

УДК 620.178.16

Влияние окислительно-восстановительных реакций при лазерном легировании стали оксидом висмута на триботехнические характеристики в условиях граничного трения

А.С. Широбокова¹, Е.В. Харанжевский¹, А.Г. Ипатов², А.В. Макаров³

¹Удмуртский государственный университет,
ул. Университетская, 1, г. Ижевск 426034, Россия

²Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 9, г. Ижевск 426069, Россия

³Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН),
ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург 620108, Россия

Поступила в редакцию 02.07.2025.

В работе изучали триботехнические характеристики поверхности углеродистой стали, легированной оксидом висмута с добавлением окислителя или восстановителя, нитрата лития или высокодисперсного порошка графита соответственно. Трибологические испытания выполняли в сопряжении с алюминиевым сплавом АЖ1 в условиях граничной смазки.

Установлено, что углерод взаимодействует с оксидом висмута в процессе легирования при высокотемпературной лазерной обработке и приводит к появлению металлического висмута, что негативно влияет на работоспособность сопряжения при высокой контактной нагрузке. При этом, чем выше содержание углерода в составе порошковой смеси, тем большее количество восстановленного при лазерной обработке оксида висмута в поверхности стали, и тем ниже нагрузочная способность сопряжения при работе с постоянной скоростью 9,0 м/с. Напротив, распад нитрата лития с выделением кислорода при высокоинтенсивной лазерной обработке приводит к увеличению доли окисленного висмута в легированной поверхности. При добавлении окислителя триботехнические характеристики сопряжения при трении в условиях граничной смазки значительно улучшаются. Предложен возможный механизм возникновения сверхнизких коэффициента трения и износа при трении скольжения в условиях граничной смазки для пары трения легированная оксидом висмута сталь–алюминиевый сплав.

Ключевые слова: графит, нитрат лития, короткоимпульсная лазерная обработка, сверхнизкий коэффициент трения.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-391-399

Адрес для переписки:

А.Г. Ипатов
Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 9, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: Ipatow.al@yandex.ru

Для цитирования:

А.С. Широбокова, Е.В. Харанжевский, А.Г. Ипатов, А.В. Макаров.
Влияние окислительно-восстановительных реакций при лазерном легировании стали оксидом висмута на триботехнические характеристики в условиях граничного трения.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 4. — С. 391–399.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-391-399

Address for correspondence:

A.G. Ipatov
Udmurt State Agricultural University,
Studencheskaya St., 9, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: Ipatow.al@yandex.ru

For citation:

A.S. Shirobokova, E.V. Kharanzhevskiy, A.G. Ipatov, and A.V. Makarov.
[The Effect of Redox Reactions During Laser Alloying of Steel with Bismuth Oxide on Tribological Characteristics Under Boundary Friction Conditions].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 4, pp. 391–399 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-391-399

The Effect of Redox Reactions During Laser Alloying of Steel with Bismuth Oxide on Tribological Characteristics Under Boundary Friction Conditions

A.S. Shirobokova¹, E.V. Kharanzhevskiy¹, A.G. Ipatov², and A.V. Makarov³

¹*Udmurt State University,
Universitetskaya St., 1, Izhevsk 426034, Russia*

²*Udmurt State Agricultural University,
Studencheskaya St., 9, Izhevsk 426069, Russia*

³*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
St. S. Kovalevskaya, 18, Ekaterinburg 620108, Russia*

Received 02.07.2025.

Abstract

This work investigates the tribological characteristics of the surface of carbon steel alloyed with bismuth oxide with the addition of an oxidizer or a reducing agent, specifically lithium nitrate or highly dispersed graphite powder, respectively. Tribological tests were performed in contact with an aluminum alloy AZh1 under boundary lubrication conditions.

It was established that carbon interacts with bismuth oxide during the alloying process under high-temperature laser treatment, leading to the formation of metallic bismuth, which negatively affects the performance of the tribological pair under high contact load. Furthermore, a higher carbon content in the powder mixture results in a greater amount of reduced bismuth oxide in the steel surface and a lower load-carrying capacity of the pair at a constant speed of 9.0 m/s. Conversely, the decomposition of lithium nitrate with the release of oxygen during high-intensity laser processing leads to an increased proportion of oxidized bismuth in the alloyed surface. The addition of the oxidizer significantly improves the tribological characteristics of the pair under boundary lubrication friction conditions. A possible mechanism for the occurrence of ultra-low friction and wear coefficients during sliding friction under boundary lubrication for the “bismuth-oxide-alloyed steel vs. aluminum alloy” friction pair is proposed.

