

in natural form. An approach to obtaining differential equations of tuber motion is shown. A method for solving a differential equation is described. By calculations, it was found that stable rolling of tubers along the ends of the discs upward is possible from an initial angle of  $\varphi_0 = 60 \dots 65^\circ$ , and the separation of tubers occurs at an angle of  $149^\circ$ . The axial distance between the shafts of the pile cleaner should be chosen from just the right conditions, so the discs partially fit into the space between the discs of the neighboring shaft ( $a_{w1} < 0.5(d_1 + d_2)$ ,  $a_{w2} < 0.5(d_2 + d_3)$ ).

**Key words:** thrashed heap, impurities, waste cleaner, drive, disc shaft, rotation, dynamic equations, rolling friction.

**For citation:** Ivanov A. G., Kostin A. V., Arslanov F. R., Lomaev A. A., Vorontsov K. L. Dynamics of tuber movement along the working organs of the disc waste cleaner. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 1 (81): 155-162. (In Russ.). [https://doi.org/10.48012/1817-5457\\_2025\\_1\\_155-162](https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_1_155-162).

#### Authors:

**A. G. Ivanov** , Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7111-7642>;

**A. V. Kostin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-0589-3448>;

**F. R. Arslanov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

**A. A. Lomaev**, Postgraduate student;

**A. A. Kudryavtsev**, Postgraduate student

Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

ivalgen@inbox.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 01.07.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 03.03.2025.

The article was submitted 01.07.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 03.03.2025.

Научная статья

УДК 620.178

DOI 10.48012/1817-5457\_2025\_1\_162-167

## ЭФФЕКТ БЕЗЫЗНОСНОСТИ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ

Ипатов Алексей Геннадьевич<sup>1</sup> , Харанжевский Евгений Викторович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

<sup>2</sup>УдГУ, Ижевск, Россия

<sup>1</sup>ipatow.al@yandex.ru

**Аннотация.** Работа посвящена анализу эффекта безызносности в условиях пластической деформации контактирующих поверхностей, подверженных поверхностному легированию металлическим висмутом. Легирование поверхности стали висмутом реализовано с применением инновационной технологии короткоимпульсного лазерного переплава поверхностного слоя. Трибологические исследования выполнены в сопряжении с алюминиевым сплавом АЖ-1. Анализ трибологических показателей осуществлен при различных кинематических и динамических нагрузках, в режиме граничного трения с использованием современного лабораторного и исследовательского оборудования. В условиях граничной смазки легированная висмутом стальная поверхность в паре с анализируемым сплавом АЖ-1 характеризуется стабильно низкой величиной коэффициента трения. Во всем диапазоне кинематических и динамических нагрузок коэффициент трения варьирует в диапазоне от 0,04 до 0,08. В условиях высоких знакопеременных нагрузок у алюминиевого сплава наблюдается высокая усталостная прочность, что предупреждает поверхность от преждевременного разрушения. Трибологические и оптические исследования выявили, что контактирующие поверхности обладают эффективной прирабатываемостью без следов механического и молекулярного взаимодействия. Отсутствие механического и молекулярного изнашивания в зоне контакта определяет эффект безызносности, что подтверждается анализом износов контактирующих тел – на всем протяжении износных испытаний наблюдается нулевой износ. При этом температурный фон

в зоне контакта не превышает 55 °С. Пониженная температура в зоне контакта характеризует низкую работу трения и отсутствие разрушения поверхностей. Оптический анализ и 3D-профилометрия поверхностей трения выявили, что приработка поверхностей происходит не за счет износа микрогеометрии поверхностей, а пластической деформацией и выгодного перераспределения объема материала по сечению поверхности в направлении основного движения. Процесс пластической деформации поглощает основную энергию от трения и тем самым снижает температурный фон трения контактирующих тел. Данное явление открывает новую страницу в понимании эффекта безызносности, а результаты исследований имеют высокий научный и практический потенциал.

**Ключевые слова:** легирование висмутом, безызносность, короткоимпульсная лазерная обработка, трение, алюминиевый сплав.

