

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 631.171:004.3:681.587.78

EDN: QOXYFK

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-1-10-18



## Влияние режимов и условий маслonaполнения полиамидных деталей на их износостойкость

В.С. Бычковский<sup>1✉</sup>, Н.Г. Филиппенко<sup>2</sup>, Л.В. Лившиц<sup>3</sup>, Т.Т. Чумбадзе<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

<sup>1</sup>АО «ЭЛКУС», Санкт-Петербург, Россия

**Резюме.** Целью исследования является изучение влияния температуры полиамидной детали и содержания гексана в технологической жидкости, пропитывающей поверхностный слой этой детали при маслonaполнении, на скорость ее абразивного изнашивания. В исследовании применен метод испытаний на абразивный износ, описанный в ГОСТ 11012–2017 «Пластмассы. Метод испытаний на абразивный износ». Для эксперимента использовано оборудование, работающее по схеме истирания «плоскость–диск» при высоких скоростях вращения диска (610 об/мин). Объектом исследований служили изготовленные из полиамида марки ПА6 образцы размерами 10х10 мм. В качестве абразивного материала была выбрана шкурка 6 марки СК19ХW по ГОСТ 344–79. В результате экспериментальных исследований была определена скорость абразивного изнашивания полимерного образца из полиамида марки ПА6, находящаяся в интервале от 0,016 до 0,029 мм/мин. Также были получены зависимости глубины абразивного изнашивания (до 2 мм) от времени износа для ненаполненных и маслonaполненных образцов при различных режимах и условиях обработки. Результаты эксперимента подтвердили влияние температуры полиамидного образца и содержания гексана в технологической жидкости пониженной вязкости при маслonaполнении на скорость абразивного изнашивания полиамидных образцов. Так, при температуре образца 75 °С и содержании гексана в технологической жидкости 40% при маслonaполнении достигнуто максимальное повышение износостойкости полиамидных образцов – на 54,5%. Полученные результаты исследования необходимы для разработки технологического обеспечения процесса маслonaполнения на заданную глубину поверхностного слоя полиамидных деталей, применяемых в узлах трения, которые эксплуатируются в условиях абразивного изнашивания под высокой нагрузкой.

**Ключевые слова:** маслonaполнение полиамидных деталей, абразивное изнашивание, технологическая жидкость с пониженной вязкостью, тяжелые условия работы полимерных деталей, полиамид марки ПА6

**Для цитирования:** Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Чумбадзе Т.Т. Влияние режимов и условий маслonaполнения полиамидных деталей на их износостойкость // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 1. С. 10–18. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-10-18>. EDN: QOXYFK.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Oil-impregnation parameters influence the wear resistance of polyamide components

Vladimir S. Bychkovskiy<sup>1✉</sup>, Nikolay G. Filippenko<sup>2</sup>, Alexander V. Livshits<sup>3</sup>,  
Tamara T. Chumbadze<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup>ELKUS JSC, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** This study investigates the abrasive wear rate of a polyamide component as a function of its temperature and hexane content in the process fluid used to impregnate its surface layer with oil. We employed an abrasive wear testing method described in GOST 11012–2017, “Plastics. Method of test for resistance to abrasion”. The experimental setup involved a plane–disc abrasion scheme with a high disc rotation speed of 610 rpm. Test samples (10 × 10 mm) were manufactured using polyamide grade PA6. The abrasive material was grade 6 CK19XW sandpaper, according to GOST 344–79. The research findings indicated that the abrasive wear rate of the PA6 polyamide samples ranged from 0.016 to 0.029 mm/min. This study also established relationships between the depth of abrasive wear (up to 2 mm) and the duration of wear for both non-impregnated and oil-impregnated samples under various processing conditions. The results confirm that the temperature of the polyamide sample and the hexane content in

the low-viscosity process fluid during oil impregnation influence the abrasive wear rate, with a maximum improvement in wear resistance of 54.5% achieved at a sample temperature of 75 °C and a hexane content of 40%. These findings are necessary for developing engineering support for oil impregnation to a specified depth of the surface layer in polyamide components used in friction units that operate under conditions of abrasive wear and high load.