Keywords: graphite, lithium nitrate, short-pulse laser treatment, ultra-low friction coefficient.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-391-399

Адрес для переписки:

А.Г. Ипатов
Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 9, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: Ipatow.al@yandex.ru

Для цитирования:

А.С. Широбокова, Е.В. Харанжевский, А.Г. Ипатов, А.В. Макаров.
Влияние окислительно-восстановительных реакций при лазерном легировании стали оксидом висмута на триботехнические характеристики в условиях граничного трения.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 4. — С. 391–399.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-391-399

Address for correspondence:

A.G. Ipatov
Udmurt State Agricultural University,
Studencheskaya St., 9, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: Ipatow.al@yandex.ru

For citation:

A.S. Shirobokova, E.V. Kharanzhevskiy, A.G. Ipatov, and A.V. Makarov.
[The Effect of Redox Reactions During Laser Alloying of Steel with Bismuth Oxide on Tribological Characteristics Under Boundary Friction Conditions].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 4, pp. 391–399 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-391-399

Список использованных источников

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): учебник. 4-е изд. — М.: Из-во МСХА. — 2001
2. Ahmatov A.S. Molecular Physics of Boundary Friction. — Publ. Israel Program for Scientific Translations: University of California. — 1966
3. Kharanzhevskiy E.V. et al. Towards Eliminating Friction and Wear in Plain Bearings Operating without Lubrication // Scientific Reports. — 2023 (13), no. 1, 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>
4. Sun H., Gewen Y., Shanhong W., and Peiying S. Effect of Adding Soft Bi₂O₃ on Structural Modification and Tribological Regulation of Ni-5 wt% Al Composite Coating in Wide Temperatures Range // Surface and Coatings Technology. — 2021 (405), 126517. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126517>
5. Kato H. and Komai K. Tribofilm Formation and Mild Wear by Tribo-Sintering of Nanometer-Sized Oxide Particles on Rubbing Steel Surfaces // Wear. — 2007 (262), nos. 1–2, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.046>
6. Wang X., Feng X., Lu C., Yi G., Jia J., and Li H. Mechanical and Tribological Properties of Plasma Sprayed NiAl Composite Coatings with Addition of Nanostructured TiO₂/Bi₂O₃ // Surface and Coatings Technology. — 2018 (349), 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.055/>
7. Rodil S.E., Depablos-Rivera O., and Sánchez-López J.C. Tribological Response of δ-Bi₂O₃ Coatings Deposited by RF Magnetron Sputtering // Lubricants. — 2023 (11), no. 5, 207. <https://doi.org/10.3390/lubricants11050207>
8. Ипатов А.Г., Малинин А.В., Шмыков С.Н. Повышение эффективности турбокомпрессоров ДВС модификацией подшипниковых сопряжений // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2024, № 5, 8–12. DOI: 10.31044/1684-2561-2024-0-5-8-12
9. Ипатов А.Г., Шмыков С.Н. Синтез антифрикционных покрытий методом ФАБО // Технический сервис машин. — 2021, № 1(142), 140–147. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-1-140-147
10. Макаров А.В., Харанжевский Е.В., Ипатов А.Г., Сирош В.А., Соболева Н.Н., Волкова Е.Г. Эффект безызносности при поверхностном легировании стали висмутом // Трение и износ. — 2024 (45), № 6, 558–568
11. Makarov A.V., Sirosh V.A., Soboleva N.N., Volkova E.G., Ipatov A.G., Gil'mutdinov F.Z., and Kharanzhevskiy E.V. Ultralow Wear in Boundary Lubrication: a Tribological Study of Bi-Alloyed Steel under High Normal Loads and Sliding Speeds // Friction. — 2025 (13), no. 7, 9441049. <https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441049>
12. Razak M., Liza S., and Fukuda K. Investigation of Surface Morphology, Wettability and Tribological Properties of Ni Composite Coating Added with Graphite // Surf. Topogr.: Metrol. Prop. — 2025, no. 13, 015016. DOI: 10.1088/2051-672X/adad8c
13. Guan L., Zhang Y., Cheng K., and Zhang R. Influence of Graphite on Tribological Properties of SiC/Cu/Gr Composites with SiO₂-Cu₂O Glass Boundary // Ceramics International. — 2024 (50), no. 9, 15481–15489. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.025>
14. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z., Soboleva N.N., and Krivilyov M.D. Tribological Performance of Boron-Based Superhard Coatings Sliding Against Different Materials // Wear. — 2021 (477), 203835. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203835/>
15. Volkov K.G., Ipatov A.G., Kharanzhevskii E.V., Shmykov S.N. Restoration and Hardening of the Working Chamfer of the Valve of an Internal Combustion Engine by Selective Laser Melting (SLM) // Steel in Translation. — 2023 (53), no. 3, 232–237. DOI: 10.3103/s0967091223030191
16. Юхин Ю.М., Михайлов Ю.И. Химия висмутовых соединений и материалов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — 2001
17. Ortiz-Quinonez J.L., Zumeta-Dubé I., Díaz D., Nava-Etzana N., Cruz-Zaragoza E., and Santiago-Jacinto P. Bismuth Oxide Nanoparticles Partially Substituted with EuIII, MnIV, and SiIV: Structural, Spectroscopic, and Optical Findings // Inorg Chem. — 2017, Mar 20; (56), no. 6, 3394–3403. doi: 10.1021/acs.inorgchem.6b02923. Epub. 2017 Mar 2. PMID: 28252972

