

УДК 667.637.222

Эффект безызносности при поверхностном легировании стали висмутом

А.В. Макаров^{1,2,3}, Е.В. Харанжевский⁴, А.Г. Ипатов⁵, В.А. Сирош¹, Н.Н. Соболева²,
Е.Г. Волкова¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
г. Екатеринбург 620108, Россия

²Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
г. Екатеринбург 620049, Россия

³ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина», г. Екатеринбург 620002, Россия

⁴ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»,
г. Ижевск 426039, Россия

⁵ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет»,
г. Ижевск 426069, Россия

Поступила в редакцию 21.10.2024.

После доработки 30.11.2024.

Принята к публикации 10.12.2024.

Работа посвящена анализу эффекта безызносности для углеродистых сталей, подвергнутых поверхностному легированию металлическим висмутом с применением технологии короткоимпульсного лазерного переплава. Трибологические исследования выполнены в сопряжении с промышленными металлическими сплавами — серый чугуны СЧ-18, бронза БрАЖНМц 10-4-2, алюминиевый сплав АЖ1. В условиях граничной смазки легированная висмутом стальная поверхность в паре с анализируемыми сплавами характеризуется стабильно низкой величиной коэффициента трения в диапазоне от 0,04 до 0,08. Установлено, что высокая усталостная прочность поверхности алюминиевого сплава и отсутствие адгезии с легированной висмутом стальной поверхностью обеспечивают условия, реализующие эффект безызносности (нулевой износ) при скоростях трения до 9 м/с и нормальной нагрузке до 250 Н. Металлографический анализ и 3D профилометрия поверхностей трения выявили, что процесс самоорганизации зоны контакта носит атермический характер (без фрикционного нагрева) и определяется пластическим течением контактирующих поверхностей без их взаимного разрушения.

Ключевые слова: легирование висмутом, короткоимпульсная лазерная обработка, выглаживание, трение, граничное трение, безызносность, самоорганизация, алюминиевый сплав.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-6-558-568

Адрес для переписки:

А.В. Макаров
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского
отделения Российской академии наук,
г. Екатеринбург 620108, Россия
e-mail: av-mak@yandex.ru

Address for correspondence:

A.V. Makarov
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy
of Sciences,
Ekaterinburg 620108, Russia;
e-mail: av-mak@yandex.ru

Для цитирования:

А.В. Макаров, Е.В. Харанжевский, А.Г. Ипатов, В.А. Сирош,
Н.Н. Соболева, Е.Г. Волкова
Эффект безызносности при поверхностном легировании стали висмутом.
Трение и износ.
2024. — Т. 45, № 6. — С. 558—568.
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-6-558-568

For citation:

A.V. Makarov, E.V. Kharanzhevsky, A.G. Ipatov, V.A. Sirosh,
N.N. Soboleva, and E.G. Volkova.
[Effect of Wearlessness in Surface Alloying of Steel with Bismuth].
Trenie i Iznos.
2024, vol. 45, no. 6, pp. 558—568 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-6-558-568

Effect of Wearlessness in Surface Alloying of Steel with Bismuth

A.V. Makarov^{1,2,3}, E.V. Kharanzhevskiy⁴, A.G. Ipatov⁵, V.A. Sirosh¹, N.N. Soboleva², and E.G. Volkova¹

¹*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg 620108, Russia*

²*E.S. Gorkunov Institute of Engineering Science of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg 620049, Russia*

³*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg 620002, Russia*

⁴*Udmurt State University, Izhevsk 426039, Russia*

⁵*Udmurt State Agrarian University, Izhevsk 426069, Russia*

Received 21.10.2024.

Revised 30.11.2024.

Accepted 10.12.2024.

Abstract

This work is devoted to the analysis of the wear-free effect for carbon steels subjected to surface alloying with metallic bismuth using the technology of short-pulse laser melting. Tribological studies were performed in conjunction with industrial metal alloys — gray cast iron, nickel-aluminum bronze, aluminum alloy. Under boundary lubrication conditions, the bismuth-alloyed steel surface tested in contact with the analyzed alloys showed ultralow value of the friction coefficient in the range from 0.04 to 0.08. It was established that the high fatigue strength of the aluminum alloy and the absence of adhesion with the bismuth-alloyed steel surface provide conditions that implement the wear-free effect (zero wear) at friction speeds of up to 9 m/s and normal loads of up to 250 N. Metallographic analysis and 3D profilometry of friction surfaces revealed that the process of self-organization of the contact zone is athermal in nature (without frictional heating) and is determined by the plastic flow of the contacting surfaces without their mutual destruction.