**Keywords:** oil filling of polyamide parts, abrasive wear, low-viscosity process fluid, severe working conditions of polymer parts, PA6 polyamide type

**For citation:** Bychkovskiy V.S., Filippenko N.G., Livshits A.V., Chumbadze T.T. Oil-impregnation parameters influence the wear resistance of polyamide components. *iPolytech Journal*. 2026;30(1):10-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-10-18>. EDN: QOXYFK.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в области железнодорожного транспорта используется большая номенклатура полимерных изделий, применяемых в узлах трения, которые эксплуатируются в условиях абразивного изнашивания под высокой нагрузкой. Приемлемыми для таких условий могут быть детали тележек железнодорожных вагонов: пассажирских (68-4095), грузовых (18-578), моторных (ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД2Т) [1, 2].

Тележки модели 68-4095 предназначены для подкатки под пассажирские вагоны массой брутто до 72 т для скоростей движения до 160 км/ч.

Тележка 18-578 двухосная – с центральным рессорным подвешиванием с увеличенным прогибом.

ЭР2Р – советский пригородный электропоезд постоянного тока, созданный на Рижском вагоностроительном заводе. Построен на базе механической части электропоезда ЭР2 с применением электрооборудования от электропоезда ЭР22В.

ЭР2Т – пригородный электропоезд постоянного тока с рекуперативно-реостатным торможением производства Рижского вагоностроительного завода, являющийся предшественником электропоезда ЭР2Р. Заводское обозначение – 62-297.

ЭД2Т расшифровывается как «электропоезд Демиховский 2-го типа», исполнение «Т» – рекуперативно-реостатное торможение».

Полимерные изделия в них представлены в основном в виде прокладок, втулок и вкладышей, изготовленных из полиамидных материалов марки ПА6 [3, 4]. Данные детали работают в узле трения с ответной металлической деталью, изготовленной из высоколегированной литейной стали. Тяжелые условия работы этих узлов включают в себя попадание абразивных частиц в зону

трения, состоящих из грязи и пыли, которые приводят к увеличению износа полиамидного изделия и способствуют сокращению межремонтного периода [5, 6].

Для снижения скорости абразивного изнашивания полиамидных изделий, работающих в сложных условиях, в научном материале [7] был предложен способ повышения износостойкости, основанный на высокочастотной сушке детали с последующим наполнением ее поверхностного слоя на заданную глубину специальной технологической жидкостью с пониженной вязкостью (ТЖПВ), состоящей из гексана и моторного масла М8-В.

Для доказательства работоспособности предложенного способа и его дальнейшего исследования необходимо определить, насколько снизится скорость абразивного изнашивания полиамидной детали в зависимости от температуры полиамидного образца и содержания гексана в технологической жидкости, являющихся режимом и условием технологического процесса маслonaполнения соответственно.

Цель работы – определение зависимости скорости абразивного изнашивания от содержания гексана в наполнителе и температуры полиамидного изделия.

Для достижения поставленной цели необходимо выбрать метод определения скорости абразивного изнашивания, оборудование, материалы и провести экспериментальные исследования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения порядка проведения экспериментальных исследований был взят за основу метод испытания пластмасс на истирание (износ) шлифовальной шкуркой [8, 9]. Порядок проведения работ описан в межгосударственной стандартизации – ГОСТ 11012–2017 «Метод испытания на абразивный износ»<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>ГОСТ 11012–2017. Метод испытания на абразивный износ. Введ. 01.07.2018. М.: Стандартинформ, 2018.

Основными этапами метода определения показателя истирания исследуемого образца являются:

- кондиционирование;
- притирка под нагрузкой 19,62 Н;
- взвешивание;
- истирание под той же нагрузкой при пути истирания не менее 10 м;
- повторное взвешивание;
- обработка полученных данных.

Образцами исследования являются образцы диаметром 10 мм и высотой 10 мм, изготовленные из полиамида марки ПА6. Данные образцы предварительно были высушены до полного удаления влаги [10] в модернизированной установке УЗП-2500 [11, 12], далее были пропитаны ТЖПВ при различных режимах и условиях, представленных в таблице (в разд. «Обсуждение») [13]. Образцы были обработаны по 3 шт. по каждому режиму и условию маслonaполнения. Согласно проведенному ранее исследованию [13], маслonaполнение полиамидных образцов не рекомендовано, так как при температуре образца 75°C происходит интенсивное испарение гексана из технологической жидкости.

