

УДК 620.17.05; 620.178.16

Установка для изучения механизмов поверхностного разрушения материалов, сочетающая ударное нагружение, трение качения и скольжения

В.Г. Буров¹, С.В. Станкевич¹, И.А. Батаев¹, М.Л. Хейфец², К.И. Эмурлаев¹,
Е.А. Дробяз¹, Д.И. Котов^{1,3}, А.А. Батаев¹

¹Новосибирский государственный технический университет,
просп. Карла Маркса, 20, г. Новосибирск 630073, Россия

²Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

³Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО
РАН (КТФ ИГиЛ СО РАН),
ул. Терешковой, 29, г. Новосибирск 630090, Россия

Поступила в редакцию 15.08.2025.

Разработана установка, реализующая одновременно три вида механического воздействия на металлические образцы: косой удар, трение качения, трение скольжения. Основным узлом установки является установленный на валу барабан с расположенными в его гнездах инденторами — стальными роликами диаметром 32 мм и массой 0,2 кг. Барабан приводится в движение сервоприводом, позволяющим плавно регулировать угловую скорость вращения в диапазоне от 0 до 1500 мин⁻¹. Инденторы изготовлены из закалённой и низкоотпущенной шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ (64 HRC). В процессе испытаний ролики, свободно расположенные в гнездах барабана, имеют возможность вращаться относительно своих осей и катиться по поверхностям образцов. Под действием центробежной силы, возникающей при вращении барабана, ролики вступают в контакт с исследуемыми образцами и изнашивают их. За один оборот барабана каждый из образцов ударам роликами подвергается дважды. Удары осуществляются одновременно, что позволяет уменьшить вибрации в элементах установки. С использованием разработанной установки проведены триботехнические испытания стали Гадфильда в аустенитном состоянии, стали 95Х6М3Ф3СТ закалённой и отпущенной при 545 °С, а также легированного бором и хромом сплава, сформированного методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки. Наиболее высоким уровнем износостойкости обладают образцы из стали 95Х6М3Ф3СТ. Выявлены специфические особенности механизмов разрушения поверхностных слоёв металлических сплавов.

Ключевые слова: изнашивание при ударе, триботехнические испытания, сталь Гадфильда, поверхностный слой, механизм разрушения.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-333-341

Адрес для переписки:

М.Л. Хейфец
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: mlk-z@mail.ru

Для цитирования:

В.Г. Буров, С.В. Станкевич, И.А. Батаев, М.Л. Хейфец,
К.И. Эмурлаев, Е.А. Дробяз, Д.И. Котов, А.А. Батаев.
Установка для изучения механизмов поверхностного разрушения
материалов, сочетающая ударное нагружение, трение качения и
скольжения.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 4. — С. 333–341.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-333-341

Address for correspondence:

M.L. Kheifetz
Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya st., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: mlk-z@mail.ru

For citation:

V.G. Burov, S.V. Stankevich, I.A. Bataev, M.L. Kheifetz,
K.I. Emurlaev, E.A. Drobyaz, D.I. Kotov, and A.A. Bataev.
[A Device for Studying the Mechanisms of Surface Fracture of
Materials That Combines Impact Loading, Rolling and Sliding
Friction].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 4, pp. 333–341 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-333-341

A Device for Studying the Mechanisms of Surface Fracture of Materials That Combines Impact Loading, Rolling and Sliding Friction

V.G. Burov¹, S.V. Stankevich¹, I.A. Bataev¹, M.L. Kheifetz², K.I. Emurlaev¹, E.A. Drobyaz¹, D.I. Kotov^{1,3}, and A.A. Bataev¹

¹*Novosibirsk State Technical University,
K. Marx ave., 20, Novosibirsk 630073, Russia*

²*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya st., 16, Minsk 220072, Belarus*

³*Design and technology branch of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the
Russian Academy of Sciences, Tereshkovoi st., 29, Novosibirsk 630090, Russia*

Received 15.08.2025.