References

1. Garkunov D.N. Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost'): Uchebnik. 4-e izd. — M.: Iz-vo MSHA. — 2001 (in Russian)
2. Ahmatov A.S. Molecular Physics of Boundary Friction. — Publ. Israel Program for Scientific Translations: University of California. — 1966
3. Kharanzhevskiy E.V. et al. Towards Eliminating Friction and Wear in Plain Bearings Operating without Lubrication // Scientific Reports. — 2023 (13), no. 1, 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>
4. Sun H., Gewen Y., Shanhong W., and Peiying S. Effect of Adding Soft Bi₂O₃ on Structural Modification and Tribological Regulation of Ni-5 wt% Al Composite Coating in Wide Temperatures Range // Surface and Coatings Technology. — 2021 (405), 126517. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126517>
5. Kato H. and Komai K. Tribofilm Formation and Mild Wear by Tribo-Sintering of Nanometer-Sized Oxide Particles on Rubbing Steel Surfaces // Wear. — 2007 (262), nos. 1–2, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.046>
6. Wang X., Feng X., Lu C., Yi G., Jia J., and Li H. Mechanical and Tribological Properties of Plasma Sprayed NiAl Composite Coatings with Addition of Nanostructured TiO₂/Bi₂O₃ // Surface and Coatings Technology. — 2018 (349), 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.055/>

7. **Rodil S.E., Depablos-Rivera O., and Sánchez-López J.C.** Tribological Response of δ -Bi₂O₃ Coatings Deposited by RF Magnetron Sputtering // *Lubricants*. — 2023 (11), no. 5, 207. <https://doi.org/10.3390/lubricants11050207>.
8. **Ipatov A.G., Malinin A.V., Shmykov S.N.** Increasing the efficiency of ICE turbochargers by modifying bearing matings // *Repair. Restoration. Modernization*. — 2024, no. 5, 8—12. DOI: 10.31044/1684-2561-2024-0-5-8-12 (in Russian)
9. **Ipatov A.G., Shmykov S.N.** Synthesis of antifric-tion coatings by the FABO method // *Technical ser-vice of machines*. — 2021, No. 1(142), 140—147. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-1-140-147 (in Russian)/
10. **Makarov A.V., Kharanzhevsky E.V., Ipa-tov A.G., Sirosh V.A., Soboleva N.N., and Volko-va E.G.** The Effect of Wearlessness during Surface Alloying of Steel with Bismuth // *Journal of Friction and Wear*. — 2024 (45), no. 6, 558—568
11. **Makarov A.V., Sirosh V.A., Soboleva N.N., Volkova E.G., Ipatov A.G., Gil'mutdinov F.Z., and Kharanzhevskiy E.V.** Ultralow Wear in Boundary Lubrication: a Tribological Study of Bi-Alloyed Steel under High Normal Loads and Sliding Speeds // *Friction*. — 2025 (13), no. 7, 9441049. <https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441049>
12. **Razak M., Liza S., and Fukuda K.** Investigation of Surface Morphology, Wettability and Tribological Properties of Ni Composite Coating Added with Graphite // *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* — 2025, no. 13, 015016. DOI: 10.1088/2051-672X/adad8c
13. **Guan L., Zhang Y., Cheng K., and Zhang R.** Influence of Graphite on Tribological Properties of SiC/Cu/Gr Composites with SiO₂-Cu₂O Glass Boundary // *Ceramics International*. — 2024 (50), no. 9, 15481—15489. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.025>
14. **Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Maka-rov A.V., Gil'mutdinov F.Z., Soboleva N.N., and Krivilyov M.D.** Tribological Performance of Bo-ron-Based Superhard Coatings Sliding Against Dif-ferent Materials // *Wear*. — 2021 (477), 203835. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203835/>
15. **Volkov K.G., Ipatov A.G., Kharanzhevskii E.V., Shmykov S.N.** Restoration and Hardening of the Working Chamfer of the Valve of an Internal Com-bustion Engine by Selective Laser Melting (SLM) // *Steel in Translation*. — 2023 (53), no. 3, 232—237. DOI: 10.3103/s0967091223030191
16. **Yukhin Yu.M., Mikhailov Yu.I.** Chemistry of bis-muth compounds and materials. — Novosibirsk: SB RAS. — 2001 (in Russian)
17. **Ortiz-Quinonez J.L., Zumeta-Dubé I., Díaz D., Nava-Etzana N., Cruz-Zaragoza E., and Santi-ago-Jacinto P.** Bismuth Oxide Nanoparticles Par-tially Substituted with EuIII, MnIV, and SiIV: Struc-tural, Spectroscopic, and Optical Findings // *Inorg Chem*. — 2017, Mar 20; (56), no. 6, 3394—3403. doi: 10.1021/acs.inorgchem.6b02923. Epub. 2017 Mar 2. PMID: 28252972

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