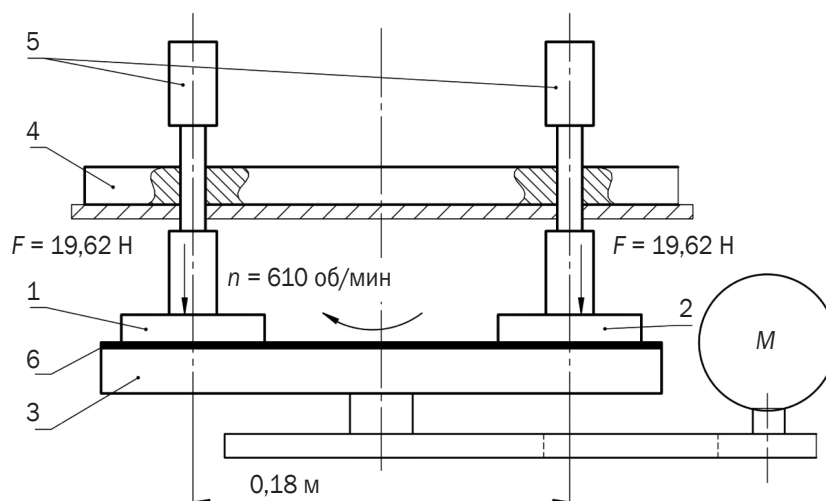
Для определения величины изменения скорости абразивного изнашивания были использованы эталонные образцы (в количестве 24 шт.) тех же размеров и того же ма-

териала, что и маслonaполненные образцы. Для данных образцов выполнено кондиционирование, согласно ГОСТ 12423–2013<sup>6</sup>.

Абразивным материалом для испытания полиамидных образцов принята шкурка 6 марки СК19ХW по ГОСТ 344–79<sup>7</sup>, выбранная согласно ГОСТ 11012–2017 [14, 15].

Для выполнения абразивного изнашивания было использовано испытательное оборудование, спроектированное и изготовленное на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство», входящей в организационную структуру Иркутского государственного университета путей сообщения. Испытания на износ на данной установке проводятся по схеме «плоскость–диск» [16–18] с числом оборотов диска 610 об/мин. Основной состав оборудования состоит из исследуемого образца 1, эталонного образца 2, диска 3, опорной плиты 4, груза 5.

При использовании данной установки было принято решение внести некоторые корректировки метода определения истирания. В связи с тем, что в ГОСТ 11012–2017 определяется показатель истирания (мм<sup>3</sup>/м), а для данного исследования необходимо определить скорости абразивного изнашивания (мм/мин), принято решение определять величину износа, вычисляемую через каждые 7 мин истирания по формуле:



**Рис. 1.** Схема исследовательской установки: 1 – эталонный образец (ненаполненный); 2 – испытуемый образец (наполненный); 3 – диск; 4 – плита подвижная; 5 – груз; 6 – шкурка ГОСТ 344–79<sup>6</sup>

**Fig. 1.** Diagram of the research setup: 1 – reference sample (unfilled); 2 – test sample (filled); 3 – disk; 4 – movable plate; 5 – load; 6 – skin GOST 344-79<sup>6</sup>

<sup>6</sup>ГОСТ 12423–2013. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). Введ. 05.11.2013. М.: Стандартинформ, 2014.

<sup>7</sup>ГОСТ 344–79. Шкурка шлифовальная тканевая водостойкая. Технические условия. Введ. 01.01.1981. (изм.). М.: Изд-во стандартов, 2003.

$$h = \frac{m_{i-1} - m_1}{\rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}$$

где  $m_{i-1}$  и  $m_1$  – масса образца на предыдущем и текущем промежутке эксперимента, г;  $\rho$  – плотность полиамида марки ПА6, 1,14 г/мм<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр образца, 10 мм.

Периодически замер массы изнашиваемых образцов выполнялся на лабораторных аналитических весах FA2204E.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатом проведения экспериментальных исследований являются данные усредненных значений (из трех значений на каждый опыт) о глубине и времени абразивного изнашивания для эталонных и маслonaполненных образцов. Итоговый результат эксперимента представлен на рис. 2.

Для обработки данных принято провести черту на построенном графике, соответствующей глубине износа до 1 мм. Исходя из этого, полученные экспериментальные данные позволили выявить максимальное время абразивного изнашивания полиамидного образца на глубину 1 мм (67 мин), которое соответствует температуре образца – 75 °С, и содержание гексана в ТЖПВ 40%. А минимальное время абразивного изнашивания исследуемого материала составило 34–36 мин при температурах маслonaполнения 35

и 50 °С при добавке гексана в ТЖПВ 60%. Полученные результаты о наименьшем изменении износостойкости исследуемого материала образца (близкого к эталонному) можно обосновать малым содержанием смазывающего материала (масла) в технологической жидкости пониженной вязкости при маслonaполнении, что способствует низкому эффекту смазывания поверхностного слоя образца.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Для дальнейшего анализа полученных данных принято решение определить скорость абразивного изнашивания полиамидных образцов до 1 мм, результаты расчета представлены в таблице.