**Для цитирования:** Ипатов А. Г., Харанжевский Е. В. Эффект безызносности в трибосопряжениях, легированных висмутом // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 1. (81). С. 162-167. [https://doi.org/10.48012/1817-5457\\_2025\\_1\\_162-167](https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_1_162-167).

**Актуальность.** Современная теория трения предполагает наличие двух факторов, определяющих интенсивность изнашивания контактирующих тел, – природа механического и молекулярно-адгезионного изнашивания [1, 3, 5]. В 60-х годах XX века учеными-трибологами была открыта теория безызносности, которая предполагает отсутствие изнашивания контактирующих поверхностей независимо от механической и молекулярной природы контакта. Математическая модель безызносного трения впервые была предложена Томлинсоном в 1929 г. [11]. Математическая модель предполагает наличие абсорбционных процессов между компонентами контактирующих тел. Последующие исследования в области безызносности были выполнены Д. Н. Гаркуновым и направлены на практическую реализацию эффекта безызносности в закрытых системах с формированием на трущихся поверхностях сервовитных пленок. Особенностью сервовитной пленки является процесс самоорганизации и перераспределения абсорбирующихся частиц между контактирующими поверхностями от энергии трения [2]. Однако следует отметить, что существование сервовитной пленки возможно лишь в условиях отсутствия окисления. В открытых трибосистемах формирование сервовитной пленки невозможно по причине окисления абсорбирующихся элементов. Поэтому вопросы по исследованию эффекта безызносности остаются актуальными.

Коллективом авторов ранее были выполнены исследования по микролегированию стальной поверхности металлическим висмутом [2, 9]. Трибологические исследования выявили низкую интенсивность изнашивания легированных висмутом стальных поверхностей в сопряжении с бронзами и антифрикционными чугунами. Низкая интенсивность изнашивания была сопряжена со значительным снижением механического и молекулярного взаимодействия трущихся поверхностей [8, 9]. Одна-

ко исследования не дали возможности описать механизм и природу безызносности.

Поэтому в данной работе основной **целью исследований** является обоснование механизма безызносности легированных висмутом стальных поверхностей в условиях интенсивного динамического и кинематического нагружения.

**Материал и методика исследований.** Технология микролегирования стальной поверхности подробно описана в работах [8, 9] и определяет использование короткоимпульсного лазерного излучения в качестве источника тепловой энергии. Высокие скорости нагрева и охлаждения создают условия для синтеза метастабильных структур, обладающих высокой когезионной и адгезионной прочностью и твердостью [8]. В качестве присадочного материала использовали мелкодисперсную порошковую композицию мелкодисперсной порошковой смеси, состоящей из оксида висмута ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) и оксида марганца ( $\text{MnO}_2$ ).

Трибологические исследования выполнили по схеме «палец-диск» в соответствии с ГОСТ 30480-97 [4, 8]. Использование диска большого диаметра обеспечило различные кинематические условия испытаний в зависимости от диаметра дорожки трения. Для анализа безызносности трибологические исследования провели в контакте с алюминиевым сплавом АЖ-1. Выбор данного сплава обоснован высокой твердостью, термостойкостью и способностью сопротивляться адгезии (табл. 1) [7, 10]. Три дорожки на поверхности диска использовались для испытания при трех различных скоростях трения: 3, 6 и 9 м/с. В ходе испытаний анализировали коэффициент трения в зависимости от нормальной нагрузки и скорости трения, момент задира поверхностей.

Для ускорения процессов изнашивания и достижения необходимых температурных условий эффекта безызносности трибологические исследования выполнили в граничных условиях [2].

Таблица 1 – Состав материала контртела

| Сплав                  | Стандарт     | Содержание компонентов, %           |
|------------------------|--------------|-------------------------------------|
| Алюминиевый сплав АЖ-1 | ГОСТ 4784-97 | Si – 0,5 %, Fe – 1,0 %, Al – основа |

Состояние поверхности в зоне контакта после трибологических исследований оценили методом профилометрии с помощью 3D-оптического профилометра Wyko NT 1100 (Veeco). Оптический анализ поверхности на предмет выявления адгезионного и механического изнашивания выполнили с использованием оптического инвертированного микроскопа Olympus GX53F.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Основной характеристикой работоспособности трибосопряжения является коэффициент трения. Интенсивность его изменения в диапазоне кинематических и динамических нагрузок отражает эффективность приработки и скорость изнашивания контактирующих тел. На рисунке 1 представлена интенсивность изменения коэффициента трения от скорости трения и усилия нормального нагружения на исследуемое трибосопряжение.

