

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №6 (168). С.3-10.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №6 (168). P.3-10.

Научная статья  
УДК [621.7 +621.9]/539.6  
doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-10

## Научные основы создания наукоёмких триботехнологий

Анатолий Григорьевич Суслов<sup>1</sup>, д.т.н.  
Александр Олегович Горленко<sup>2</sup>, д.т.н.  
Михаил Геннадьевич Шалыгин<sup>3</sup>, д.т.н.  
Алмосшо Набот Шохиён<sup>4</sup>, д.т.н.

<sup>1, 2, 3</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия;

<sup>4</sup> Институт технологий и инновационного менеджмента в городе Куляб, Таджикистан

<sup>1</sup> naukatm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

<sup>2</sup> bugi12@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0807-9537>

<sup>3</sup> migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

<sup>4</sup> shoev\_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Изложено понятие наукоёмких триботехнологий и приведены конкретные примеры их создания. Изложены технологии окончательной обработки поверхностей трения, работающих при небольших нагрузках, которые замещают процесс приработки этих поверхностей трения, а, следовательно, повышают долговечность их работы. В качестве примеров приведены технологические методы плосковершинного хонингования гильз цилиндров и плосковершинного чистового полирования опорных шеек валов подшипников скольжения. Для повышения долговечности роликов роликоподшипников разработана технология их окончательного полирования бесконечными лентами. Ширина их и усилие натяжения позволяют обеспечить бочкообразность таких роликов, которая гарантирует равномерное распределение давления по всей длине ролика. Это предотвращает возможность их разрушения по краям при их цилиндрической форме. Для ремонта в пути рабочих поверхностей железнодорожных рельсов разработан технологический процесс, обеспечивающий сохранение поперечного профиля рельса, сформировавшегося в процессе приработки на различных участках: прямолинейных и криволинейных. Данный триботехнологический процесс позволяет значительно повысить производительность ремонта полотна железной дороги и срока их службы. Криволинейные поверхности трения в процессе эксплуатации в результате различных скоростей и давлений на различных участках в процессе приработки имеют различные величины износа, т.е. изменяется их оптимальный поперечный профиль. Это непосредственно относится к железнодорожным колесам. Поэтому для повышения долговечности поверхности качения железнодорожных колес разработана триботехнология электромеханической импульсной обработки, обеспечивающей равномерный износ по всему профилю за счет закономерного изменения в степени упрочнения поверхностного слоя профиля колеса.

**Ключевые слова:** триботехнология, хонингование, приработка, поверхность катания

**Для цитирования:** Суслов А.Г., Горленко А.О., Шалыгин М.Г., Шохиён А.Н. Научные основы создания наукоёмких триботехнологий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 3–10. doi:10.30987/2223-4608-2025-6-3-10

## Science behind of high-tech tribotechnologies development

Anatoly G. Suslov<sup>1</sup>, D. Eng.  
Alexander O. Gorlenko<sup>2</sup>, D. Eng.  
Mikhail G. Shalygin<sup>3</sup>, D. Eng.  
A.N. Shohiyon<sup>4</sup>, D. Eng.

<sup>1,2,3</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia;

<sup>4</sup> Institute of Technology and Innovation Management in Kulyab, Republic of Tajikistan

<sup>1</sup> naukاتم@yandex.ru

<sup>2</sup> bugi12@bk.ru

<sup>3</sup> migshalygin@yandex.ru

<sup>4</sup> shoev\_a@mail.ru

**Abstract.** High-tech tribotechnologies concept is outlined. Specific examples of the creation of various tribotechnologies are given. The technologies of final treatment of friction surfaces operating under low loads are described. They replace the process of running-in of these friction surfaces, and, consequently, increase the durability of their operation. Technological methods of cylinder liners plateau honing and flat-topped final polishing of bearing journals of sliding bearing shafts are given as an illustration. To increase the durability of bearing rollers, the tech has been developed for their final polishing with closed loop belts. Their width and tension force make it possible to ensure the barrel shape of such rollers, which guarantees an even distribution of pressure along the entire length of the roller. This prevents the possibility of their destruction at the edges unlike in cylindrical shapes. For voyage repair of railway tracks working surfaces a flow process has been developed that ensures the preservation of the rail transverse profile formed during the running-in process in various sections: rectilinear and curved. This tribotechnological process makes it possible to increase the productivity of railway track repairs and their service life greatly. Curved friction surfaces during operation, resulted from different speeds and pressures at different sites when running-in, have different rate of wear, i.e. their optimal crossing profile changes. The above is also true of railroad wheels. Therefore, to increase the durability of the rolling surface of railway wheels, tribotechnology of electromechanical pulse processing has been developed, which ensures uniform wear throughout the profile due to a regular change in the degree of hardening of the wheel profile surface layer.