Дальнейшим действием стал выбор из полученных данных минимального значения скорости абразивного изнашивания полиамидных образцов при каждом содержании гексана в ТЖПВ при разных температурных режимах маслonaполнения полиамида марки ПА6, результаты представлены на рис. 3.

Зависимость скорости абразивного изнашивания до 1 мм от температуры полиамидного образца и содержания гексана в технологической жидкости с пониженной вязкостью

Зависимость, представленная на рис. 3, позволила выявить наибольшее уменьшение скорости абразивного изнашивания образца из полиамида марки ПА6 до 54,48%,

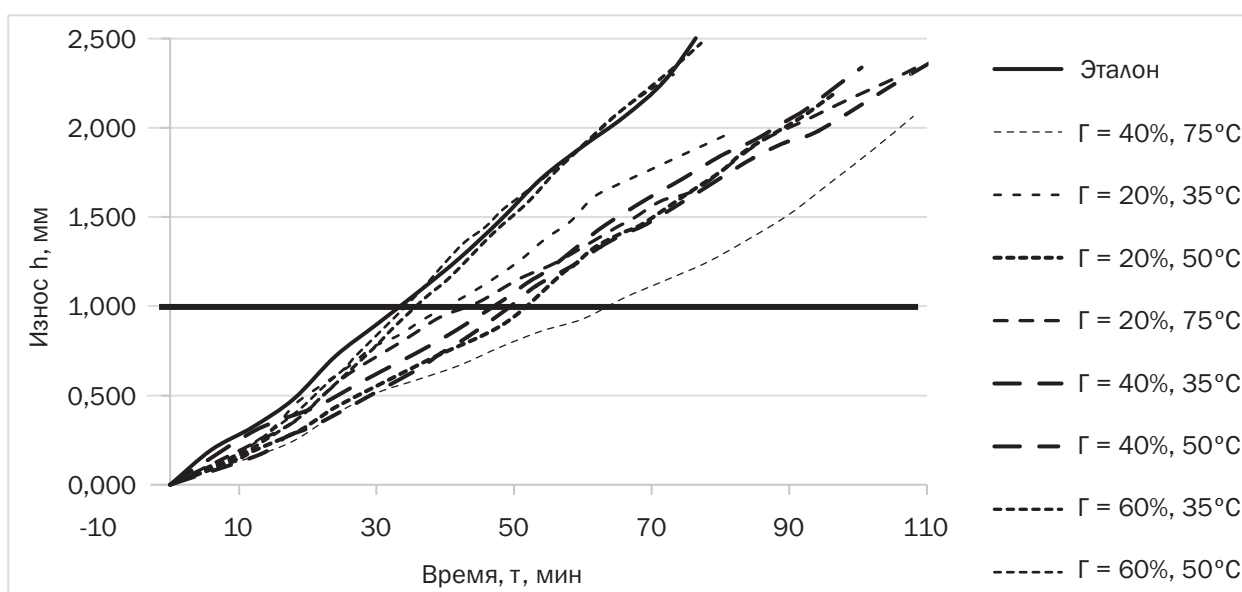
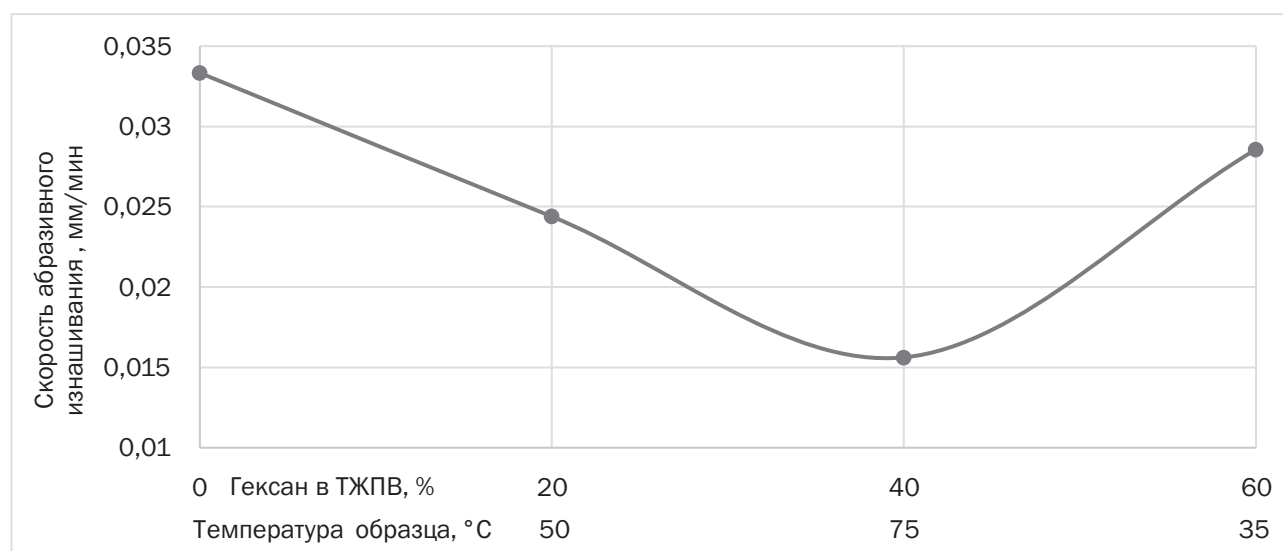


