

УДК 621.793.7:539.92

Исследование триботехнических характеристик инновационных износостойких покрытий для высокоскоростной обработки резанием

М.Ш. Мигранов, М.П. Козочкин, А.С. Гусев, А.А. Маслов, Ю.О. Пристинский

Московский государственный технологический университет СТАНКИН,
пер. Вадковский, д. 1, г. Москва 127994, Россия

Поступила в редакцию 13.05.2025.

Цель работы — повышение эффективности высокоскоростной лезвийной обработки резанием жаропрочных сплавов за счёт улучшения триботехнических характеристик износостойких покрытий, достигнутых за счёт использования многокомпонентных катодов-мишеней из спеченных высокоэнтропийных сплавов при нанесении магнетронным способом.

Разработаны технологии изготовления высокоэнтропийных катодов-мишеней (диаметром 20 мм и 70 мм), получаемых высокотемпературным искровым плазменным спеканием порошковых композиций с различным процентным содержанием следующих элементов: Al; Cr; Hf; Mo; Nb; Ni; Ta; Ti; V; W; Zr; обеспечен контроль их параметров: плотность, гранулометрический анализ, электропроводность, твёрдость и трещиностойкость. Морфологию спеченных образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии и энерго-дисперсионного анализа. Изготовлена технологическая оснастка для магнетронной системы нанесения покрытий в различных газовых средах. Проведены триботехнические испытания на трибометрах и при лезвийной обработке резанием различных марок сталей и сплавов, по результатам которых определены наиболее эффективные составы многослойных композиционных наноструктурированных высокоэнтропийных износостойких покрытий, в частности $\text{Al}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{15}\text{V}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Nb}_{15}$ и $\text{Al}_{20}\text{Hf}_{10}\text{Ni}_{15}\text{Ti}_{25}\text{W}_{10}\text{Zr}_{20}$, обеспечивающие повышение производительности лезвийной обработки резанием хромоникелевых сплавов ЭИ 654 и ЭИ698 ВД.

Проведены сравнительные испытания промышленно используемых износостойких покрытий и покрытий из высокоэнтропийных катодов-мишеней: $\text{Al}_{20}\text{Hf}_{10}\text{Ni}_{15}\text{Ti}_{25}\text{W}_{10}\text{Zr}_{20}$; $\text{Al}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{15}\text{V}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Nb}_{15}$; $\text{Al}_{20}\text{Hf}_{15}\text{V}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Ta}_{10}\text{W}_{10}$; $\text{Ti}_{15}\text{Zr}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Ni}_{10}\text{W}_{10}\text{V}_{10}\text{Nb}_{15}\text{Al}_{10}$; $\text{Ti}_{20}\text{Hf}_{15}\text{Mo}_{15}\text{W}_{10}\text{V}_{10}\text{Nb}_{15}\text{Al}_{15}$ и другие. По результатам исследований при продольном точении хромоникелевых сплавов ЭИ-654 и ЭИ-698 ВД подтверждено увеличение эффективности применения высокоэнтропийных покрытий на режущем инструменте в среднем на 20—25 %.

Ключевые слова: износостойкие покрытия, высокоскоростное точение, высокоэнтропийные катоды-мишени, жаропрочный хромоникелевый сплав, адгезионная составляющая коэффициента трения, период стойкости режущего инструмента.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-342-353

Адрес для переписки:

М.Ш. Мигранов
Московский государственный технологический университет
СТАНКИН,
пер. Вадковский, д. 1, г. Москва 127994, Россия
e-mail: migmars@mail.ru

Address for correspondence:

M.Sh. Migranov
Moscow State Technological University STANKIN,
per. Vadkovsky, 1, Moscow 127994, Russia
e-mail: migmars@mail.ru

Для цитирования:

М.Ш. Мигранов, М.П. Козочкин, А.С. Гусев, А.А. Маслов,
Ю.О. Пристинский.
Исследование триботехнических характеристик инновационных
износостойких покрытий для высокоскоростной обработки резанием.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 4. — С. 342—353.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-342-353

For citation:

M.Sh. Migranov, M.P. Kozochkin, A.S. Gusev, A.A. Maslov, and
Yu.O. Pristinsky.
[Research of Tribotechnical Characteristics of Innovative
Wear-Resistant Coatings for High-Speed Machining].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 4, pp. 342—353 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-342-353

Research of Tribotechnical Characteristics of Innovative Wear-Resistant Coatings for High-Speed Machining

M.Sh. Migranov, M.P. Kozochkin, A.S. Gusev, A.A. Maslov, and Yu.O. Pristinsky

Moscow State Technological University STANKIN,
per. Vadkovsky, 1, Moscow 127994, Russia

Received 13.05.2025.

