

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.791:621.771

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.015

РЕИНЖИНИРИНГ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА ЧХ28

**Михаил Алексеевич Гурьев^{1†}, Сергей Геннадьевич Иванов²,
Евгения Владимировна Черных³, Вероника Викторовна Романенко⁴,
Алексей Михайлович Гурьев⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

⁵ Уханьский текстильный университет, ул. ФангЖи, 1, 430073, Ухань, КНР

¹ gurievma@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

² serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

³ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

⁴ veronika_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2444-4848>

⁵ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Аннотация. Одной из важнейших задач горнодобывающей, рудо- и лесоперерабатывающей промышленности является импортозамещение и реинжиниринг деталей зарубежной техники. В настоящей работе с применением принципов реинжиниринга исследуется химический состав и структура отработанной детали дробильного оборудования. Установлено, что представленные образцы выплавлены из высокохромистого чугуна ЧХ28, дополнительно легированного молибденом, ванадием и никелем. Наиболее близким зарубежным аналогом данного материала может быть сталь марки DIN 1695-81: G-260Cr27. Результаты исследования показали, что материал отливок подвергался нагреву до температур 950-1050 °С и выдержке при этих температурах в течение времени не менее 2 ч, с последующим охлаждением на воздухе до температур 160-200 °С и отпуском при температуре 200 °С в течение времени не менее 2 ч, что подтверждается твердостью образцов на уровне 63-64 HRC и высокой степенью равновесности их структурно-фазового состояния и гомогенности фаз.

Ключевые слова: импортозамещение, реинжиниринг, хромистый чугун, термическая обработка, микроструктура, микротвердость.

Благодарности: Исследования выполнены в ИЦ «ХимБиоМаш» ФБГОУ ВО АлтГТУ.

Для цитирования: Гурьев М.А., Иванов С.Г., Черных Е.В., Романенко В.В., Гурьев А.М. Реинжиниринг технологии получения отливок из высокохромистого чугуна ЧХ28 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Т. 20, № 3. С. 414–419. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.015.

Original article

REENGINEERING OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING CASTINGS FROM HIGH-CHROMIUM CAST IRON ChKh28

**Mikhail A. Guryev^{1†}, Sergey G. Ivanov², Evgeniya V. Chernykh³,
Veronika V. Romanenko⁴, Alexey M. Guryev⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

⁵ Wuhan Textile University, FangZhi Road, 1, Wuhan, 430073, China

¹ gurievma@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

² serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

³ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

⁴ veronika_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2444-4848>

⁵ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Abstract. One of the most important tasks of the mining, ore and timber processing industries is import substitution and reengineering of foreign equipment parts. In this paper, using the principles of reengineering, we study the chemical composition and structure of a used part of crushing equipment. It has been established that the presented samples were smelted from high-chromium cast iron ChKh28, additionally alloyed with molybdenum, vanadium and nickel. Its closest foreign counterpart may be steel grade DIN 1695-81: G-260Cr27. The results of the study showed that the casting material was heated to hardening temperatures up to 950-1050 °C and held at these temperatures for at least 2 hours, followed by cooling in air to temperatures of 160-200 °C and tempering at a temperature of 200 °C for at least 2 hours, which is confirmed by the hardness of the samples at the level of 53-64 HRC and the high degree of equilibrium of their structural-phase state and phase homogeneity.

Keywords: import substitution, reengineering, chromium cast iron, heat treatment, microstructure, microhardness.

Acknowledgements: The studies were carried out at the Engineering Center «ChemBioMash» AltSTU.

For citation: Guryev, M. A., Ivanov, S. G., Chernykh, E. V., Romanenko V. V. & Guryev, A. M. (2023). Reengineering of technology for producing castings from high-chromium cast iron ChKh28. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(20), 414–419. (InRuss.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.015.

Введение

Сегодняшние экономические и политические реалии таковы, что многие российские машиностроительные предприятия сталкиваются с нехваткой и отсутствием дефицитных запасных частей для различных производственных механизмов, из-за чего вынуждены простаивать и терпеть убытки. В связи с этим, как никогда, остро стоит вопрос замещения импортируемой техники и ее деталей отечественными аналогами. Эффективная реализация импортозамещения с привлечением собственных инновационных технологий позволит создать изделия, по своим эксплуатационным характеристикам не уступающие зарубежным аналогам, сократить износ оборудования, повысить производственные мощности и вывести машиностроительную отрасль на качественно новый технический уровень.

К числу наиболее приоритетных секторов экономики РФ для импортозамещения относятся горнодобывающая и лесоперерабатывающая отрасли промышленности. Импортозависимость в данных сегментах в среднем составляет 50 %. Горнодобывающие компании отмечают сложности с поиском альтернативы ряду дорогостоящего бурового, дробильного и насосного оборудования [1]. Оперативному решению указанной проблемы способствуют возможности разработки и изготовления импортозамещающих деталей для горнодобывающей, рудо- и лесоперерабатывающей техники с помощью реинжиниринга.