Рис. 2. Зависимость абразивного изнашивания от условий и режимов технологического процесса маслonaполнения  
 Fig. 2. Abrasive wear vs conditions and modes of the technological process of oil filling

Зависимость скорости абразивного изнашивания до 1 мм от температуры полиамидного образца и содержания гексана в технологической жидкости с пониженной вязкостью  
Dependence of abrasive wear rate up to 1 mm on polyamide sample temperature and hexane content in the process fluid with reduced viscosity

№ опыта	Условие – содержание гексана в ТЖПВ, %	Режим – температура полиамидного образца при наполнении, °С	Время износа – до 1 мм, мин	Скорости абразивного изнашивания – до 1 мм, $u_{11}$ , мм/мин
1	20	35	39,9	0,0251
2	20	50	52,0	0,0192
3	20	75	43,0	0,0233
4	40	35	47,0	0,0213
5	40	50	50,2	0,0199
6	40	75	63,0	0,0159
7	60	35	35,5	0,0282
8	60	50	34,0	0,0294



**Рис. 3.** Скорость абразивного изнашивания по ГОСТ 11012–2017 от содержания гексана в масляном наполнителе  
**Fig. 3.** Abrasive wear rate according to GOST 11012–2017 vs oil filler hexane content

при температуре маслonaполнения 75 °С и содержания гексана в технологической жидкости 40%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве наглядной демонстрации результата достигнутой цели настоящего исследования построен трехмерный график (рис. 4) зависимости скорости абразивного изнашивания от температуры полиамидной детали и содержания гексана в технологической жидкости пониженной вязкости при маслonaполнении полиамидных образцов.

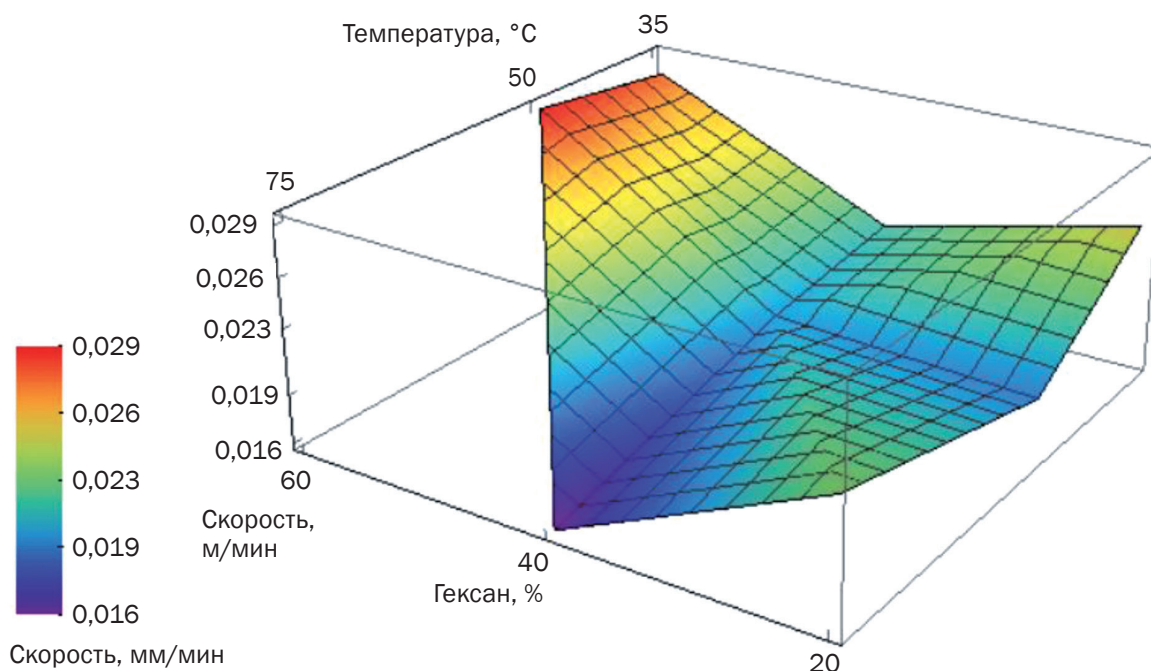
По результатам проведенной работы были выполнены следующие действия:

– установлен метод определения скорости абразивного изнашивания, который описан в ГОСТ 11012–2017;

– изготовлены образцы и выбран абразивный материал для осуществления их изнашивания;

– проведено экспериментальное определение скорости абразивного изнашивания полиамидных образцов.

Проведенная работа в настоящем исследовании подтверждает зависимость скорости абразивного изнашивания от содержания гексана в наполнителе и температуры полиамидного изделия.



**Рис. 4.** Зависимость абразивного изнашивания полиамидной детали от условий и режимов технологического процесса маслonaполнения полиамидных изделий при испытании по ГОСТ 11012-2017

**Fig. 4.** Polyamide part abrasive wear vs conditions and modes of the technological process of oil filling of polyamide products during testing according to GOST 11012-2017

Ранее предложенный способ повышения износостойкости полиамидных деталей и проведенные испытания на полиамидных образцах, описанные в данной работе, по-

зволяют разработать новый технологический процесс маслonaполнения полиамидных деталей, который повысит долговечность работы полиамидных деталей на 54,5%.

#### Список источников

1. Ефимов В.П. Новые грузовые тележки для железных дорог России и стран СНГ // Тяжелое машиностроение. 2008. № 9. С. 34–38. EDN: JUCQFR.
2. Богданов А. Пластики на рельсах // Пластикс. Индустрия переработки пластмасс. 2013. № 8. С. 16–22.
3. Скачков А.Н., Юхневский А.А., Мешков В.В., Горлов И.В., Горлов А.И. Триботехнические испытания нового материала для вкладыша скользуна пассажирского вагона // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2015. № 3. С. 69–71. EDN: UCCVUJ.
4. Курзина А.М., Колмаков А.Г., Филиппов В.Н. Демпфирующие композиты из материалов с различающимися упруго-гистерезисными свойствами для сэндвич-амортизаторов железнодорожного транспорта // Материаловедение. 2020. № 1. С. 25–32. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2020-0-1-25-32>. EDN: AKEKTS.
5. Braileanu P.I., Calin A., Dobrescu T.G., Pascu N.-E. Comparative examination of friction between additive manufactured plastics and steel surface // Materiale Plastice. 2023. Vol. 60. Iss. 3. P. 48–57. <https://doi.org/10.37358/MP.23.3.5675>. EDN: QDJGFC.
6. Меликсетян Н.Г., Карапетян А.Н., Оганесян К.В., Сароян В.В. Применение полимерных композитов с заданными свойствами в узлах трения машин // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. 2018. № 1. С. 37–48. EDN: XYTGFN.
7. Бычковский В.С. Технологический процесс исследования маслonaполнения деталей из полиамидных материалов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 472–481. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-472-481>. EDN: XAWJfs.
8. Osvaldová L.M., Fatriasari W. Testing of plastics // Testing of Materials for Fire Protection Needs. The Society of Fire Protection Engineers Series. Cham: Springer, 2023. P. 167–186. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39711-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39711-0_8).
9. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Tykhyi A., Kuzyk A., Dvornyk A., et al. Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylone and polyamide reinforced with arimide-T and fullerene // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 3. Iss. 12. P. 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719>. EDN: ZRBLMC.
10. Kast O., Schaible T., Bonten C. Interdependence of hygroscopic polymer characteristics and drying kinetics during desiccant drying and microwave supported drying // International Polymer Processing. 2020. Vol. 35. Iss. 4. P. 376–384. <https://doi.org/10.3139/217.3960>. EDN: UWITIS.