Динамика изменения коэффициента трения выявила эффективный процесс приработки поверхностей в трибосопряжении. Наибольшая интенсивная приработка наблюдается в условиях высоких скоростей трения и повышенной динамики нагружения. При этом коэффициент трения колеблется в небольшом диапазоне, от 0,038 до 0,08 и не имеет скачкообразного повышения, что указывает на процессы самоорганизации поверхностей трения за счет формирования устойчивых трубокструктур между трущимися поверхностями.

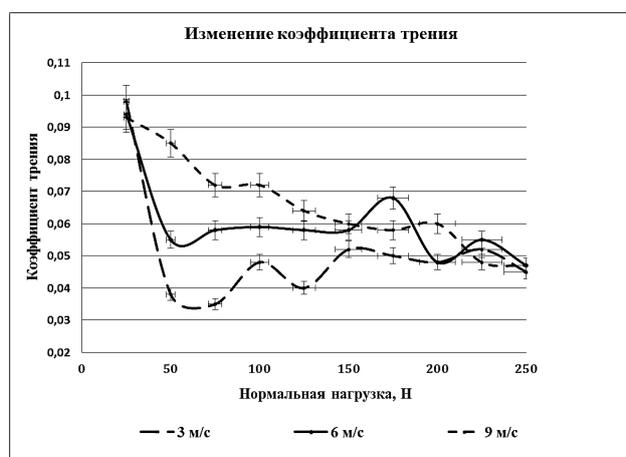


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения в трибосопряжении «легированная висмутом стальная поверхность – алюминиевый сплав АЖ-1» от скорости трения и нормальной силы

Важно отметить, что температура в зоне контакта не превышает 55 °С даже при высокой скорости скольжения 9 м/с и при динамическом нагружении в 250Н в отсутствие подачи смазки.

Высокая степень прирабатываемости и пониженный температурный фон испытаний указывают на снижение или полное подавление механического и адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей. При этом следует отметить, что трущиеся поверхности стабилизируют и снижают коэффициент трения при повышенных динамических и кинематических режимах трения, что дополнительно указывает на отсутствие природы механически-молекулярного изнашивания.

Дополнительные исследования по оценке износа алюминиевого контртела подтвердили наши доводы. Результаты измерения потери массы алюминиевого образца АЖ-1 в процессе испытаний приведены в таблицу 2.

Величина износа контртела на всем диапазоне кинематических и динамических нагрузок не превышает значения ошибки измерения. Наибольшая величина износа наблюдается лишь в первоначальный период испытаний, где происходят процессы нормальной приработки поверхностей трения, а после приработки износ практически для всех режимов испытаний сводится к нулю.

Таблица 2 – Величина износа контртела от скорости трения и нормальной нагрузки в трибосопряжении

| Сплав                  | Нормальная нагрузка, Н | Скорость трения, м/с |      |      |
|------------------------|------------------------|----------------------|------|------|
|                        |                        | 3                    | 6    | 9    |
| Алюминиевый сплав АЖ-1 | 25                     | 0,1                  | 0,1  | 0,01 |
|                        | 50                     | 0,02                 | 0,02 | 0,02 |
|                        | 75                     | 0                    | 0    | 0,02 |
|                        | 100                    | 0,09                 | 0,01 | 0,03 |
|                        | 125                    | 0                    | 0,03 | 0    |
|                        | 150                    | 0,15                 | 0    | 0,06 |
|                        | 175                    | 0                    | 0,1  | 0,08 |
|                        | 200                    | 0,02                 | 0,02 | 0    |
|                        | 225                    | 0                    | 0    | 0,02 |
| 250                    | 0,02                   | 0                    | 0,04 |      |

Для оценки состояния поверхности контактов выполнили оптический анализ поверхностей трения после испытаний, который обнаружил формирование площадки контакта (рис. 2).

