



Научная статья

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 621.74:669.018.9620.18

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.035



ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Денис Владимирович Сухоруков ¹, Евгений Сергеевич Прусов ²,
Владислав Борисович Деев ³, Умар Шахидович Вахидов ⁴

^{1, 2, 3} Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

¹ director@inlittech.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0980-258X>

² eprusov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4189-877X>

³ deev.vb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8349-8072>

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Россия

³ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

⁴ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

⁴ umar-vahidov@mail.ru

Аннотация. В статье обсуждается возможность использования полимерных композиционных материалов на основе полиуретановой матрицы с добавлением металлических наполнителей для изготовления модельной оснастки с повышенными показателями износостойкости. Проведены трибологические испытания полиуретановых композитов с добавками железного порошка в условиях сухого трения. Показано, что равномерное распределение частиц железа в полиуретановой матрице при содержании 1 % Fe обеспечивает минимальные значения коэффициента трения (0,00378) и низкий уровень массового износа, в то время как увеличение содержания Fe до 6 % приводит к росту усредненных значений коэффициента трения (до 0,12831 на расстоянии 35 мм от торца) из-за локальной концентрации частиц, вызванной седиментацией. Анализ структуры поверхности полученных композитов в исходном состоянии и после испытаний показал качественное распределение наполнителей в матрице и прочную межфазную связь, предотвращающую выкрашивание металлических компонентов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, модельная оснастка, полиуретановые компаунды, износостойкость, коэффициент трения.

Благодарности: Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию (наименование темы научного исследования «Разработка научно-методических основ и методик производства и внедрения полимерных, композиционных материалов и смазочных композиций в интересах агропромышленного комплекса Российской Федерации»; код научной темы, присвоенный учредителем – FSFM-2024-0018).

Для цитирования: Сухоруков Д. В., Прусов Е. С., Деев В. Б., Вахидов У. Ш. Повышение износостойкости модельной оснастки из полимерных композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 262–266. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.035. EDN: <https://elibrary.ru/CZHNGE>.

Original article

ENHANCING THE WEAR RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITE FOUNDRY PATTERN

Denis V. Sukhorukov ¹, Evgeny S. Prusov ², Vladislav B. Deev ³,
Umar Sh. Vakhidov ⁴

^{1, 2, 3} Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

¹ director@inlittech.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0980-258X>

² eprusov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4189-877X>

³ deev.vb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8349-8072>

² Moscow Automobile and Road State Technical University, Moscow, Russia

³ Wuhan Textile University, Wuhan, China

³ National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

⁴ Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

⁴ umar-vahidov@mail.ru

Abstract. The paper explores the potential application of polymer composite materials based on a polyurethane matrix with the addition of metallic fillers for the production of tooling with enhanced wear resistance. Tribological tests

© Сухоруков Д. В., Прусов Е. С., Деев В. Б., Вахидов У. Ш., 2025

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

were conducted on polyurethane composites with iron powder additives under conditions of dry friction. It was demonstrated that a uniform distribution of iron particles within the polyurethane matrix at a content of 1% Fe ensures minimal friction coefficient values (0.00378) and a low level of mass wear. In contrast, increasing the Fe content to 6% leads to higher average friction coefficient values (up to 0.12831 at a distance of 35 mm from the edge) due to localized particle concentration caused by sedimentation. An analysis of the surface structure of the composites in their initial state and after testing revealed a qualitative distribution of fillers in the matrix and strong interfacial bonding, which prevents the spalling of metallic components.

Keywords: polymer composite materials, foundry pattern, polyurethane compounds, wear resistance, friction coefficient.

Acknowledgements: This work was prepared based on research funded by the federal budget under a state assignment (research topic title: "Development of scientific and methodological foundations and techniques for the production and implementation of polymer, composite materials, and lubricant compositions for the benefit of the agro-industrial complex of the Russian Federation"; research topic code assigned by the founder – FSFM-2024-0018).