**Keywords:** tribotechnology, honing operation, running-in, rolling surface

**For citation:** Suslov A.G., Gorlenko A.O., Shalygin M.G., Shohiyon A.N. Science behind of high-tech tribotechnologies development / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-3-10

Под наукоёмкими технологиями в машиностроении понимаются технологии, базирующиеся на современных достижениях науки и техники [1]. Под наукоёмкими триботехнологиями понимаются технологии, базирующиеся на современных достижениях в трибологической науке. В соответствии с трибологической наукой и практикой кривая износа поверхностей трения имеет следующий характер (рис. 1, кривая 1) [2].

Кривая износа 1 (см. рис. 1), имеет три участка: участок приработки I; участок нормального изнашивания II; участок катастрофического износа III. Как правило, наибольший износ поверхности трения имеют на участке приработки I. На этом участке исходное технологическое качество поверхностного слоя переходит в качество приработанной поверхности (равновесное состояние поверхностного слоя). В соответствии с молекулярно-

механической теорией изнашивания интенсивность износа рассчитывается по формуле для периода нормального изнашивания (рис.1, линия 2) [3]:

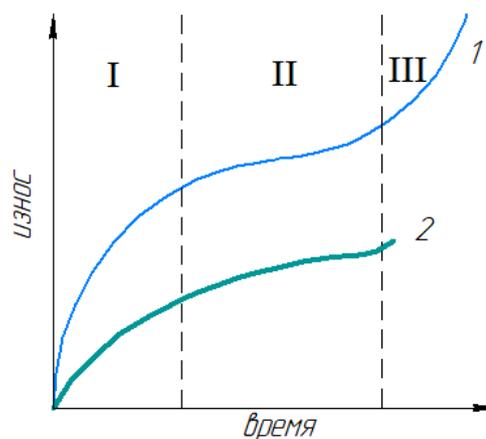


Рис. 1. Кривая износа

Fig. 1. Wear curve

Кривая износа  $I$  (см. рис. 1), имеет три участка: участок приработки I; участок нормального изнашивания II; участок катастрофического износа III. Как правило, наибольший износ поверхности трения имеют на участке приработки I. На этом участке исходное технологическое качество поверхностного слоя

переходит в качество приработанной поверхности (равновесное состояние поверхностного слоя). В соответствии с молекулярно-механической теорией изнашивания интенсивность износа рассчитывается по формуле для периода нормального изнашивания (рис.1, линия 2) [3]:

$$I_h = \frac{1,2\pi}{n \cdot \lambda \cdot tm^{3/2} \cdot H_{\mu 0}^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1 - \mu^2)^2 (2 \cdot Ra \cdot Wz \cdot H_{\max})^{1/3}}{Sm \cdot E}}, \quad (1)$$

$$\lambda = \left( \frac{\sigma_b - \sigma_o}{\sigma_a} \right)^{t_y}, \quad (2)$$

где  $n$  – число циклов до разрушения материала при резании;  $tm$  – относительная длина опорной линии профиля шероховатости на уровне средней линии;  $H_{\mu 0}$  – микротвердость поверхностного слоя;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля;  $Wz$  – средняя высота волн;  $H_{\max}$  – максимальная величина макроотклонений;  $S_m$  – средний шаг неровностей профиля;  $E$  – приведенный модуль упругости;  $\sigma_a$  – действующее значение амплитудного напряжения в поверхностном слое. Данные параметры – это параметры качества равновесного состояния поверхностного слоя при установившемся нормальном изнашивании.

