



УДК 621.762:669.017.15

DOI 10.17073/0368-0797-2023-4-410-414

Оригинальная статья
Original article

СПЕЧЕННЫЕ ПОРОШКОВЫЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ КАТОДЫ-МИШЕНИ ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

С. Н. Григорьев, М. Ш. Мигранов[✉], М. А. Волосова, А. С. Гусев

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., 1)

✉ migmars@mail.ru

Аннотация. Современное машиностроительное производство, оснащенное высокопроизводительными мехатронными системами и станками с числовым программным и адаптивным управлением для лезвийной обработки резанием жаропрочных хромоникелевых и титановых сплавов, требует повышения эксплуатационных свойств режущего инструмента, работающего при высоких температурно-силовых нагрузках в контактной зоне и, соответственно, при существенном напряженно-деформированном состоянии режущего клина. Решение вопроса повышения износостойкости и работоспособности возможно как путем разработки и внедрения нового инструментального материала, так и применения износостойких покрытий. В работе представлены результаты по разработке технологии получения высокоэнтропийных катодов-мишеней путем искрового плазменного спекания с последующим нанесением износостойких покрытий на металлорежущий инструмент магнетронным и ионно-плазменными методами. Получены образцы спеченных высокоэнтропийных катодов-мишеней различных по составу композиций (более четырнадцати) при разных режимах спекания (в зависимости от температуры в пяти режимах) с последующей их оптимизацией, а также двух типоразмеров (20 и 80 мм) для дальнейшего использования для нанесения износостойких покрытий на магнетронной установке. Проведены структурный и фазовый анализы, а также исследование физико-механических свойств полученных высокоэнтропийных катодов-мишеней: плотности, твердости, электропроводности, эмиссионной способности. Экспериментально подтверждена возможность получения высокоэнтропийных катодов-мишеней методом искрового плазменного спекания, при этом показано влияние температуры спекания на структуру и свойства спеченных образцов высокоэнтропийных катодов-мишеней. Установлены зависимости физико-механических и электрофизических параметров катодов-мишеней от технологических режимов процесса искрового плазменного спекания.

Ключевые слова: спеченные порошковые высокоэнтропийные катоды-мишени, искровое плазменное спекание, композиция, твердость, электропроводность, плотность, структурно-фазовый состав

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>.

Для цитирования: Григорьев С.Н., Мигранов М.Ш., Волосова М.А., Гусев А.С. Спеченные порошковые высокоэнтропийные катоды-мишени для износостойких покрытий. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(4):410–414.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-410-414>

SINTERED POWDER HIGH-ENTROPY TARGET CATHODES FOR WEAR-RESISTANT COATINGS

S. N. Grigor'ev, M. Sh. Migranov[✉], M. A. Volosova, A. S. Gusev

Moscow State University of Technology "STANKIN" (1 Vadkovskii Lane, Moscow 127055, Russian Federation)

✉ migmars@mail.ru

Abstract. Modern machine-building production equipped with high-performance mechatronic systems and numerically-controlled and adaptive control machines for blade cutting of heat-resistant chromium-nickel and titanium alloys requires increasing the operating properties of cutting tools working at high temperature-force loads in the contact zone, respectively with a significant stress-strain state of the cutting wedge. It is possible to solve the problem of increasing wear resistance and serviceability by developing and introducing new tooling material, as well as by applying wear-resistant coatings. The paper presents the results on development of technology for obtaining high-entropy target cathodes by spark plasma sintering with subsequent application of wear-resistant coatings on metal-cutting tools by both magnetron and ion-plasma methods. Samples of sintered high-entropy target cathodes of different compositions (more than fourteen) and at different modes of their sintering (depending on temperature in five modes) with their subsequent optimization and two standard sizes (20 and 80 mm) were obtained for further application of wear-resistant coatings on the magnetron unit. The authors carried out structural and phase analysis and studied physicomechanical properties of the obtained high-entropy

target cathodes: density, hardness, electrical conductivity, emissivity. The possibility of obtaining high-entropy target cathodes by spark plasma sintering was confirmed experimentally, and the effect of sintering temperature on structure and properties of the sintered samples of high-entropy target cathodes was established. Dependence of physicomechanical and electrophysical parameters of target cathodes on technological modes of spark plasma sintering is shown.