На исследуемых поверхностях отсутствуют следы механического изнашивания (механическое изнашивание проявляется в виде

тонких и глубоких бороздок в направлении трения), а также адгезионного изнашивания (проявляется в виде налипших частиц контртела). В условиях отсутствия изнашивания приработанные поверхности могут быть сформированы за счет пластической деформации и вытеснением материала из зоны контакта под действием высоких контактных нагрузок.

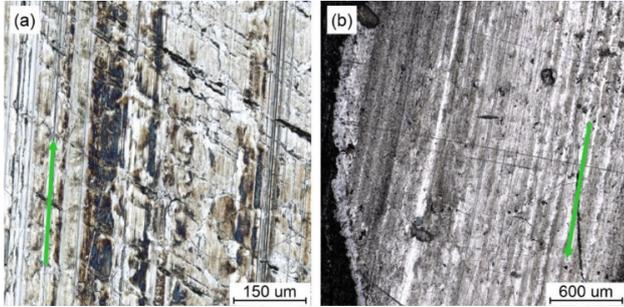


Рисунок 2 – Оптические изображения поверхностей трения: а – поверхность диска, легированного висмутом, в контакте с алюминиевым штифтом; б – контактное пятно алюминиевого контртела

На рисунке 3б представлены механизмы формирования площадки контакта за счет пластической деформации или износа. При анализе 3D-профилограмм было выявлено волнообразное течение объема материала в зоне контакта алюминиевого контртела АЖ-1 со стальной легированной поверхностью. Пластическая деформация зоны контакта алюминиевого сплава проявляется в направлении взаимного движения контактирующих поверхностей в виде наплыва на первоначально обработанную поверхность (рис. 3а).

Пластическая деформация происходит под действием высоких нормальных нагрузок и не сопряжена с износом, что дополнительно подтверждает отсутствие механического и адгезионного изнашивания поверхностей. Выделяемая от трения энергия идет не на разрушение поверхности контактирующих тел, а на пластическую деформацию и тем самым самоорганизацию процессов трения с формированием низкого коэффициента трения. Самоорганизация процесса трения с выделением минимальной энергии является основным показателем эффекта безыносности в трибологии.

Формирование эффекта безыносности является общим для всего трибосопряжения. 3D-профилометрия поверхности трения легированной висмутом стальной поверхности также характеризуется перераспределением объема материала по сечению поверхности в направлении основного движения.

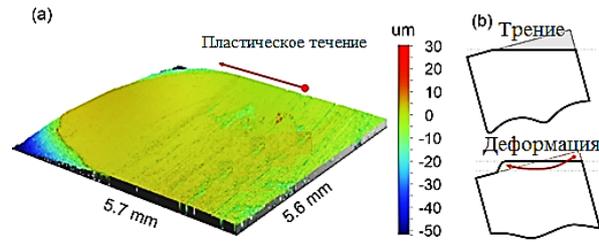


Рисунок 3 – 3D-оптическая профилометрия алюминиевого штифта после испытаний (а) и два различных механизма формирования области контакта: повреждение от износа и безыносное пластическое течение (б)

При этом компоненты алюминиевого контртела на стальной легированной висмутом поверхности не обнаружены, что исключает процессы абсорбции и взаимной диффузии контактирующих тел.

**Выводы.** Представленные результаты исследований трибосопряжения «легированная висмутом стальная поверхность – алюминиевый сплав АЖ-1» позволили обосновать механизм безыносности в условиях высоких кинематических и динамических нагрузок. Природа безыносности определяется подавлением механического и молекулярного взаимодействия трущихся поверхностей за счет легирования висмутом и последующей механической обработки в виде алмазного выглаживания. Отсутствие механического и адгезионного изнашивания в зоне трения формирует нулевой износ контактирующих поверхностей на всем диапазоне кинематических и динамических нагрузок. Выделяемая энергия при трении направлена на пластическую деформацию тонких поверхностных слоев контактирующих тел, что определяет самоорганизацию структуры за счет перераспределения материала в зависимости от создаваемой нормальной нагрузки на трибосопряжение. Исследуемое явление открывает новые возможности в обеспечении безыносности подшипниковых сопряжений за счет подавления молекулярной и механической составляющих трения контактирующих тел.