11. Лившиц А.В. Управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 120–126. EDN: UKQTVX.
12. Фарзалиев Э.Ф., Филиппенко Н.Г., Бычковский В.С., Чумбадзе Т.Т., Грамаков Д.С. Алгоритм системы автоматизированных научных исследований процесса сушки многокомпонентных полимеров // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 4. С. 17–22. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-4-17-22>. EDN: НХJHSM.
13. Бычковский В.С. Условия и режимы обработки технологического процесса маслonaполнения полимерных деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 11. С. 39–48. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-39-48>. EDN: WTNSEJ.
14. Brožek M. Selected plastics wear resistance to bonded abrasive particles compared to some ferrous materials // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2015. Vol. 63. Iss. 2. P. 387–393. <https://doi.org/10.11118/actaun201563020387>.
15. Kim Dae-ji, Kang Hoon, Song Chang-Heon, Oh Joo-Young, Cho Jung-Woo, Rostami J. Design of pin-on-disk type abrasion testing machine for durability assessment of rock cutting tools // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2021. Vol. 22. Iss. 7. P. 1249–1270. <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00534-w>. EDN: IFTGGM.
16. Zuo Jianyong, Wang Xueping, Zhou Sufen, Yang Fan. Simulation and experimental study on abrasive wear of brake discs // Tribology Transactions. 2022. Vol. 65. Iss. 4. P. 610–620. <https://doi.org/10.1080/10402004.2022.2063214>. EDN: AFDTUO.
17. Kujawa M., Ptak A. The experimental comparison of abrasion resistance of extruded and 3D printed plastics // Materials. 2025. Vol. 18. Iss. 7. P. 1592–1601. <https://doi.org/10.3390/ma18071592>.
18. Гыпка А., Ярема І., Невко І., Лешчук R., Кобельник V., Буховцев V., et al. Research on thermoplastics under impact-abrasive wear // Problems of Tribology. 2025. Vol. 30. Iss. 1/115. P. 74–84. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-115-1-74-84>. EDN: EAKVDW.
19. Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Баканин Д.В., Фарзалиев Э.Ф. Автоматизированный способ контроля наполнения маслом полимерных и композиционных материалов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 4. С. 9–16. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-4-9-16>. EDN: NTDJOF.
20. Колесников В.И., Мясникова Н.А., Мясников Ф.В., Мантуров Д.С., Новиков Е.С., Данильченко С.А. [и др.]. Трибологические и физико-механические свойства маслonaполненных композитов на основе фенолона // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 5. С. 462–470. EDN: FRPKDH.

### References

1. Efimov V.P. New freight car trucks for railways of Russia and the CIS countries. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*. 2008;9:34-38. (In Russ.). EDN: JUCQFR.
2. Bogdanov A. Plastics on the rails. *Russian and Global Plastics Industry*. 2013;8:16-22. (In Russ.).
3. Skachkov A.N., Yukhnevskiy A.A., Meshkov V.V., Gorlov I.V., Gorlov A.I. Tribotechnical tests of new material for axle brass side bearing for a passenger coach. *Transport of the Russian Federation*. 2015;3:69-71. (In Russ.). EDN: UCCVUJ.
4. Kurzina E.G., Kolmakov A.G., Filippov V.N., Semak A.V., Kurzina A.M. Damping composites made from materials with different elastic-hysteresis properties intended for sandwich shock absorbers of railway vehicles. *Materialovedenie*. 2020;1:25-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2020-0-1-25-32>. EDN: AKEKTS.
5. Braileanu P.I., Calin A., Dobrescu T.G., Pascu N.-E. Comparative examination of friction between additive manufactured plastics and steel surface. *Materiale Plastice*. 2023;60(3):48-57. <https://doi.org/10.37358/MP.23.3.5675>. EDN: QDJGFC.
6. Meliksetyan N.G., Karapetyan A.N., Hovhannisyan K.V., Saroyan W.V. Application of polymer composites with preset properties in the friction units of machines. *Proceedings of National Polytechnic University Armenia. Mechanics, Machine Science, Machine*. 2018;1:37-48. (In Russ.). EDN: XYTGFN.
7. Bychkovskiy V.S. Technological study of oil-filled polyamide parts. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):472-481. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-472-481>. EDN: XAWJFS.
8. Osvaldová L.M., Fatriasari W. Testing of plastics. In: *Testing of Materials for Fire Protection Needs. The Society of Fire Protection Engineers Series*. Cham: Springer; 2023, p. 167-186. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39711-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39711-0_8).
9. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Tykhyi A., Kuzyk A., Dvornyk A., et al. Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylene and polyamide reinforced with arimide-T and fullerene. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024;3(12):6-18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719>. EDN: ZRBLMC.
10. Kast O., Schaible T., Bonten C. Interdependence of hygroscopic polymer characteristics and drying kinetics during desiccant drying and microwave supported drying. *International Polymer Processing*. 2020;35(4):376-384. <https://doi.org/10.3139/217.3960>. EDN: UWITIS.
11. Livshits A.V. Management of technological processes of high-frequency electrothermie of polymers. *Engineering and Automation Problems*. 2015;3:120-126. (In Russ.). EDN: UKQTVX.