For citation: Sukhorukov, D. V., Prusov, E. S., Deev, V. B. & Vakhidov, U. Sh. (2025). Enhancing the wear resistance of polymer composite foundry pattern. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 262-266. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.035. EDN: <https://elibrary.ru/CZHNGE>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных этапов разработки технологии изготовления отливок методом литья в разовые песчаные формы является выбор рационального материала для модельно-стержневой оснастки. При этом основными критериями являются, как правило, эксплуатационные характеристики, экономическая целесообразность и технологическая пригодность материала.

Древесина исторически является одним из наиболее часто используемых материалов для изготовления модельной оснастки [1]. Она имеет сравнительно низкую стоимость, малый вес, хорошо поддается обработке и текущему ремонту. Вместе с тем, оснастка из древесины подвержена воздействию влаги из формовочной смеси, короблению и изменению размеров, быстрее изнашивается из-за абразивного воздействия песка [2, 3]. Металлические модели (из чугуна, стали, алюминиевых сплавов) более долговечны, отличаются высокой размерной точностью и чистотой поверхности, устойчивы к изнашиванию и истиранию, однако имеют высокую стоимость, трудно поддаются ремонту и требуют особого внимания при обслуживании, что ограничивает их использование, особенно в мелкосерийном производстве.

В последние годы в мировой практике литейного производства для изготовления модельной и стержневой оснастки все более широко применяются полимерные материалы [4]. Они превосходят древесину по эксплуатационным характеристикам и обладают рядом преимуществ в сравнении с металлическими материалами, в частности, относительно невысокой стоимостью, меньшей массой, хорошей технологичностью. Полимерные материалы технологически удобны в использовании при изготовлении литейных моделей, так как хорошо склеиваются различными клеевыми составами, что позволяет получить необходимую конфигурацию заготовки, из которой затем будет изготовлена модель или стержневой ящик. Модельные пластики хорошо поддаются обработке на фрезерных и токарных станках без сколов или разрушения материала [5].

Одним из мировых лидеров в области разработки и производства высокоэффективных полиуретановых и эпоксидных материалов для модельно-стержневой оснастки является RAMPF Tooling Solutions. К примеру, предлагаемые компа-

нией полиуретановые плиты RAKU TOOL WB-1258, по заявлению производителя, отличаются высокой абразивной и химической стойкостью при твердости 80–85 ед. по Шору (D), прочности на сжатие 90–100 МПа и выдерживают не менее 100 тыс. съёмов. В отечественном литейном производстве полиуретановые и эпоксидные материалы пока применяются для изготовления модельной оснастки недостаточно широко. Высокоэффективные импортные материалы ограниченно доступны на рынке, а разработка и освоение импортозамещающих аналогов ведутся сравнительно невысокими темпами, не отвечающими в полной мере значительным технико-экономическим преимуществам, предоставляемым этими перспективными материалами.

Как показывает зарубежный опыт, существенного повышения эксплуатационных характеристик модельной оснастки можно достичь за счет применения полимерных композиционных материалов [6]. В частности, армирование полимерной матрицы порошкообразными металлическими или керамическими наполнителями позволяет повысить износостойкость, твердость, прочность на сжатие [7–9], в ряде случаев обеспечивая возможность регулирования теплофизических характеристик материала [10–12]. Так, в работе [13] установлено, что добавление частиц SiC (6,587 мкм) в количестве 13,18 об.% в полиуретановую матрицу способствует повышению теплопроводности с 0,253 до 0,521 Вт/м·К (на 106 %). Показано [14], что армирование полиуретана частицами Al₂O₃ (до 21 масс.%) позволяет в 1,14 раза повысить эрозионную стойкость, при этом композиты, обработанные различными силановыми связующими агентами, обладали разной устойчивостью к эрозии. Более значительное (почти вдвое в сравнении с чистым полиуретаном) повышение эрозионной стойкости отмечено в работе [15] при добавлении 10 масс.% керамических частиц Si₃N₄. Несмотря на достигнутые успехи в данном направлении, вопросы повышения износостойкости полимерных композитов за счет поиска новых составов и отработки технологических процессов их получения остаются актуальными. Необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение влияния различных типов наполнителей, их концентраций и технологии получения и обработки на эксплуатационные ха-

рактеристики модельной оснастки из полимерных композиционных материалов.