**Сведения о финансировании.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-20012.

#### Список источников

1. Горячева И. Г., Добычин М. Н. Итоги развития молекулярно-механической теории трения // Трение и износ. 2008. Т. 29, № 4. С. 327-337.

2. Ипатов А. Г., Харанжевский Е. В., Макаров А. В. Эффект безызносности в керамических покрытиях // Трибология – машиностроению: Труды XV Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 12–13 ноября 2024 г. Москва: Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, 2024. С. 85-87. EDN TEOGGO.

3. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. Москва: Машиностроение, 1984. 264 с.

4. Эффект безызносности при поверхностном легировании стали висмутом / А. В. Макаров, Е. В. Харанжевский, А. Г. Ипатов [и др.] // Трение и износ. 2024. Т. 45, № 6. С. 558-568. DOI 10.32864/0202-4977-2024-45-6-558-568. EDN DKCILG.

5. Ahmatov A. S. Molecular physics of boundary friction, Publ. Israel Program for Scientific Translations, University of California, 1966, 480 p.

6. Barlemont S., Colas G., Lenain A., Cornuault P.-H. Effect of the counter material on the tribological behavior of Cu45Zr46Al7Nb2 bulk metallic glass. *Wear*. 2023; 522: 204712. DOI:10.1016/j.wear.2023.204712.

7. Hutchings I., Shipway P. *Tribology*. 2 ed. Butterworth-Heinemann, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00005-2>.

8. Kharanzhevskiy E. V., Ipatov A. G., Makarov A. V. [et al.]. Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials. *Wear*. 2021; 477: 203835. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203835>.

9. Kharanzhevskiy E. V., Ipatov A. G., Makarov A. V., Gil'mutdinov F. Z. Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication. *Sci. Rep.* 2023; 13: 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>.

10. Pratt G. C. *Materials for Plain Bearings*. International Metallurgical Reviews. 1973; 18: 62–88. <https://doi.org/10.1179/imt1973.18.2.62>.

11. Tomlinson G. A. *A Molecular Theory of Friction*. *Phil. Mag.* 1929; 7 (7): 905-939.

## References

1. Goryacheva I. G., Doby'chin M. N. Itogi razvitiya molekulyarno-mexanicheskoy teorii treniya // *Trenie i iznos*. 2008. Т. 29, № 4. С. 327-337.

2. Ipatov A. G., Xaranzhevskij E. V., Makarov A. V. E'ffekt bezy'znosnosti v keramicheskix pokry'tiyax // *Tribologiya – mashinostroeniye: Trudy XV Mezhdunar. nauch.-texn. konf., Moskva, 12–13 noyabrya 2024 g. Moskva: Institut mashinovedeniya im. A. A. Blagonravova RAN, 2024. S. 85-87. EDN TEOGGO*.

3. Pol'cer G., Majssner F. *Osnovy` treniya i iznashivaniya*. Moskva: Mashinostroenie, 1984. 264 s.

4. E'ffekt bezy'znosnosti pri poverxnostnom legirovani stali vismutom / A. V. Makarov, E. V. Xaranzhevskij, A. G. Ipatov [i dr.] // *Trenie i iznos*. 2024. Т. 45, № 6. С. 558-568. DOI 10.32864/0202-4977-2024-45-6-558-568. EDN DKCILG.

5. Ahmatov A. S. *Molecular physics of boundary friction*, Publ. Israel Program for Scientific Translations, University of California, 1966, 480 p.

6. Barlemont S., Colas G., Lenain A., Cornuault P.-H. Effect of the counter material on the tribological behavior of Cu45Zr46Al7Nb2 bulk metallic glass. *Wear*. 2023; 522: 204712. DOI:10.1016/j.wear.2023.204712.

7. Hutchings I., Shipway P. *Tribology*. 2 ed. Butterworth-Heinemann, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00005-2>.