Abstract

The purpose of the work is to increase the efficiency of high-speed blade cutting of heat-resistant alloys based on improving the tribotechnical characteristics of wear-resistant coatings by developing and introducing multicomponent cathodes — targets from sintered high-entropy alloys when applied by the magnetron method.

At the preliminary stage, the composition of the powder material was selected; technologies for obtaining high-entropy target cathodes (with a diameter of 20 mm and 70 mm) obtained by high-temperature spark plasma sintering have been developed; control of their parameters is provided: density, grain-size analysis, electrical conductivity, hardness and crack resistance. The morphology of the sintered samples was examined by scanning electron microscopy and non-dispersive analysis. Technological equipment for magnetron coating system in various gas media is manufactured. Tribotechnical tests were carried out on tribometers and during blade cutting of various grades of steels and alloys, based on the results of which the most effective compositions of multilayer composite nanostructured high-entropy wear-resistant coatings were determined, in particular $\text{Al}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{15}\text{V}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Nb}_{15}$ and $\text{Al}_{20}\text{Hf}_{10}\text{Ni}_{15}\text{Ti}_{25}\text{W}_{10}\text{Zr}_{20}$, providing improved cutting performance of chromium-nickel alloys EI654 and EI698 VD.

Comparative tests of commercially used wear-resistant coatings and coatings made of high-entropy target cathodes were carried out: $\text{Al}_{20}\text{Hf}_{10}\text{Ni}_{15}\text{Ti}_{25}\text{W}_{10}\text{Zr}_{20}$; $\text{Al}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{15}\text{V}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Nb}_{15}$; $\text{Al}_{20}\text{Hf}_{15}\text{V}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Ta}_{10}\text{W}_{10}$; $\text{Ti}_{15}\text{Zr}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Ni}_{10}\text{W}_{10}\text{V}_{10}\text{Nb}_{15}\text{Al}_{10}$; $\text{Ti}_{20}\text{Hf}_{15}\text{Mo}_{15}\text{W}_{10}\text{V}_{10}\text{Nb}_{15}\text{Al}_{15}$; $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{10}\text{Cr}_{10}\text{Ni}_{10}\text{W}_{10}\text{Mo}_{10}\text{Nb}_{10}$ et al. According to the results of studies in the longitudinal turning of chromium-nickel alloys EI-654 and EI-698 VA, an increase in the efficiency of using high-entropy coatings on a cutting tool by an average of 20—25 % was confirmed.

Keywords: wear-resistant coatings, high-speed turning, high-entropy target cathodes, heat-resistant chromium-nickel alloy, adhesive component of the friction coefficient, service life of a cutting tool.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-342-353

Адрес для переписки:

М.Ш. Мигранов
Московский государственный технологический университет
СТАНКИН,
пер. Вадковский, д. 1, г. Москва 127994, Россия
e-mail: migmars@mail.ru

Address for correspondence:

M.Sh. Migranov
Moscow State Technological University STANKIN,
per. Vadkovsky, 1, Moscow 127994, Russia
e-mail: migmars@mail.ru

Для цитирования:

М.Ш. Мигранов, М.П. Козочкин, А.С. Гусев, А.А. Маслов,
Ю.О. Пристинский.
Исследование триботехнических характеристик инновационных
износостойких покрытий для высокоскоростной обработки резанием.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 4. — С. 342—353.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-342-353

For citation:

M.Sh. Migranov, M.P. Kozochkin, A.S. Gusev, A.A. Maslov, and
Yu.O. Pristinsky.
[Research of Tribotechnical Characteristics of Innovative
Wear-Resistant Coatings for High-Speed Machining].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 4, pp. 342—353 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-342-353