Целью настоящей работы является изучение трибологического поведения полимерных композиционных материалов на основе полиуретановой матрицы с добавками железного порошка в условиях сухого трения для оценки перспектив изготовления модельной оснастки с повышенной износостойкостью.

МЕТОДЫ

Для проведения трибологических испытаний были изготовлены опытные образцы полимерных композиционных материалов на основе двухкомпонентного полиуретанового компаунда АДВ 13-2 с добавками порошкового карбонильного железа Р-10 ГОСТ 13610-84 в количестве от 1 до 6 масс.%. Экспериментальные композиции заливали в трубки с внутренним диаметром 20 мм и высотой 155 мм.

Испытания на износостойкость проводились при помощи трибометра TRB (CSM Instruments, Швейцария), используя стальной шарик 6 мм в условиях сухого трения при комнатной температуре. Линейная скорость составляла 20 см/с при нагрузке 10 Н, длина пути – трения 300 м. Оценку износостойкости проводили по изменению массы образца до и после испытаний с точностью $\pm 10^{-4}$ г.

При исследовании микроструктуры синтезируемых полимерных композиционных материалов и треков износа после трибологических испытаний применяли исследовательский инвертированный металлографический микроскоп МИМ 43 (ООО «ЛОМО-МА», Россия). Захват изображений с микроскопа проводили с использованием цифровой камеры MC-20, работающей в комплекте со специализированным программным обеспечением LOMO-Micro systems MC view.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием встроенных средств программных пакетов Origin Pro и Microsoft Excel. При исследовании свойств и характеристик композиционных материалов в ходе прямых измерений для каждой серии опытов вычисляли среднее арифметическое полученных значений измеряемой величины, а также доверительные границы погрешности результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 для примера приведены репрезентативные снимки поверхности образца PUR + 1% Fe на различном расстоянии от торца (в исходном состоянии и после испытаний в условиях сухого трения). По аналогичному принципу были получены и проанализированы снимки для других рассматриваемых составов полимерных композитов.

Анализ снимков исходных композитов позволяет заключить, что поверхность характеризуется равномерным распределением металлических частиц железа в полиуретановой матрице. Металлические включения имеют различную морфологию, включая вытянутые и овальные формы, с отчетливыми границами между фазами. В целом можно сделать заключение о качественном распределении добавок в полимерной матрице и отсутствии значительных агломератов.

Трибологические испытания включали изме-

рение коэффициента трения и массового износа образцов, вырезанных на различных расстояниях от торца формованного изделия (цилиндр) из полимерного композита, чтобы учесть влияние седиментационных процессов. Результаты испытаний показывают значительное варьирование коэффициента трения и массового износа в зависимости от положения образца. К примеру, для образцов с содержанием 1 % Fe наблюдается минимальный коэффициент трения (в среднем 0,00378) на расстоянии 65 мм при массовом износе 0,0018 г. Для образцов с 6% Fe усредненный коэффициент трения демонстрирует более высокие значения у торца (0,12831 на 35 мм), что связано с концентрацией частиц железа в этой области вследствие седиментации, при этом массовый износ повышается до 0,0044 г.