Keywords: bismuth alloying, short-pulse laser processing, burnishing, friction, boundary lubrication, wearlessness, selforganization, aluminum alloy.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-6-558-568

Адрес для переписки:

А.В. Макаров
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского
отделения Российской академии наук,
г. Екатеринбург 620108, Россия
e-mail: av-mak@yandex.ru

Address for correspondence:

A.V. Makarov
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy
of Sciences,
Ekaterinburg 620108, Russia;
e-mail: av-mak@yandex.ru

Для цитирования:

А.В. Макаров, Е.В. Харанжевский, А.Г. Ипатов, В.А. Сирош,
Н.Н. Соболева, Е.Г. Волкова
Эффект безызносности при поверхностном легировании стали висмутом.
Трение и износ.
2024. — Т. 45, № 6. — С. 558–568.
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-6-558-568

For citation:

A.V. Makarov, E.V. Kharanzhevskiy, A.G. Ipatov, V.A. Sirosh,
N.N. Soboleva, and E.G. Volkova.
[Effect of Wearlessness in Surface Alloying of Steel with Bismuth].
Trenie i Iznos.
2024, vol. 45, no. 6, pp. 558–568 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-6-558-568

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Goryacheva I.G. and Dobychin M.N.** Results of the Development of the Molecular Mechanical Theory of Friction // *Friction and Wear*. — 2008 (**29**), no. 4, 327—337 (in Russian)
2. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника (износ и безызносность): Учебник. — 4-е изд. — М.: Из-во МСХА. — 2001
3. **Ahmatov A.S.** *Molecular Physics of Boundary Friction*. — Publ. Israel Program for Scientific Translations: University of California. — 1966
4. **Skorynina P.A., Makarov A.V., and Savrai R.A.** Substantiating the Process Parameters of Frictional Treatment with a Sliding Indenter for an Austenitic Chromium-Nickel Steel. *Tribology Letters*. — 2024, (**72**):9. <https://doi.org/10.1007/s11249-023-01816-2>
5. **Tomlinson G.A.** A Molecular Theory of Friction // *Phil. Mag.* — 1929 (**7**), no. 7, 905—939
6. **Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., and Gil'mutdinov F.Z.** Towards Eliminating Friction and Wear in Plain Bearings Operating without Lubrication // *Scientific Reports*. — 2023 (**13**), 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>
7. **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>
8. **Pratt G.C.** *Materials for Plain Bearings* // *International Metallurgical Reviews*. — 1973 (**18**), 62—88. <https://doi.org/10.1179/imttr.1973.18.2.62>
9. **Hutchings I. and Shipway P.** *Tribology / second ed.* — Butterworth-Heinemann. — 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00005-2>
10. **Barlemont S., Colas G., Lenain A., and Cornuault P.H.** Effect of the Countermaterial on the Tribological Behavior of Cu45Zr46Al7Nb2 Bulk Metallic Glass // *Wear*. — 2023 (**522**), no. 1, 204712. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204712>
11. **Daure J.L., Kóti D., Carrington M.J., McCartney D.G., Stewart D.A., and Shipway P.H.** Galling of Stainless Steels as a Function of Test Conditions in an ASTM G196-Type Test Setup – The Role of Temperature, Rotational Velocity, Interrupted Rotation and Rotational Distance // *Wear*. — 2023 (**524–525**), 204804. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204804>
12. **Wang H.H., Wang W.J., Han Z.Y., Wang Y., Ding H.H., Lewis R., Lin Q., Liu Q.Y., and Zhou Z.R.** Wear and Rolling Contact Fatigue Competition Mechanism of Different Types of Rail Steels under Various Slip Ratios // *Wear*. — 2023 (**522**), 204721. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204721>
13. **Derjaguin B.V., Muller V.M., and Toporov Yu.P.** Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles // *Journal of Colloid and Interface Science*. — 1975 (**53**), no. 2, 314—326
14. **Maugis D.** Adhesion of Spheres: the JKR-DMT Transition Using a Dugdale Model // *Journal of Colloid and Interface Science*. — 1992 (**150**), no. 1, 243—269
15. **Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С., Козлов Д.А., Москвитин Г.В.** Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь–сталь // *Трение и износ*. — 2023 (**44**), № 4, 322—334. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334
16. **Ролдугин В.И.** *Физикохимия поверхности/2-е изд., испр.* — Долгопрудный: Интеллект. — 2011
17. **Kishimoto A. and Uda T.** Thermodynamics on the Bi-Fe-Ti System and the Gibbs Energy of Bi9Ti8 // *Metallurgical and Materials Transactions B*. — 2018 (**49**), 2975—2985. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1393-6>