Abstract

A novel friction tester has been developed that simultaneously implements three types of mechanical effects on metal samples: oblique impact, rolling friction, and sliding friction. The main unit of the installation is a driver mounted on a shaft with indenters located in its sockets — steel rollers with a diameter of 32 mm and a weight of 0.2 kg. The mechanism is actuated by a servo drive, which allows smooth adjustment of the angular rotation speed in the range from 0 to 1500 min⁻¹. The indenters are made of quenched and low-tempered ball bearing steel. During the testing process, the rollers, freely located in the driver sockets, have the ability to rotate relative to their axes and roll along the surfaces of the samples. Under the action of the centrifugal force generated by the rotation of the driver, the rollers come into contact with the studied samples and wear them out. During one revolution of the driver, each of the samples is subjected to roller impacts twice. The impacts are carried out simultaneously, which reduces vibrations of the parts of the device. Tribological tests of Hadfield steel in the austenitic state, 95Cr6Mo3V3SiTi steel quenched and tempered at 545 °C, as well as boron- and chromium-alloyed alloy formed by the method of non-vacuum electron beam cladding were carried out using the developed device. The samples made of 95Cr6Mo3V3SiTi steel possessed the highest level of wear resistance. The features of the mechanisms of destruction of the surface layers of metal alloys are revealed.

Keywords: impact wear, tribological tests, Hadfield steel, surface layer, fracture mechanism

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-333-341

Адрес для переписки:

М.Л. Хейфец
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: mlk-z@mail.ru

Для цитирования:

В.Г. Буров, С.В. Станкевич, И.А. Батаев, М.Л. Хейфец,
К.И. Эмurlаев, Е.А. Дробяз, Д.И. Котов, А.А. Батаев.
Установка для изучения механизмов поверхностного разрушения
материалов, сочетающая ударное нагружение, трение качения и
скольжения.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 4. — С. 333–341.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-333-341

Address for correspondence:

M.L. Kheifetz
Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya st., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: mlk-z@mail.ru

For citation:

V.G. Burov, S.V. Stankevich, I.A. Bataev, M.L. Kheifetz,
K.I. Emurlaev, E.A. Drobyaz, D.I. Kotov, and A.A. Bataev.
[A Device for Studying the Mechanisms of Surface Fracture of
Materials That Combines Impact Loading, Rolling and Sliding
Friction].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 4, pp. 333–341 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-333-341

Список использованных источников

1. **Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю.** Изнашивание при ударе. — М.: Машиностроение. — 1982
2. **Крагельский И.В.** Трение и износ. — М.: Машиностроение. — 1968
3. **Yutchings Ian and Shipwai Philip.** Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials. — Butterworth-Heinemann. — 2017
4. **Straffellini G.** Friction and Wear: Methodologies for Design and Control. — Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. — 2015
5. **Bayer R.G.** Mechanical Wear Fundamentals and Testing, Revised and Expanded. — CRC Press. — 2004
6. **Филиппов М.А., Макаров А.В., Шешуков О.Ю.** Износ и выбор износостойких материалов. — Инфра-Инженерия. — 2025
7. **Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К.** Поверхностная прочность материалов при трении. — Киев: Техніка. — 1976
8. **Lim S.C. and Ashby M.F.** Overview no. 55. Wear-Mechanism Maps // *Acta Metallurgica*. — 1987 (35), 1—24. doi.org/10.1016/0001-6160(87).90209-4
9. **Костецкий Б.И., Мамин Г.Н.** О двойственной роли кислорода при трении качения // Доклады АН СССР. — 1965 (162), № 4, 803—805
10. **Bataev I.A., Lazurenko D.V., Bataev A.A., Burov V.G., Ivanov I.V., Emurlaev K.I., Smirnov A.I., Rosenthal M., Burghammer M., Ivanov D.A., Georgarakis K., Ruktuev A.A., Ogneva T.S., and Jorge A.M.J.** A Novel Operando Approach to Analyze the Structural Evolution of Metallic Materials During Friction with Application of Synchrotron Radiation // *Acta Materialia*. — 2020 (196), 355—369. doi.org/10.1016/j.actamat.2020.06.049
11. **Emurlaev K., Bataev I., Ivanov I., Lazurenko D., Burov V., Ruktuev A., Ivanov D., Rosenthal M., Burghammer M., Georgarakis K., and Jorge A.M.J.** Friction-Induced Phase Transformations and Evolution of Microstructure of Austenitic Stainless Steel Observed by Operando Synchrotron X-ray Diffraction // *Acta Materialia*. — 2022 (234), 118033. doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118033
12. **Костецкий Б.И.** Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. — 1985 (6), № 2, 201—212
13. **Yagi K., Kajita S., Izumi T., Koyamachi J., Tohyama M., Saito K., and Sugimura J.** Simultaneous Synchrotron X-ray Diffraction, Near-Infrared, and Visible in Situ Observation of Scuffing Process of Steel in Sliding Contact // *Tribology Letters*. — 2016 (61), 19. doi.org/10.1007/s11249-015-0636-9
14. **Izumi T., Yagi K., Koyamachi J., Saito K., Sanda S., Yamaguchi S., Ikehata H., Yogo Y., and Sugimura J.** Surface Deteriorations During Scuffing Process of Steel and Analysis of Their Contribution to Wear Using in Situ Synchrotron X-Ray Diffraction and Optical Observations // *Tribology Letters*. —

