5. Assessment of surface roughness and reflectance of nonmetallic products upon diamond abrasive finishing / Yu. D. Filatov, V. P. Yashchuk, A. Yu. Filatov, U. Heisel, M. Storchak and G. Monteil // J. Superhard Mater. – 2009. – Vol. 31. – P. 338–346 – DOI: 10.3103/S1063457609050098.
6. Storozhenko P. A., Guseinov Sh. L., and Malashin S. I. Nanodispersed powders: synthesis methods and practical applications // Nanotekhnol. Russia. – 2009. – Vol. 4, Nos. 5–6. – P. 262–274. – DOI: 10.1134/S1995078009050024.
7. Pokropivnyi V. V., Silenko P. M. Silicon carbide nanotubes and nanotubular fibers: synthesis, stability, structure and classification // Theor. Exp. Chem. – 2006. – Vol. 42, No. 1. – P. 3–15. – DOI: 10.1007/s11237-006-0010-y.
8. Khanra A. K. Production of boron carbide powder by carbothermal synthesis of gel material // Bull. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 30, No. 2. – P. 93–96. – DOI: 10.1007/s12034-007-0016-7.
9. Bogdanov S. P. Influence of superstoichiometric boron on the Synthesis of cubic Boron nitride // Glass Physics and Chemistry. – 2008. – Vol. 34, No. 3. – P. 336–339. – DOI: 10.1134/S1087659608030164.

10. An abrasive-resistant corundum ceramic for drawing microwires / E. V. Degtyareva, I. I. Kabakova, E. B. Skorodumova, V. E. Armyanovskii // *Refractories*. – 1982. – Vol. 23, Nos. 1–2. – P. 82–87. – DOI: 10.1007/BF01397952.
11. Гаршин А. П., Гропянов В. М., Лагунов Ю. В. Абразивные материалы. – Л. : Машиностроение, 1983. – 230 с.
12. Viktorov V. V., Fotiev A. A., and Badich V. D. Abrasive and Thermal Properties of Al_2O_3 – Cr_2O_3 Solid Solutions // *Inorg. Mater.* – 1996. – Vol. 32, No. 1. – P. 55–57.
13. Котов Ю. А., Саматов О. М. Характеристики порошков оксида алюминия, полученных импульсным нагревом проволоки // *Поверхность*. – 1994. – № 10–14. – С. 90–94.
14. A sol-gel method for synthesizing porous iron-aluminum oxide substances and regulating their physicochemical characteristics / V. M. Belousov, V. M. Chertov, É. V. Rozhkova, V. I. Litvin and V. A. Zazhigalov // *Theor. Exp. Chem.* – 1997. – Vol. 33, No. 2. – P. 103–105. – DOI: 10.1007/BF02765955.
15. Королева Л. Ф. Трибохимическая активность абразивных материалов на основе смешанных оксидов в процессе полирования металлов // *Физика и химия обработки материалов*. – 2006. – № 4. – С. 84–92.
16. Semi-abrasive free slurry with acid colloidal silica for copper chemical mechanical planarization / Nan-Hoon Kim, Jond-Heun Lim, Sang-Yong Kim, Eui-Goo Chang // *Journal of Material Science: Materials in Electronics*. – 2005. – Vol. 16. – P. 629–632. – DOI: 10.1007/s10854-005-3241-0.
17. Марченко Е. А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. – М. : Наука, 1979. – 118 с.
18. Ребиндер П. А. Значение физико-химических процессов при механическом разрушении и обработке твердых тел в технике // *Вестник АН СССР*. – 1940. – № 8. – С. 5–28.
19. Koroleva L. F. Modified Nanoparticle Oxides for Final Polishing // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2016. – Iss. 2. – P. 48–73. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.2.048-073. – URL: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2016_Koroleva_L.F._048_073.pdf
20. Koroleva L. F. Synthesis and abrasive properties of nanoparticulate modified solid solutions of aluminum and iron oxides // *Inorganic Materials*. – 2019. – Vol. 55 (6). – P. 556–562. – DOI: 10.1134/S0020168519060074.
21. Koroleva L. F. Synthesis and abrasive properties of nanoparticulate MoO_2 -modified $Al_{2-x}Fe_xO_3$ and $Fe_{2-y}Al_yO_3$ solid solutions // *Inorg. Materials*. – 2010. – Vol. 46, No. 12. – P. 1330–1336. – DOI: 10.1134/S0020168510120113. – ISSN 0020-1685.
22. Koroleva L. F. Final polishing of metals to obtain nanoroughened surface // *Nanotechnologies in Russia*. – 2012. – Vol. 7, Nos. 1–2. – P. 67–75. – DOI: 10.1134/S1995078012010119.
23. Koroleva L. F. Nanoparticulate zirconia-modified solid solutions of aluminum-iron oxides for polishing titanium metal // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structure*. – 2015. – Iss. 1. – P. 90–102. – DOI: 10.17804/2410-9908. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2015_Koroleva_L.F..pdf
24. Королева Л. Ф. Модифицированные оксиды, оксигидроксид, шпинели хрома для абразивных и пигментных материалов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 214 с.
25. Koroleva L. F. Abrasive properties of aluminum iron oxide nanoparticles // *Inorg. Materials*. – 2009. – Vol. 45, No. 10. – P. 1158–1165. – DOI: 10.1134/S0020168509100148.
26. Structural, magnetic and luminescent characteristics of Pr^{3+} -doped ZrO_2 powders synthesized by a sol-gel method / J. Isasi-Marín, M. Pérez-Estébanez, C. Díaz-Guerra, J. F. Castillo, V. Correcher, M. R. Cuervo-Rodríguez // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2009. – Vol. 42, No. 7. – DOI: 10.1088/0022-3727/42/7/075418.