Список использованных источников

1. **Верещака А. А., Григорьев С.Н., Табаков В.П.** Многослойные наноструктурированные износостойкие покрытия для металлорежущего инструмента. — М: Инфра-Инженерия. — 2025
2. **Kumar J., Linda A., Sadhasivam M., Pradeep K.G., Gurao N.P., and Biswas K.** The Effect of Si Addition on the Structure and Mechanical Properties of Equiatomic CoCrFeMnNi High Entropy Alloy by Experiment and Simulation // *Materialia*. — 2023 (27), Art. no. 101707. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101707
3. **Zhang Y., Wang D., and Wang S.** High-Entropy Alloys for Electrocatalysis: Design, Characterization, and Applications // *Small*. — 2022 (18), no. 7, Art. no. 2104339. DOI: 10.1002/sml.202104339
4. **Zhou Y., Shen X., Qian T., Yan C., and Lu J. A** Review on the Rational Design and Fabrication of Nanosized Highentropy Materials // *Nano Research*. — 2022 (16), no. 5, 7874—7905. DOI: 10.1007/s12274-0235419-2
5. **Meng F., Zhang W., Zhou Z., Sheng R., Chuang A.C.-P., Wu C., Huang H., Li X., Zhang S., Zhang H., Zhu L., Jiang L., Liaw P.K., Chen S., and Tong Y.** Charge Transfer Effect on Local Lattice Distortion in a HfNbTiZr High Entropy Alloy // *Scripta Materialia*. — 2021 (203), Art. no. 114104. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2021.114104
6. **Рогачев А.С.** Структура, стабильность и свойств высокоэнтروпийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. — Российская академия наук. — 2020 (121), № 8, 807—814
7. **Migranov M.Sh., Shekhtman S.R., and Gusev A.S.** Synthesizing Low-Wear Cathodic Coatings from Multi-Component Alloys with a High-Entropy Effect // *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3_71
8. **Migranov M.Sh., Grigoriev S.N., Shekhtman S.R., Suhova N.A., Gusev A.S.** Synthesizing High-Entropy Cutting Tool Coatings Using the Magnetron Sputtering Method. *Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering, Sochi, Russian Federation, 19–24 мая 2024 года*. — Sochi: Springer. — 2024, 774—782. DOI 10.1007/978-3-031-65870-9_72
9. **Григорьев С.Н., Мигранов М.Ш., Волосова М.А., Гусев А.С.** Спеченные порошковые высокоэнтропийные катоды-мишени для износостойких покрытий // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. — 2023 (66), № 4, 410—414. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-4-410-414
10. **Легаев В.П., Генералов Л.К., Галковский О.А.** Аналитический обзор существующих гипотез о природе трения // *Вестник Московского авиационного института*. — 2019 (26), № 1, 174—181
11. **Прибор для исследования адгезивного взаимодействия:** патент на полезную модель № 34249, 24 июня 2003 г. / Л.Ш. Шустер, М.Ш. Мигранов
12. **Шустер Л.Ш., Криони Н.К., Шолом В.Ю., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. — М.: Машиностроение. — 2008
13. **Zibing An, Shengcheng Mao, Yinong Liu, Li Wang, Hao Zhou, Bin Gan, Ze Zhang, and Xiaodong Han.** A Novel HfNbTaTiV High-Entropy Alloy of Superior Mechanical Properties Designed on the Principle of Maximum Lattice Distortion // *Journal of Materials Science and Technology*. — 2021 (79), 109—117
14. **Ye Y.F., Wang Q., Lu J., Liu C.T., and Yang Y.** High-Entropy Alloy: Challenges and Prospects // *Materials Today*. — 2016 (19), no. 6, 349—362. DOI: 10.1016/j.mattod.2015.11.026
15. **Юрченко Н.Ю.** Разработка и исследование высокоэнтропийных сплавов с высокой удельной прочностью на основе системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. — Белгород. — 2019