Вместе с тем, отмечен ряд общих тенденций. Образцы с 1 % Fe имеют относительно стабильный коэффициент трения и низкие значения массового износа независимо от удаленности от торца формованной цилиндрической заготовки. При этом не наблюдалось каких-либо признаков выкрашивания частиц железа, что свидетельствует о прочной межфазной связи с материалом матрицы. При увеличении содержания Fe до 6 % наблюдается значительное увеличение коэффициента трения на некоторых участках (35 мм), что, вероятно, связано с эффектом локальной концентрации частиц железа, увеличивающих адгезию с материалом контртела и сопротивление движению.

После трибологических испытаний на снимках в области трека индентора отмечены характерные признаки износа, включая эрозию матрицы полиуретана и частичное «оголение» металлических включений. Контактное взаимодействие вызывает разрушение краевых областей частиц Fe и образование микротрещин в полимерной матрице. Эти изменения указывают на механическую деградацию материала под воздействием трения, сопровождающуюся возможностью частичной потери металлических компонентов и локальным разогревом, что могло привести к изменению свойств полимерной основы.

В современных исследованиях акцентируется внимание на сложной взаимосвязи между трибологическим поведением полимеров, в частности, полиуретана, и происходящими при трении структурными изменениями. Так, отмечается [16], что полимерный слой, перенесенный на поверхность контртела в результате процесса трения, обладает выраженной ориентацией, что приводит к предположению об аналогии характера его формирования с процессами экструзии полимеров при повышенных температурах. Однако формирование перенесенного слоя приходит при более низких температурах, поэтому не может быть объяснено исключительно внешними условиями, к примеру, давлением на контртело и скоростью скольжения при трении [17].

В целом, полученные результаты согласуются с выводами других работ по данному направлению, указывающих на сложное взаимодействие механических и структурных факторов в трибосистемах с участием полиуретана. В частности, анализ характера изменения поверхности образцов

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

полиуретановых композитов с частицами железа позволяет предположить, что внутренние процессы в материале, включая перераспределение

напряжений и изменение межфазной адгезии, играют значительную роль в его трибологическом поведении.