Keywords: sintered powder high-entropy target cathodes, spark plasma sintering, composition, hardness, electrical conductivity, density, structural-phase composition

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>.

For citation: Grigor'ev S.N., Migranov M.Sh., Volosova M.A., Gusev A.S. Sintered powder high-entropy target cathodes for wear-resistant coatings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(4):410–414. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-410-414>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач современного машиностроения является повышение долговечности и надежности изделий, их конкурентоспособности и эффективности как на внутреннем, так и на мировом рынке на основе повышения эффективности лезвийной обработки резанием. При оснащении современных высокоскоростных станков системами числового программного и адаптивного управления наиболее слабым звеном технологической цепочки является металлорежущий инструмент, существенно сдерживающий как производительность обработки, так и улучшение показателей качества обработанной поверхности детали. В настоящее время те износостойкие покрытия, которые получают на режущем инструменте традиционными методами и технологиями путем применения от одного до четырех монокатодов на установке, не позволяют удовлетворить возрастающую потребность на инструмент. Особенно актуален инструмент с покрытием при работе в режиме высокоскоростной обработки, повышенных температурно-силовых нагрузках в контактной зоне и применении в качестве обрабатываемого материала высокопрочных, жаростойких хромоникелевых и титановых сплавов.

Вместе с тем в настоящее время все большее развитие получают работы [1 – 3], связанные с порошковой металлургией. Возросший научный интерес к этому направлению связан с тем, что:

- оно всегда определяло технологический прогресс и технический уровень машиностроительного производства;

- при отсутствии возможности изготовления традиционными способами оно позволяло создавать детали и получать принципиально новые материалы со свойствами, существенно улучшающими их эксплуатационные характеристики [4; 5].

Исходя из вышеизложенного, целью исследования является разработка технологии электроискрового спекания порошкового материала с последующей оценкой свойств и необходимости обеспечения работоспособности в качестве катодов-мишеней для нанесения многокомпонентных износостойких покрытий на металлорежущем инструменте.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В настоящее время большой интерес вызывают покрытия, полученные путем применения высокоэнтروпийных сплавов, которые обладают рядом уникальных свойств, таких как высокая температуростойкость, износостойкость, твердость, прочность [6 – 9]. В то же время, свойства синтезируемых покрытий такого типа напрямую зависят от их элементного состава и технологии нанесения, что требует проведения научных исследований как в направлении поиска рационального состава высокоэнтропийного покрытия, так и в части технологии их синтеза на основе разработки процессов получения высокоэнтропийных катодов-мишеней [10; 11], позволяющих формировать износостойкие покрытия на режущем инструменте.

В области разработки, создания и применения высокоэнтропийных сплавов проведено множество научно-исследовательских работ [12 – 15]. К особенностям таких сплавов относятся:

- характерное повышенное значение энтропии смешения (S_{mix}) в отличие от традиционных многокомпонентных материалов [16];

- получение уникальных механических свойств осуществляется за счет особенностей термических явлений, диффузионной активности атомов при определенных механизмах структурирования и фазообразования [17];

- на формирование кристаллической решетки значительное влияние оказывают железо, никель, молибден, алюминий и др.;

- для прогнозирования фазового состава используются двойные или тройные диаграммы состояния [18];

- введение легирующих элементов позволяет обеспечить твердорастворное упрочнение, а также выделение в них дискретных фаз [19];

- эти сплавы занимают особую группу [20].

При этом, согласно работам [5; 9; 15], некоторые полученные высокоэнтропийные сплавы обладают отличительными уникальными свойствами по сравнению с материалами специального назначения, полученными традиционными способами (в частности, по твердости, жаропрочности, жаростойкости, коррозионной стойкости, износостойкости и термостабильности).

МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ**ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Основным способом получения высокоэнтропийных материалов является литье в комбинации с различными методами плавления [20]. Однако, как показывает анализ исследований в области порошковой металлургии, интересные результаты получаются при применении методов спекания порошков для получения высокоэнтропийных материалов, среди которых можно выделить искровое плазменное спекание (*spark plasma sintering* (SPS)) [6; 7; 12]. Исходя из вышеизложенного, методические комплексные работы проводились в два взаимосвязанных этапа в лабораториях искрового плазменного спекания Центра новых материалов и технологий Государственного инжинирингового центра при МГТУ «СТАНКИН». На первом этапе для получения катодов-мишеней были проведены исследования по разработке технологии получения высокоэнтропийных катодов-мишеней, на втором этапе – по нанесению и испытанию полученных покрытий. Ниже представлены работы по первому этапу, т. е. получение и испытание катодов-мишеней из порошкового материала.

Для научно обоснованного выбора составляющих порошковой композиции для электроискрового спекания катодов-мишеней проведен анализ и выбор коммерчески доступных металлических порошков для одной композиции из более чем 12 наиболее эффективных элементов износостойких покрытий для инструмента. После определения количественного и качественного состава (с учетом правила Юм–Розери) исследуемых композиций высокоэнтропийных катодов-мишеней методически все виды работ и испытаний проводились в следующей последовательности:

- приготовление порошковой композиции с обеспечением необходимого гранулометрического состояния составляющих порошковой композиции;

- предварительная подпрессовка порошковой композиции в матрице ручным гидравлическим прессом «3851 Manual BenchTOP 12» (Carver, США);

- искровое плазменное спекание осуществлялось на установке «КСЕ-ФСТ-Н-НР-D25-SD» (ФСТ, Германия) при вариации температурного режима с интервалом 50 °С от 500 до 1600 °С;

- давление прессования 25, 50, 80 и 100 кН;

- скорость нагрева 50 и 100 °С/мин;

- время выдержки 1, 2, 3, 4 и 5 мин;

- размеры образцов 20 и 80 мм.

В натурных экспериментальных исследованиях основные характеристики катодов-мишеней оценивались путем применения современных методов и оборудования:

- плотность определялась гидростатическим методом;

- твердость измерялась твердомером «Wilson Rockwell» серии 574 (Германия);

- электропроводность определялась фазовым вихревым методом с использованием портативного прибора «Fischer SIGMASCOPE» (Helmut Fischer GmbH+Co.KG, Германия);

- элементный, качественный и количественный составы оценивались соответственно методами электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе «Phenom ProX» (Нидерланды) и настольным рентгеновским дифрактометром «Дифрей-401к» (Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные образцы высокоэнтропийных катодов-мишеней ($Al_{20}-Ti_{20}-Zr_{15}-V_{15}-Cr_{15}-Nb_{15}$; $Al_{20}-Hf_{15}-Mo_{15}-Co_{15}-Ta_{10}-W_{10}-Zr_{15}$; $Al_{20}-Hf_{15}-V_{15}-Cr_{15}-Ti_{15}-Ta_{10}-W_{10}$; $Al_{20}-Hf_{10}-Ni_{15}-Ti_{25}-W_{10}-Zr_{20}$; $Mo_{20}-Nb_{20}-Ni_{20}-Ta_{20}-W_{20}$; $Nb_{20}-Hf_{20}-Ti_{20}-Zr_{20}-Ta_{20}$ и др.) подвергались различным испытаниям с учетом необходимости дальнейшего их использования при нанесении наноструктурированных покрытий на металлорежущий инструмент. Одними из основных показателей, относящихся к катодам-мишеням, являются (кроме гранулометрического состава порошковой композиции) плотность, твердость, электропроводность, а также элементный, качественный и количественный составы (см. таблицу). По результатам проведенных исследований установлено, что увеличение температуры спекания ведет к росту относительной плотности, повышению твердости и электропроводности.

Выводы

По результатам выполненных исследований разработан технологический процесс искрового плазменного спекания композиций высокоэнтропийных катодов-мишеней для последующего синтеза износостойких покрытий на режущий инструмент. Получены оптимальные составы композиций и режимы их спекания с обеспечением необходимых структур и физико-механических свойств. Экспериментально подтверждена возможность получения высокоэнтропийных катодов-мишеней методом искрового плазменного спекания. При этом установлено влияние температуры спекания на структуру и свойства спеченных образцов высокоэнтропийных катодов-мишеней и выявлены зависимости физико-механических свойств высокоэнтропийных катодов от технологических режимов процесса SPS. Разработка и внедрение катодов-мишеней из высокоэнтропийных сплавов позволят достичь таких положительных результатов в машиностроительном производстве, как повышение эффективности высокоскоростной обработки резанием и получение композиционных износостойчивых покрытий с различными эффектами при лезвийной обработке резанием (формирование вторичных и алмазоподобных структур в контактной зоне и, как следствие, адаптация и самоорганизация при трении и изнашивании).