8. Kharanzhevskiy E. V., Ipatov A. G., Makarov A. V. [et al.]. Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials. *Wear*. 2021; 477: 203835. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203835>,

9. Kharanzhevskiy E. V., Ipatov A. G., Makarov A. V., Gil'mutdinov F. Z. Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication. *Sci. Rep.* 2023; 13: 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>.

10. Pratt G. C. *Materials for Plain Bearings*. International Metallurgical Reviews. 1973; 18: 62–88. <https://doi.org/10.1179/imt1973.18.2.62>.

11. Tomlinson G. A. *A Molecular Theory of Friction*. *Phil. Mag.* 1929; 7 (7): 905-939.

## Сведения об авторах:

**А. Г. Ипатов**<sup>1</sup>✉, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>;

**Е. В. Харанжевский**<sup>2</sup>, доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-1525-2169>

<sup>1</sup>Удмуртский ГАУ, ул. Студенческая, 9, Ижевск, Россия, 426069

<sup>2</sup>УдГУ, ул. Университетская, 1, корп. 1, Ижевск, Россия, 426034

<sup>1</sup>ipatow.al@yandex.ru

Original article

## THE WEAR-FREE EFFECT IN TRIBOCONNECTIONS DOPED WITH BISMUTH

**Alexey G. Ipatov<sup>1</sup>**, **Evgeny V. Kharanzhevsky<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia<sup>2</sup>Udmurt State University, Izhevsk, Russia<sup>1</sup>ipatow.al@yandex.ru

**Abstract.** *The paper is devoted to the analysis of the wear-free effect under conditions of plastic deformation of contacting surfaces subjected to surface alloying with metallic bismuth. Alloying of the steel surface with bismuth is implemented using an innovative technology of short-pulse laser remelting of the surface layer. Tribological studies were performed in the conjunction with aluminum alloy AZh-1. The analysis of tribological indicators was performed under various kinematic and dynamic loads, in the boundary friction mode using modern laboratory and research equipment. Under boundary lubrication conditions, the bismuth-alloyed steel surface paired with the analyzed alloy AZh-1 is characterized by a consistently low value of the friction coefficient. Over the entire range of kinematic and dynamic loads, the friction coefficient varies in the range from 0.04 to 0.08. Under conditions of high alternating loads, the aluminum alloy has high fatigue strength, which prevents the surface from premature failure. Tribological and optical studies have revealed that the contacting surfaces have effective running-in, without traces of mechanical and molecular interaction. The absence of mechanical and molecular wear in the contact zone determines the wear-free effect, which is confirmed by the analysis of the wear of the contacting bodies - zero wear is observed throughout the wear tests. At the same time, the temperature background in the contact zone does not exceed 55°C. The reduced temperature in the contact zone characterizes low friction work and the absence of surface destruction. Optical analysis and 3D profilometry of friction surfaces have revealed that the running-in of surfaces occurs not due to wear of the microgeometry of the surfaces, but plastic deformation and favorable redistribution of the material volume over the surface section in the direction of the main movement. The process of plastic deformation absorbs the main energy from friction and thereby reduces the temperature background of friction of the contacting bodies. This phenomenon opens a new page in understanding the wear-free effect, and the research results have high scientific and practical potential.*

**Key words:** *bismuth doping, wearlessness, short-pulse laser processing, friction, aluminum alloy.*

**For citation:** *Ipatov A. G., Kharanzhevsky E. V. The wear-free effect in triboconnections doped with bismuth. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2025; 1 (81): 162-167. (In Russ.). [https://doi.org/10.48012/1817-5457\\_2025\\_1\\_162-167](https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_1_162-167).*

### Authors:

**A. G. Ipatov<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
<https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>;

**E. V. Kharanzhevsky<sup>2</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
<https://orcid.org/0000-0002-1525-2169>

<sup>1</sup>Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

<sup>2</sup>Udmurt State University, 1 Universitetskaya St., build. 1, Izhevsk, Russia, 426034

<sup>1</sup>ipatow.al@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 26.08.2024; одобрена после рецензирования 20.02.2025;  
принята к публикации 03.03.2025.

The article was submitted 26.08.2024; approved after reviewing 20.02.2025; accepted for publication 03.03.2025.