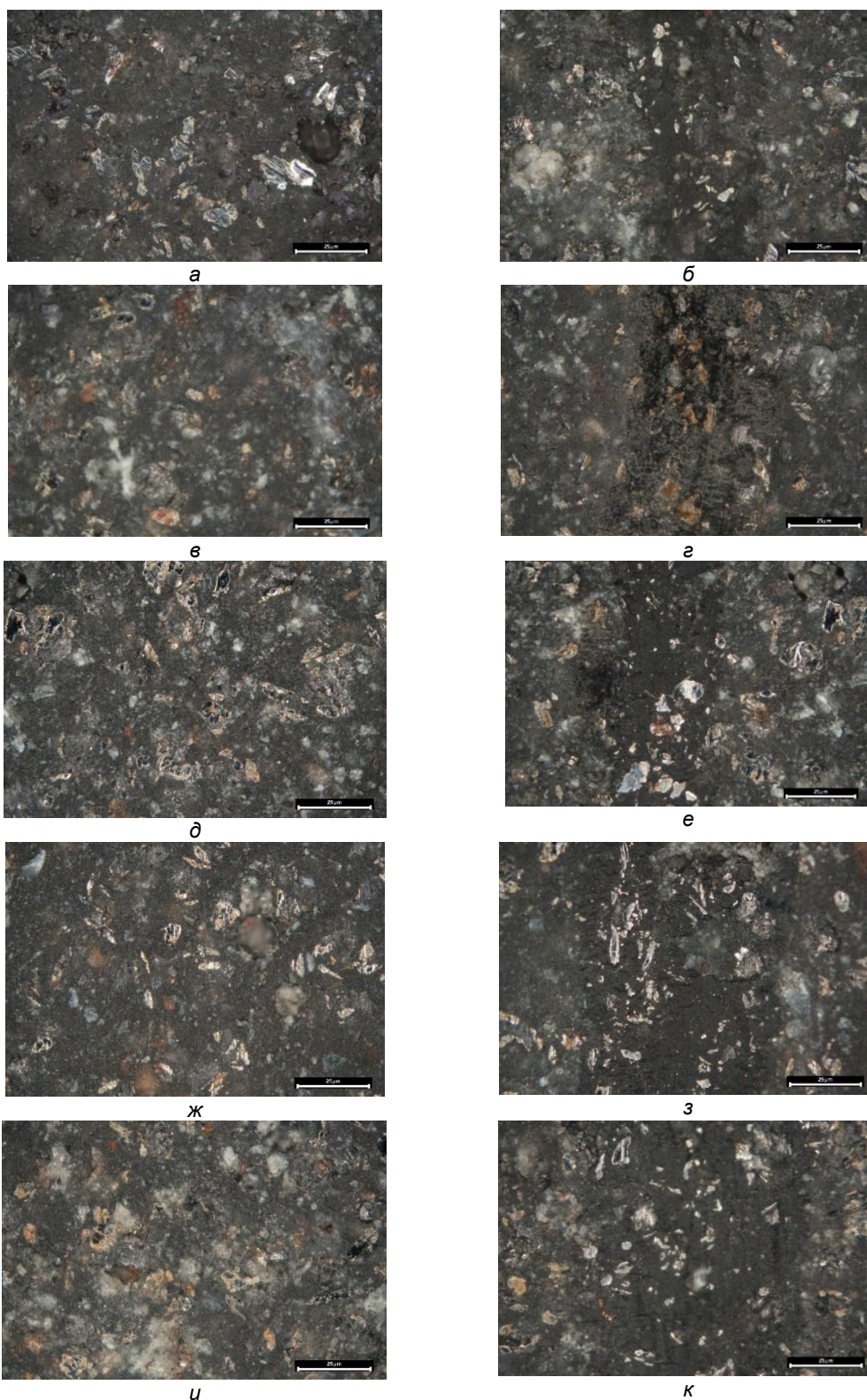


Рисунок 1 – Репрезентативные снимки поверхности образца PUR + 1 % Fe в исходном состоянии (а, в, д, ж, и) и после испытаний (б, г, е, з, к) на расстоянии от торца 35 мм (а, б), 65 мм (в, г), 95 мм (д, е), 125 мм (ж, з), 155 мм (и, к)

Figure 1 – Representative images of the surface of the PUR + 1% Fe sample in the initial state (a, c, d, e, g, i) and after testing (b, d, f, h, k) at a distance from the end face of 35 mm (a, b), 65 mm (c, d), 95 mm (e, f), 125 mm (g, h), 155 mm (i, k)

При этом прочная межфазная связь между компонентами (PUR + 1 % Fe) предотвращает выкрашивание металлических включений, однако с повышением содержания железа до 6 % в условиях сухого трения возможно локальное разрушение краевых областей включений Fe с их частичной эрозией. Фактически, речь в данном случае идет о практической целесообразности подбора рациональной доли армирующих добавок с учетом их физико-химической природы и фракционного состава для адаптации синтезируемых полимерных композиционных материалов к заданным условиям эксплуатации модельных комплектов.