12. Farzaliev E.F., Filippenko N.G., Bychkovskiy V.S., Chumbadze T.T., Gramakov D.S. Algorithm of the automated scientific research system for studying the drying process of multicomponent polymers. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-industrial Complex*. 2021;68(4):17-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-4-17-22>. EDN: HXJHSM.
13. Bychkovskiy V.S. Conditions and operating modes of the procedure specification of polymer parts oil-filling process. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2023;11:39-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-39-48>. EDN: WTNSEJ.
14. Brožek M. Selected plastics wear resistance to bonded abrasive particles compared to some ferrous materials. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015;63(2):387-393. <https://doi.org/10.11118/actaun201563020387>.
15. Kim Dae-ji, Kang Hoon, Song Chang-Heon, Oh Joo-Young, Cho Jung-Woo, Rostami J. Design of pin-on-disk type abrasion testing machine for durability assessment of rock cutting tools. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2021;22(7):1249-1270. <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00534-w>. EDN: IFTGGM.
16. Zuo Jianyong, Wang Xueping, Zhou Sufen, Yang Fan. Simulation and experimental study on abrasive wear of brake discs. *Tribology Transactions*. 2022;65(4):610-620. <https://doi.org/10.1080/10402004.2022.2063214>. EDN: AFDTUO.
17. Kujawa M., Ptak A. The experimental comparison of abrasion resistance of extruded and 3D printed plastics. *Materials*. 2025;18(7):1592-1601. <https://doi.org/10.3390/ma18071592>.
18. Gypka A., Yarema I., Hevko I., Leshchuk R., Kobelnyk V., Buhovets V., et al. Research on thermoplastics under impact-abrasive wear. *Problems of Tribology*. 2025;30(1/115):74-84. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-115-1-74-84>. EDN: EAKVDW.
19. Bychkovskiy V.S., Filippenko N.G., Livshits A.V., Bakanin D.V., Farzaliev E.F. Automated method for controlling oil filling of polymer and composite materials. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-industrial Complex*. 2021;68(4):9-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-4-9-16>. EDN: NTDJOF.
20. Kolesnikov V.I., Myasnikova N.A., Myasnikov P.V., Manturov D.S., Novikov E.S., Danilchenko S.A., et al. Tribological and physicomechanical properties of oil-filled, phenilon-based composites. *Journal of Friction and Wear*. 2018;39(5):365-370. (In Russ.). EDN: FRPKDH.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Бычковский Владимир Сергеевич,**

кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
инженер-конструктор  
подразделения «Сектор корпусных изделий»,  
АО «ЭЛКУС»,  
196128, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 10, Россия  
✉ bikovskii\_vs@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

**Vladimir S. Bychkovskiy,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Lecturer of the Department of Automation  
of Production Processes,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia  
Design Engineer  
of the Case Products Sector division,  
ELKUS JSC,  
10, Blagodatnaya St., St. Petersburg 196128, Russia  
✉ bikovskii\_vs@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

**Филиппенко Николай Григорьевич,**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия  
ifpi@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>

**Nikolay G. Filippenko,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Automation  
of Production Processes,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia  
ifpi@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>

**Лившиц Александр Валерьевич,**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия  
livnet@list.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0653-8472>

**Alexander V. Livshits,**

Dr. Sci. (Eng), Professor,  
Professor of the Department of Automation  
of Production Processes,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia  
livnet@list.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0653-8472>

**Чумбадзе Тамара Темуриевна**,  
аспирант,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия  
ifpi@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1160-5756>

**Tamara T. Chumbadze**,  
Postgraduate Student,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia  
ifpi@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1160-5756>

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 23.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 30.11.2025 г.; принята к публикации 12.12.2025 г.

#### **Authors' contribution**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Information about the article**

The article was submitted 23.08.2025; approved after reviewing 30.11.2025; accepted for publication 12.12.2025.