Таким образом, если в технологическом процессе обработки поверхности трения предусмотреть последнюю финишную операцию, обеспечивающую параметры качества поверхностного слоя, соответствующие установившемуся изнашиванию, то процесс приработки будет переведен в технологию

(см. рис. 1, линия 2). Этот процесс будет называться триботехнологией. Это значительно повысит долговечность поверхностей трения.

Рассмотрим конкретные примеры создания наукоемких триботехнологий. При трении цилиндрических поверхностей – наружных или внутренних, при небольших нагрузках процесс приработки происходит за счет износа вершин микронеровностей пока не сформируется фактическая площадь контакта  $A_{\phi}$ , выдерживающая приложенную нагрузку:

$$A_{\phi} = \frac{\Pi}{C \sqrt{\sigma^2 + \alpha \tau^2}},$$

где  $\Pi$  – нагрузка;  $C$  – коэффициент стеснения;  $\sigma$  – нормальное напряжение;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $\tau$  – касательные напряжения.

Профилограмма такой поверхности трения после приработки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Профилограмма профиля шероховатости после приработки поверхности трения

Fig. 2. Profilogram of the roughness profile after running-in of the friction surface

Такой профиль может быть получен с использованием триботехнологии. В данном случае – плосковершинным хонингованием

внутренних поверхностей трения или плосковершинным полированием наружных поверхностей трения (рис. 3).



Рис. 3. Профилограмма профиля шероховатости поверхности трения, полученная плосковершинным полированием

Fig. 3. Profilogram of the roughness profile of the friction surface obtained by flat-top polishing

При больших нагрузках на поверхности трения значительное влияние на износ оказывают макроотклонения контактирующих деталей.

Следующим примером создания триботехнологии является окончательная обработка цилиндрических роликов роликоподшипников. В соответствии с теорией контактного взаимодействия жесткого штампа с упругим пространством давление вдоль оси ролика распределяется в соответствии с рис. 4, т.е. со значительным его критическим увеличением по краям ролика [4]. Это приводит к существенному износу на краях ролика, а в некоторых случаях к их разрушению.

Был разработан наукоемкий триботехнологический метод чистовой обработки роликов – чистовое шлифование бесконечными упругими лентами определенной ширины и с усилием натяжения.

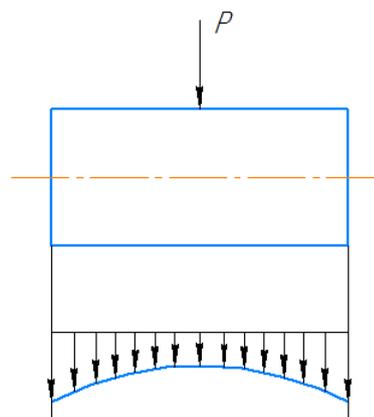


Рис. 4. Распределение давления вдоль оси ролика при цилиндрической его форме

Fig. 4. Pressure distribution along the axis of the roller with its cylindrical shape

Процесс формирования бочкообразной формы ролика бесконечными лентами приведен на рис. 5.

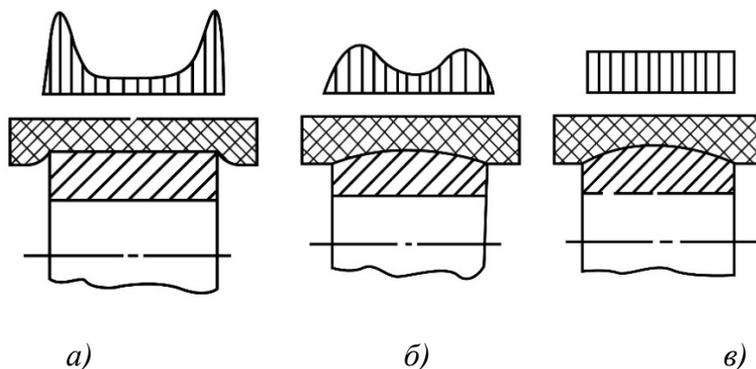


Рис. 5. Процесс формирования бочкообразной формы ролика бесконечными лентами:

*a* – в начале обработки; *б* – после образования закруглений; *в* – после образования оптимальной бочкообразной формы

Fig. 5. The process of forming a barrel-shaped roller with closed loop belts:

*a* – at the beginning of processing; *b* – after the formation of curves; *c* – after the formation of the optimal barrel shape

Данный процесс позволяет сформировать бочкообразную форму ролика, обеспечивающую равномерное распределение давления

по его длине (рис. 6), а, следовательно, повысить их долговечность.