Результаты испытаний при режимах спекания: температура спекания 1200 °С; давление прессования 25 кН; время выдержки 1 мин; скорость нагрева 100 °С/мин; диаметр образца 20 мм

Results under sintering conditions: sintering temperature 1200 °C; pressing pressure 25 kN; holding time 1 min; heating rate 100 °C/min; sample diameter 20 mm

Плотность, г/см ³	Твердость, НВ	Электропроводность, мС/м ²	СЭМ			
			элемент	номер элемента	содержание, %	
					ат.	по массе
$Al_{20}-Ti_{20}-Zr_{15}-V_{15}-Cr_{15}-Nb_{15}$						
8,60	104,6	0,67 – 0,74	Ti	22	29,71	32,28
			Al	13	43,64	26,73
			Zr	40	10,71	22,18
			Cr	24	15,93	18,80
$Al_{20}-Hf_{15}-Mo_{15}-Co_{15}-Ta_{10}-W_{10}-Zr_{15}$						
9,99	110,2	0,64 – 1,20	Mo	42	26,50	26,07
			Co	27	26,12	15,78
			Zr	40	14,36	13,43
			Hf	72	10,38	19,00
			W	74	9,53	17,96
			Br	35	8,84	7,24
			C	6	4,27	0,53

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014;16 (9):4749–4768. <http://doi.org/10.3390/e16094749>
- Murty B.S., Yeh J.-W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. *High-Entropy Alloys*. Amsterdam: Elsevier; 2019:374.
- Gao M.C., Yeh J.-W., Liaw P.K., Zhang Y. *High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications*. Cham: Springer International Publishing; 2016:524.
- Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014;61:1–93. <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
- Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Печковский Э.П. Новый класс материалов – высокоэнтропийные сплавы и покрытия. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2013;18(4–2):1938–1940.
Firstov S.A., Gorban' V.F., Krapivka N.A., Pechkovskii E.P. New class of materials – high-entropic alloys and coatings. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2013;18(4–2):1938–1940. (In Russ.)
- Кочетов Н.А., Рогачев А.С., Щукин А.С., Вадченко С.Г., Ковалев И.Д. Механическое сплавление с частичной аморфизацией многокомпонентной порошковой смеси Fe–Cr–Co–Ni–Mn и ее электроискровое плазменное спекание для получения компактного высокоэнтропийного материала. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2018;(2):35–42. <http://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-35-42>
Kochetov N.A., Rogachev A.S., Shchukin A.S., Vadchenko S.G., Kovalev I.D. Mechanical alloying with partial amorphization of Fe–Cr–Co–Ni–Mn multicomponent powder mixture and its spark plasma sintering for compact high-entropy material production. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2018;(2):35–42. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-35-42>
- Chen W., Anselmi-Tamburini U., Garay J.E., Groza J.R., Munir Z.A. Fundamental investigations on the spark plasma sintering/synthesis process. I. Effect of dc pulsing on reactivity. *Materials Science and Engineering: A*. 2005;394(1–2):132–138. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.11.020>
- Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – A new era of exploitation. *Materials Science Forum*. 2007;560:1–9. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1>
- Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017;122:448–511. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1):2–22. <http://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*. 2019;4:515–534. <http://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>
- Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение*. 2020;121(8):807–841. <http://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *The Physics of Metals and Metallography*. 2020;121(8):733–764. <http://doi.org/10.1134/S0031918X20080098>
- Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2011;59(1):182–190. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.023>