ВЫВОДЫ

Результаты трибологических испытаний образцов полимерных композитов на основе полиуретана с добавками порошкового железа в совокупности с данными металлографических исследований поверхности образцов о возможности повышения износостойкости КМ PUR/Fe за счет обеспечения заданного распределения металлических включений в объеме матрицы. Полученные данные открывают перспективы для дальнейшего изучения механизмов взаимодействия металлических частиц и полимерных матриц в условиях трения, в том числе при абразивном изнашивании, а также разработки новых полимерных композиционных материалов с улучшенными характеристиками для использования при изготовлении модельной оснастки в литейном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Francis J.W. (1984). Practical patternmaking techniques for the foundry industry. *FVP Journal*, (24), 29–44.
2. Ohtani T., Inoue A. & Tanaka C. (2002). Abrasive wear properties of compressed sugi wood. *Journal of Wood Science*, (48), 473–478.
3. Ncube E. (2008). Use of simple abrasive-wear resistance test device to assess the suitability of selected hardwoods for wood flooring. *Scientific Research and Essays*, (3), 168–173.
4. Sukhorukov D., Kreshchik A., Sharshin V. & Sukhorukova E. (2020). Recycling of polymer materials for foundry patterns. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (919), 062037.
5. Nassar M.M.A., Arunachalam R. & Alzebedeh K.I. Machinability of natural fiber reinforced composites: a review. (2017). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (88), 2985–3004.
6. Czarnicka-Komorowska D., Gawdzińska K. & Popielarski P. (2022). Microscopic Analysis of the Aluminium Castings Produced with the use of Polymer Composite Patterns. *Archives of Foundry Engineering*, (22), 113–117.
7. Durand J.M., Vardavoulias M. & Jeandin M. (1995). Role of reinforcing ceramic particles in the wear behaviour of polymer-based model composites. *Wear*, (181-183), 833–839.
8. Sedakova E.B. & Kozyrev Y.P. (2018). Influence of Particle Size on the Wear Resistance and Strength of Polymer Composites. *Russian Engineering Research*, (38), 513–516.
9. Bardushkin V.V., Yakovlev V.B., Sychev A.P. & Lapitskii A.V. (2017). Predicting the limiting strength of chaotically reinforced polymer composites with dispersed antifrictional additives. *Russian Engineering Research*, (37), 471–474.
10. Sukhorukov D.V., Kechin V.A. & Sharshin V.N. (2008). Investigation of thermophysical properties of mold material for the production of gasified patterns. *Litejshchik Rossii*, (7), 38–41. (In Russ.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

11. Singh R. & Sharma P. (2008). Effective thermal conductivity of polymer composites. *Advanced Engineering Materials*, (10), 366–370.
12. Abbasov H. (2022). The effective thermal conductivity of polymer composites filled with high conductive particles and the shell structure. *Polymer Composites*, (43), 2593–2601.
13. Somdee P., Ansari M.A., Szabo T. & Marossy K. (2023). Improved thermal conductivity of polyurethane (PU)/SiC composite fabricated via solution casting method and its mechanical model for prediction and comparison. *Heliyon*, (9), e15571.
14. Zhou R., Lu D.H., Jiang Y.H. & Li Q.N. (2005). Mechanical properties and erosion wear resistance of polyurethane matrix composites. *Wear*, (259), 676–683.
15. Li M., Luan D., Ding W. & Zhang G. (2006). Effect of different ceramic powder on the erosive wear resistance of polyurethane composite. *Run Hua Yu Mi Feng/Lubrication Engineering*, (8), 58–60.
16. Laux K.A., Jean-Fulcrand A., Sue H.J., Bremner T. & Wong J.S.S. (2016). The influence of surface properties on slipping contact temperature and friction polyetheretherketone. *Wear*, (103), 397–404.
17. Ligier K., Olejniczak K., Napiórkowski J. (2021). Wear of polyethylene and polyurethane elastomers used for components working in natural abrasive environments. *Polymer Testing*, (100), 107247.

Информация об авторах

Д. В. Сухоруков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Е. С. Прусов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; ведущий научный сотрудник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета.

В. Б. Деев – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; профессор Уханьского текстильного университета; профессор кафедры «Обработка металлов давлением» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

У. Ш. Вахидов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева.

Information about the authors

D.V. Sukhorukov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Technologies of Functional and Structural Materials" of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

E.S. Prusov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Technologies of Functional and Structural Materials" of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; leading researcher of the Moscow Automobile and Road State Technical University.

V.B. Deev - Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; Professor of the Wuhan Textile University; Professor of the Department "Metal Forming" of the National University of Science and Technology MISIS.

U.Sh. Vakhidov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of "Construction and Road Machines" of Nizhny Novgorod State Technical University named after P.E. Alekseev.