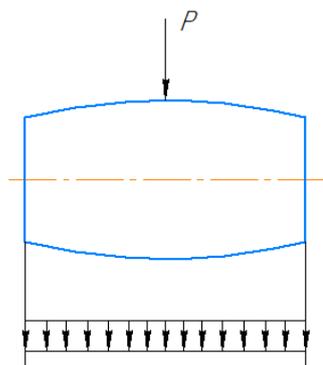


Рис. 6. Распределение давления вдоль оси ролика бочкообразной формы, полученной шлифованием бесконечной лентой

Fig. 6. Pressure distribution along the axis of a barrel-shaped roller obtained by polishing with closed loop belts

Следующим примером создания наукоемкой триботехнологии является ремонт рабочей поверхности катания рельса железных дорог в пути. Особенно это актуально для высокоскоростных железных дорог. В процессе приработки, в зависимости от расположения рельсов на прямолинейном или криволинейном участках, в результате перераспределения давления происходит неравномерный износ его поперечного профиля. На криволинейных участках износ увеличивается к боковым сторонам рельса. При ремонте шлифованием рабочих поверхностей рельсов его поперечный профиль возвращается к исходному на прямолинейных (рис. 7, кривая 2) и криволинейных участках (рис. 7, кривая 3) на всем пути. По существующей технологии ремонта полотна

высокоскоростных железных дорог рельсошлифовальными комплексами поперечный профиль рельсов на всем протяжении его пути (криволинейных и прямолинейных участков) возвращается к исходному его профилю (рис. 7, кривая 4). Это приводит к необходимости снятия большого припуска  $z_1$ . Снятие такого припуска осуществляется за несколько (2 – 3) рабочих ходов при скорости движения рельсошлифовального комплекса 8...10 км/ч.

Для устранения этих недостатков был создан наукоемкий триботехнологический процесс ремонта рабочих поверхностей катания рельсов железнодорожных путей. Этот процесс включает в себя: операцию встречное иглофрезерование для снятия поверхностного дефектного слоя с микротрещинами, операцию шлифования осциллирующими брусками или чашечными шлифовальными кругами для снятия поперечной волнистости и операцию лепесткового шлифования для обеспечения оптимальной шероховатости рабочей поверхности рельса. Все эти операции объединены в одном рельсообрабатывающем комплексе.

При этом технологическом процессе сохраняется сформировавшийся поперечный профиль рельса в процессе приработки (рис. 7, кривая 5). Данный триботехнологический процесс ремонта рабочей поверхности катания рельсов железных дорог в пути позволяет уменьшить снимаемый припуск, а, следовательно, значительно увеличить производительность ремонта и долговечность рельсов за счет возможности неоднократного их ремонта.

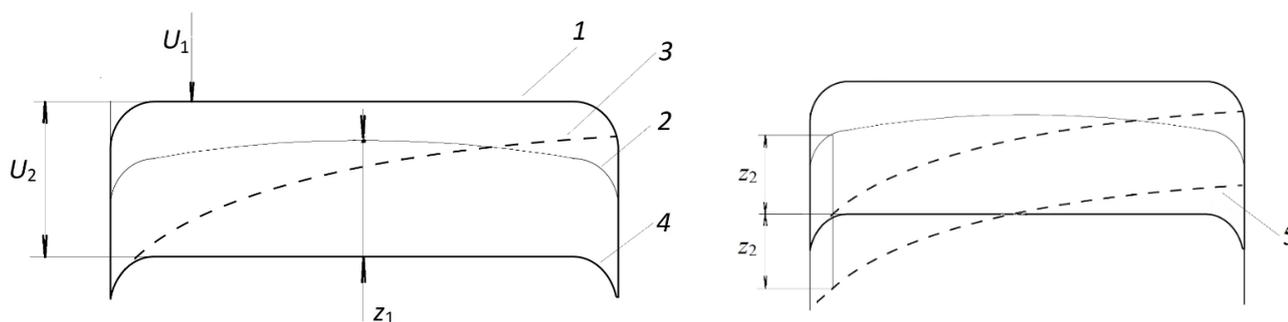


Рис. 7. Поперечные профили рабочей поверхности рельсов железных дорог:

1 – при изготовлении; 2 – износе на прямолинейном участке; 3 – износе на криволинейном участке; 4 – ремонте по существующей технологии; 5 – ремонте с использованием рельсообрабатывающего комплекса для реализации триботехнологического процесса

Fig. 7. Transverse profiles of rails working surfaces:

1 – during manufacture; 2 – wear on a straight section; 3 – wear on a curved section; 4 – repair using existing technology; 5 – repair using a railworking complex to implement a tribotechnological process

В качестве следующего примера рассмотрим создание наукоемкой триботехнологии обработки поверхности катания железнодорожных колес [5]. Технологическое обеспечение износостойкости криволинейных поверхностей трения, к которым относится профиль поверхности катания железнодорожных колес, возможно за счет обеспечения закономерно изменяющегося качества поверхностного слоя вдоль образующей поверхности трения, в частности закономерно изменяющейся микротвердости.

Широкими возможностями в этом отношении обладает импульсная электромеханическая обработка (ИЭМО). Закономерное изменение силы тока при электромеханическом упрочнении по импульсной схеме, теоретически рассчитанное и технологически обеспечиваемое на специальной установке, позволяет избежать отслаивания упрочненного слоя при эксплуатации, добиться минимального и равномерного износа вдоль образующих криволинейных поверхностей трения с сохранением их первоначальной геометрической формы.

В частности, повышение долговечности поверхности катания железнодорожных колес возможно за счет обеспечения определенного закона изменения износостойкости отдельных их участков. Для железнодорожных колес долговечность часто определяется стабильностью изнашивания профиля колеса вдоль образующей поверхности трения.

Неравномерность распределения рабочих давлений и скоростей на поверхности трения приводит к неравномерному износу. Для достижения равномерного и минимального износа необходимо технологически обеспечить закономерно изменяющееся качество поверхностного слоя поперечного профиля, при котором скорость изнашивания вдоль профиля будет постоянной.

Управлять качеством поверхностного слоя возможно при автоматизации электромеханической обработки как наиболее дешевым и перспективным методом упрочнения.

Для решения поставленной задачи был реализован следующий алгоритм исследований:

- а) рассчитана математическая модель профиля железнодорожного колеса;
- б) установлен закон изменения качества поверхности качения и гребня железнодорожного колеса, обеспечивающий равномерную скорость изнашивания различных участков

профиля в соответствии с математической моделью профиля железнодорожного колеса;

в) так как закон (б) справедлив для постоянно трущихся поверхностей, была принята зависимость контактирования участков профиля колеса во времени;

г) рассчитан коэффициент упрочнения в соответствии с алгоритмом (в), и в целях избежания резких перепадов применена сплайн-интерполяция;

д) рассчитана требуемая поверхностная микротвердость профиля колеса;

е) получена зависимость плотности тока при ЭМО для технологии изготовления и ремонта железнодорожных колес. Соответствующие расчетные графики приведены на рис. 8.

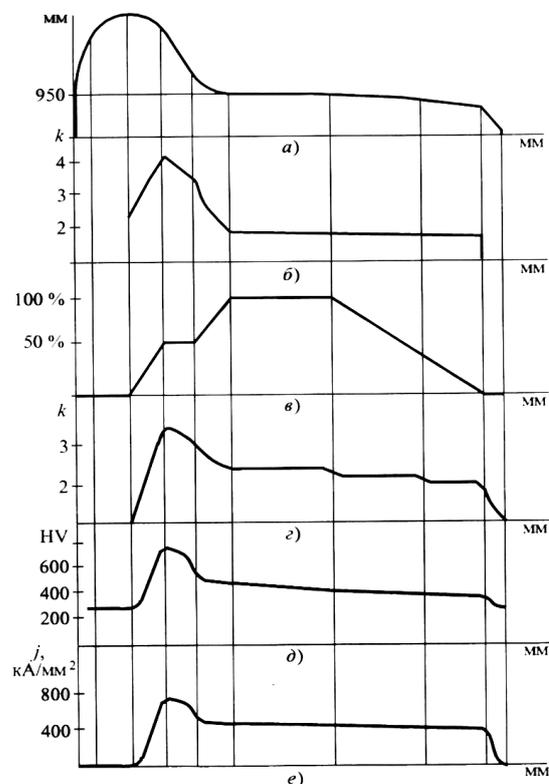


Рис. 8. Расчетные графики:

а – профиль железнодорожного колеса; б – расчетный коэффициент упрочнения ( $HV_{исх} = 260$ ); в – контактирование профиля во времени; г – сплайн-интерполяция  $k$  с учетом контактирования во времени; д – микротвердость ж/д колеса по профилю; е – зависимость плотности тока при ЭМО вдоль профиля ж/д колеса

Fig. 8. Calculation graphs:

а – the profile of the railroad wheel; б – the calculated hardening coefficient ( $HV_{prim} = 260$ ); в – the profile contacting over time; г – the spline interpolation of  $k$  taking into account the contacting over time; д – the microhardness of the railway wheel along the profile; е – the dependence of the current density at EMO along the profile of the railroad wheel

Для технологического обеспечения требуемого качества поверхностного слоя на промышленных предприятиях целесообразно использовать одну из разработанных в Брянской научной технологической школе автоматизированных установок для электромеханической обработки (рис. 9).

Установка с управляемым источником питания на переменном токе промышленной частоты предназначена для реализации процесса ЭМО рабочих поверхностей деталей машин с целью обеспечения и повышения их эксплуатационных показателей.

Применение переменного тока промышленной частоты по импульсной схеме на данной установке (от управляемого источника питания) обеспечивает большую глубину упрочнения (до 2 мм), высокую микротвердость упрочненного слоя (до 1000 HV), шероховатость поверхности (без отделочной обработки) в пределах  $Ra = 0,8 \dots 3,2$  мкм.



Рис. 9. Схема обработки железнодорожных колес

Fig. 9. The scheme of railroad wheel processing

Отделочная обработка производится, когда не требуется большая глубина упрочнения (до 0,3 мм), а необходимо значительное уменьшение значений параметров исходной шероховатости (для  $Ra$  в 4 – 10 раз).

Применение переменного тока по импульсной схеме обеспечивает плавный переход твердости от поверхности к сердцевине, большую глубину упрочнения и высокую микротвердость упрочненного слоя.

Применяется технологическая оснастка,

состоящая из двухроликовой головки, закрепляемой в резцедержателе, и средств коммутации, что позволяет использовать технологию ЭМО мобильно в совокупности с любым токарным станком.

Таким образом, достигается равномерный и минимальный износ профиля железнодорожного колеса за счет электромеханического упрочнения с изменяющейся силой тока в процессе обработки, от которой в свою очередь зависит степень и глубина упрочнения. Это позволяет дольше сохранять профиль колеса в процессе эксплуатации, что ведет к увеличению срока службы в 1,3 – 1,5 раза.

### Заключение

Научные исследования, практика и статистика 1960 – 2000 гг. показали, что надежность изделий машиностроения на 70 % определяется износом поверхностей трения [6]. Это говорит о необходимости повышения износостойкости поверхностей трения. В статье на конкретных примерах показано, что такую проблему частично можно решать технологически, создавая и развивая предложенное направление наукоемких триботехнологий. Авторы предлагают аспирантам и молодым кандидатам наук, технологам и трибологам подключиться к развитию и реализации на практике данного научного направления.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Наукоемкие** технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
2. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1966. 480 с.
3. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
4. **Штайрман И.Я.** Контактная задача теории упругости. М: Гостехиздат, 1949. 272с.
5. **Фундаментальные** основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.

6. **Проников А.С.** Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 590 с.

**REFERENCES**

1. Science-intensive technologies in mechanical engineering / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezylazny et al.; edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2012. 528 p.

2. Kragelsky I.V. Friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 480 p.

3. Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 2000. 320 p.

4. Shtaerman I.Ya. Contact problem of the theory of elasticity. Moscow: Gostekhizdat, 1949. 272p.

5. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products / ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovative engineering, 2022. 552 p.

6. Pronikov A.S. Reliability of machines. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 590 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 12.05.2025.

The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 26.10.2024; asseped for publication 12.05.2025.