14. Senkov O.N., Wilks G.B., Scott J.M., Miracle D.B. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys. *Intermetallics*. 2011;19(5): 698–706. <http://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.01.004>
15. Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Даниленко Н.И., Карпец М.В., Андреев А.А., Макаренко Е.С. Термостабильность сверхтвердых нитридных покрытий на основе многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы TiVZrNbHf. *Порошковая металлургия*. 2013;(9/10):93–102.
Firstov S.A., Gorban' V.F., Danilenko N.I., Karpets M.V., Andreev A.A., Makarenko E.S. Thermal stability of superhard nitride coatings based on multicomponent high-entropy alloy of the TiVZrNbHf system. *Poroshkovaya metallurgiya*. 2013;(9/10):93–102. (In Russ.).
16. Oates W.A. Configurational entropies of mixing in solid alloys. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2007;28:79–89. <http://doi.org/10.1007/s11669-006-9008-3>
17. Otto F., Yang Y., Bei H., George E.P. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys. *Acta Materialia*. 2013;61(7):2628–2638. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.042>
18. Tong C.-J., Chen Y.-L., Yeh J.-W., Lin S.-J., Chen S.-K., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Microstructure characterization of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005;36(4):881–893. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0283-0>
19. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*. 2014;2(3):107–123. <http://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
20. Gelchinski B.R., Balyakin I.A., Yuryev A.A., Rempel A.A. High-entropy alloys: properties and prospects of application as protective coatings. *Russian Chemical Reviews*. 2022;91(6):RCR5023. <http://doi.org/10.1070/RCR5023>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Сергей Николаевич Григорьев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой высокоэффективных технологий обработки, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
ORCID: 0000-0002-8239-5354
E-mail: s.grigoriev@stankin.ru

Марс Шарифуллович Мигранов, д.т.н., профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
ORCID: 0000-0002-7075-5500
E-mail: migmars@mail.ru

Марина Александровна Волосова, к.т.н., доцент кафедры высокоэффективных технологий обработки, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
ORCID: 0000-0002-5302-5442
E-mail: volosova1978@gmail.com

Андрей Сергеевич Гусев, младший научный сотрудник кафедры высокоэффективных технологий обработки, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
ORCID: 0000-0002-5629-4998
E-mail: gusev.angrey@bk.ru

Sergei N. Grigor'ev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Highly Efficient Processing Technologies, Moscow State University of Technology "STANKIN"
ORCID: 0000-0002-8239-5354
E-mail: s.grigoriev@stankin.ru

Mars Sh. Migrantov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Highly Efficient Processing Technologies, Moscow State University of Technology "STANKIN"
ORCID: 0000-0002-7075-5500
E-mail: migmars@mail.ru

Marina A. Volosova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Highly Efficient Processing Technologies, Moscow State University of Technology "STANKIN"
ORCID: 0000-0002-5302-5442
E-mail: volosova1978@gmail.com

Andrei S. Gusev, Junior Researcher of the Chair of Highly Efficient Processing Technologies, Moscow State University of Technology "STANKIN"
ORCID: 0000-0002-5629-4998
E-mail: gusev.angrey@bk.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

С. Н. Григорьев – постановка и решение задачи по повышению износоустойчивости металлорежущего инструмента путем разработки технологии получения высокоэнтропийных катодов-мишеней для нанесения инновационных износостойких покрытий.

М. Ш. Мигранов – теоретико-экспериментальный анализ методов получения высокоэнтропийных катодов-мишеней, обоснование выбора и режимов искрового плазменного спекания высокоэнтропийных катодов-мишеней, формулирование выводов по результатам исследований.

М. А. Волосова – разработка методик экспериментальных исследований, подбор необходимого оборудования для натуральных испытаний.

А. С. Гусев – проведение экспериментальных испытаний, обработка результатов.

S. N. Grigor'yev – statement and solution of the problem of increasing the wear resistance of metal-cutting tools by developing the technology of obtaining high-entropy target cathodes for application of innovative wear-resistant coatings.

M. Sh. Migrantov – theoretical and experimental analysis of methods for obtaining high-entropy target cathodes, justification of choice and modes of spark plasma sintering of high-entropy target cathodes, formulation of conclusions.

M. A. Volosova – development of experimental research methods, selection of necessary equipment for full-scale tests.

A. S. Gusev – performance of experimental tests, processing of the results.

Поступила в редакцию 29.06.2023
После доработки 06.07.2023
Принята к публикации 30.07.2023

Received 29.06.2023
Revised 06.07.2023
Accepted 30.07.2023