References

1. **Goryacheva I.G. and Dobychin M.N.** Results of the Development of the Molecular Mechanical Theory of Friction // *Journal of Friction and Wear*. — 2008 (**29**), no. 4, 243—250
2. **Garkunov D.N.** *Tribotekhnika (iznos i bezyz-nosnost')*: Uchebnik. — 4-e izd. — М.: Iz-vo MSHA. — 2001 (in Russian)
3. **Ahmatov A.S.** *Molecular Physics of Boundary Friction*. — Publ. Israel Program for Scientific Translations: University of California. — 1966
4. **Skorynina P.A., Makarov A.V., and Savrai R.A.** Substantiating the Process Parameters of Frictional Treatment with a Sliding Indenter for an Austenitic Chromium-Nickel Steel. *Tribology Letters*. — 2024, (**72**):9. <https://doi.org/10.1007/s11249-023-01816-2>
5. **Tomlinson G.A.** A Molecular Theory of Friction // *Phil. Mag.* — 1929 (**7**), no. 7, 905—939
6. **Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., and Gil'mutdinov F.Z.** Towards Eliminating Friction and Wear in Plain Bearings Operating without Lubrication // *Scientific Reports*. — 2023 (**13**), 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>
7. **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>
8. **Pratt G.C.** *Materials for Plain Bearings* // *International Metallurgical Reviews*. — 1973 (**18**), 62—88. <https://doi.org/10.1179/imttr.1973.18.2.62>
9. **Hutchings I. and Shipway P.** *Tribology / second ed.* — Butterworth-Heinemann. — 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00005-2>
10. **Barlemont S., Colas G., Lenain A., and Cornuault P.H.** Effect of the Countermaterial on the Tribological Behavior of Cu45Zr46Al7Nb2 Bulk Metallic Glass // *Wear*. — 2023 (**522**), no. 1, 204712. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204712>
11. **Daure J.L., Kóti D., Carrington M.J., McCartney D.G., Stewart D.A., and Shipway P.H.** Galling of Stainless Steels as a Function of Test Conditions in an ASTM G196-Type Test Setup – The Role of Temperature, Rotational Velocity, Interrupted Rotation and

- Rotational Distance // Wear. — 2023 (524–525), 204804. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204804>
12. **Wang H.H., Wang W.J., Han Z.Y., Wang Y., Ding H.H., Lewis R., Lin Q., Liu Q.Y., and Zhou Z.R.** Wear and Rolling Contact fatigue Competition Mechanism of Different Types of Rail Steels under Various Slip Ratios // Wear. — 2023 (522), 204721. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204721>
13. **Derjaguin B.V., Muller V.M., and Toporov Yu.P.** Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles // Journal of Colloid and Interface Science. — 1975 (53), no. 2, 314—326
14. **Maugis D.** Adhesion of Spheres: the JKR-DMT Transition Using a Dugdale Model // Journal of Colloid and Interface Science. — 1992 (150), no. 1, 243—269
15. **Arkhipov V.E., Kuksenova L.I., Pugachev M.S., Kozlov D.A., Moskvitin G.V.** Influence of Surface Layers Modified with Copper on the Performance of Steel–Steel Sliding Friction Couples // Friction and Wear. — 2023 (44), no. 4, 214—223. DOI: 10.3103/S1068366623040025
16. **Roldugin V.I.** Fizikohimiya poverhnosti / 2-e izd., ispr. — Dolgoprudnyj: Intellekt. — 2011 (in Russian)
17. **Kishimoto A. and Uda T.** Thermodynamics on the Bi-Fe-Ti System and the Gibbs Energy of Bi9Ti8 // Metallurgical and Materials Transactions B. — 2018 (49), 2975—2985. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1393-6>

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