2018 (66), 120. doi.org/10.1007/s11249-018-1062-6

15. **Болдырев В.В.** О кинетических факторах, определяющих специфику механохимических процессов в неорганических системах // *Кинетика и катализ*. — 1972 (13), № 6, 1411—1421

References

1. **Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Albagachiev A.Yu.** Iznashivanie pri udare. — Moskva: Mashinostroenie. — 1982 (in Russian)
2. **Kragelsky I.V.** Trenie i iznos. — Moskva: Mashinostroenie. — 1968 (in Russian)
3. **Yutchings Ian and Shipwai Philip.** Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials. — Butterworth-Heinemann. — 2017
4. **Straffellini G.** Friction and Wear: Methodologies for Design and Control. — Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. — 2015
5. **Bayer R.G.** Mechanical Wear Fundamentals and Testing, Revised and Expanded. — CRC Press. — 2004
6. **Filippov M.A., Makarov A.V., Sheshukov O.Yu.** Iznos i vbor iznosostoykih materialov. — Infra-Inzheneriya. — 2025 (in Russian)
7. **Kostetsky B.I., Nosovsky I.G., Karaulov A.K.** Poverhnostnaya prochnost pri trenii. — Kiev: Tehnika. — 1976 (in Russian)
8. **Lim S.C. and Ashby M.F.** Overview no. 55. Wear-Mechanism Maps // *Acta Metallurgica*. — 1987 (35), 1—24. doi.org/10.1016/0001-6160(87).90209-4
9. **Kostetsky B.I., Mamin G.N.** O dvoystvennoy roli kisloroda pri trenii kacheniya // *Doklady AN SSSR*. — 1965 (162), № 4, 803—805 (in Russian)
10. **Bataev I.A., Lazurenko D.V., Bataev A.A., Burov V.G., Ivanov I.V., Emurlaev K.I., Smirnov A.I., Rosenthal M., Burghammer M., Ivanov D.A., Georgarakis K., Ruktuev A.A., Ogneva T.S., and Jorge A.M.J.** A Novel Operando Approach to Analyze the Structural Evolution of Metallic Materials During Friction with Application of Synchrotron Radiation // *Acta Materialia*. — 2020 (196), 355—369. doi.org/10.1016/j.actamat.2020.06.049
11. **Emurlaev K., Bataev I., Ivanov I., Lazurenko D., Burov V., Ruktuev A., Ivanov D., Rosenthal M., Burghammer M., Georgarakis K., and Jorge A.M.J.** Friction-Induced Phase Transformations and Evolution of Microstructure of Austenitic Stainless Steel Observed by Operando Synchrotron X-ray Diffraction // *Acta Materialia*. — 2022 (234), 118033. doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118033
12. **Kostetsky B.I.** Strukturno-energeticheskaya prispoblivayemost materialov pri trenii // *Trenie i iznos*. — 1985 (6), № 2, 201—212 (in Russian)
13. **Yagi K., Kajita S., Izumi T., Koyamachi J., Tohyama M., Saito K., and Sugimura J.** Simultaneous Synchrotron X-ray Diffraction, Near-Infrared, and Visible in Situ Observation of Scuffing Process of Steel in Sliding Contact // *Tribology Letters*. — 2016 (61), 19. doi.org/10.1007/s11249-015-0636-9

14. **Izumi T., Yagi K., Koyamachi J., Saito K., Sanda S., Yamaguchi S., Ikehata H., Yogo Y., and Sugimura J.** Surface Deteriorations During Scuffing Process of Steel and Analysis of Their Contribution to Wear Using in Situ Synchrotron X-Ray Diffraction and Optical Observations // Tribology Letters. — 2018 (**66**), 120. doi.org/10.1007/s11249-018-1062-6
15. **Boldyrev V.V.** O kineticheskikh faktorah, opredelyayushchih spetsifiku mehanohimicheskikh prozessov v neorganicheskikh sistemah // Kinetika i Kataliz. — 1972 (**13**), № 6, 1411—1421 (in Russian)

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11
Full text of articles can be purchased from the editorial office.
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11
E-mail: FWJ@tut.by