References

1. **Vereshchaka A.A., Grigoriev S.N., Tabakov V.P.** Multilayer Nanostructured Wear-Resistant Coatings for Metal-Cutting Tools. — Moscow: Infra-Engineering. — 2025 (in Russian)
2. **Kumar J., Linda A., Sadhasivam M., Pradeep K.G., Gurao N.P., and Biswas K.** The Effect of Si Addition on the Structure and Mechanical Properties of Equiatomic CoCrFeMnNi High Entropy Alloy by Experiment and Simulation // *Materialia*. — 2023 (27), Art. no. 101707. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101707
3. **Zhang Y., Wang D., and Wang S.** High-Entropy Alloys for Electrocatalysis: Design, Characterization, and Applications // *Small*. — 2022 (18), no. 7, Art. no. 2104339. DOI: 10.1002/sml.202104339
4. **Zhou Y., Shen X., Qian T., Yan C., and Lu J. A** Review on the Rational Design and Fabrication of Nanosized Highentropy Materials // *Nano Research*. — 2022 (16), no. 5, 7874—7905. DOI: 10.1007/s12274-0235419-2
5. **Meng F., Zhang W., Zhou Z., Sheng R., Chuang A.C.-P., Wu C., Huang H., Li X., Zhang S., Zhang H., Zhu L., Jiang L., Liaw P.K., Chen S., and Tong Y.** Charge Transfer Effect on Local Lattice Distortion in a HfNbTiZr High Entropy Alloy // *Scripta Materialia*. — 2021 (203), Art. no. 114104. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2021.114104
6. **Rogachev A.S.** Structure, stability, and properties of high-entropy alloys // *Physics of Metals and Metallography*. — Russian Academy of Sciences. — 2020 (121), № 8, 807—814 (in Russian)
7. **Migranov M.Sh., Shekhtman S.R., and Gusev A.S.** Synthesizing Low-Wear Cathodic Coatings from Multi-Component Alloys with a High-Entropy Effect // *Proceedings of the 9th International*

- Conference on Industrial Engineering. ICIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3_71
8. **Migranov M.Sh., Grigoriev S.N., Shekhtman S.R., Suhova N.A., Gusev A.S.** Synthesizing Low-Wear Cathodic Coatings from Multi-Component Alloys with a High-Entropy Effect // Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3_71
 9. **Grigoriev S.N., Migranov M.Sh., Volosova M.A., Gusev A.S.** Sintered Powder High-Entropy Cathode Targets for Wear-Resistant Coatings // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Ferrous Metallurgy). — 2023 (66), № 4, 410—414. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-4-410-414 (in Russian)
 10. **Legaev V.P., Generalov L.K., Galkovskiy O.A.** Analytical Review of Existing Hypotheses on the Nature of Friction // Vestnik Moskovskogo Aviatcionnogo Instituta (Moscow Aviation Institute Bulletin). — 2019 (26), № 1, 174—181 (in Russian)
 11. **Device for Studying Adhesive Interaction:** Utility Model Patent № 34249, June 24, 2003 / L.Sh. Shuster, M. Sh. Migranov
 12. **Shuster L.Sh., Krioni N.K., Sholom V.Yu., Migranov M.Sh.** Coatings and lubrication in high-temperature moving joints and metalworking. — M.: Mashinostroenie. — 2008 (in Russian)
 13. **Zibing An, Shengcheng Mao, Yinong Liu, Li Wang, Hao Zhou, Bin Gan, Ze Zhang, and Xiaodong Han.** A Novel HfNbTaTiV High-Entropy Alloy of Superior Mechanical Properties Designed on the Principle of Maximum Lattice Distortion // Journal of Materials Science and Technology. — 2021 (79), 109—117
 14. **Ye Y.F., Wang Q., Lu J., Liu C.T., and Yang Y.** High-Entropy Alloy: Challenges and Prospects // Materials Today. — 2016 (19), no. 6, 349—362. DOI: 10.1016/j.mattod.2015.11.026
 15. **Yurchenko N.Yu.** Development and Study of High-Entropy Alloys with High Specific Strength Based on the Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr System: PhD Thesis (Candidate of Technical Sciences): 05.16.01. — Belgorod. — 2019 (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