Задача процесса реинжиниринга состоит не только в полном копировании существующей

работающей детали, но и усовершенствовании материала, из которого она произведена, что обеспечит создание дополнительных функций оборудования, увеличение его износостойкости и долговечности.

Одним из этапов реинжиниринга является проведение анализа детали с целью получения необходимой информации о химическом составе, марки материала, структуры, физико-механических свойств и способов термической обработки, использованных в ходе её изготовления. В дальнейшем эти сведения могут повлиять на выбор материалов, которые будут отвечать современным стандартам качества, заданному уровню свойств и новым задачам.

В настоящей работе с применением принципов реинжиниринга исследуется химический состав и структура отработанной детали дробильного оборудования.

Методика исследований

Исследования проводили на поперечных шлифах двух образцов изделия, бывшего в эксплуатации (рис.1). Химический состав образцов был определен с помощью эмиссионного спектрометра «SOLARIS CCD Plus» (табл.1). По результатам химического анализа можно сделать вывод о том, что представленные образцы наиболее близко соответствуют чугуна ЧХ28, выплавляемому по ГОСТ 7769–82 «Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки». При этом данный чугун дополнительно легирован молибденом, ванадием и никелем. Наиболее близкий зарубежный аналог по DIN 1695-81: G-260Cr27, содержащий

2,3-2,9 масс. % С; 0,5-1,5 масс. % Si; 0,5-1,5 масс. % Mn; до 1,2 масс. % Ni и до 1,0 масс. % Mo.

Шлифовка и полировка образцов производились на автоматическом шлифовально-полировальном станке DIGIPREP с применением алмазных кругов зернистостью 54, 18, 10, 6 мкм. Полировку осуществляли с применением сукон MET-Mambo и поликристаллических алмазных суспензий зернистостью 3, 1 и 0,5 мкм. Суперфинишную полировку осуществляли на сукне MET-FOKS с применением кислой суспензии коллоидного оксида кремния 0,05 мкм.

Травление приготовленных металлографических шлифов выполнялось последовательно 4 % раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте с промежуточной мойкой и сушкой, за-

тем 4 % раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Для повышения контрастности структурно-фазового состояния, образцы дополнительно травили реактивом Берахи II.



Рис.1. Шлифы образцов для исследования микро-структуры: № 1 – без дефекта, № 2 – с дефектом

Fig.1. Sections of specimens for studying the micro-structure: No. 1 – without a defect, No. 2 – with a defect

Таблица 1. Химический состав образцов хромистого чугуна марки ЧХ28

Table 1. Chemical composition of ChKh28 chromium cast iron samples

Образец	Содержание элементов, %					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
№ 1	1,637±0,01	0,890±0,01	0,746±0,10	0,0208±0,005	0,0220±0,002	27,791±0,44
№ 2	1,621±0,02	0,913±0,02	0,676±0,13	0,0214±0,005	0,0232±0,002	27,757±0,09
ЧХ28 ¹	0,5-1,6	0,5-1,5	≤1,0	≤0,10	≤0,08	25,0-30,0
	Ni	V	B	Al	Mo	Cu
№1	0,561±0,016	0,118±0,001	0,0004±0,00006	0,013±0,000	0,558±0,019	0,085±0,001
№2	0,567±0,01	0,118±0,005	0,0003±0,0005	0,011±0,0006	0,569±0,012	0,086±0,001
ЧХ28 ¹	–	–	–	–	–	–

¹ ГОСТ 7769–82 «Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки».

Структурные исследования образцов проводились с помощью оптического металлографического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m», оснащённого программно-аппаратным комплексом «Thixomet PRO» по разработанным методикам [2-6].

Результаты и обсуждения

На рис.2 приведена макроструктура образцов. Исследуемая микроструктура изделия – равномерная, представлена игольчатыми дендритами, имеющими преимущественно оси первого порядка. Дендритное строение оформлено слабо. Причиной этого является то, что деталь прошла отжиг, приведший к гомогенизации

структурно-фазового состояния и частичному растворению дендритов. Дефекты отливки в виде неметаллических включений и пор в образце № 1 отсутствуют (рис.2а). В микроструктуре образца № 2 (рис.2б) присутствует усадочная пора, обусловленная усадкой металла при его кристаллизации из жидкого состояния. Причины образования данной усадочной поры – высокий коэффициент усадки данного сплава, сопряженный вероятно с неправильным выбором места установки питателя и/или прибыли и, возможно, недостаточным объемом прибыли. Исключая данную усадочную раковину, неметаллические включения и газовые поры в теле образца отсутствуют.

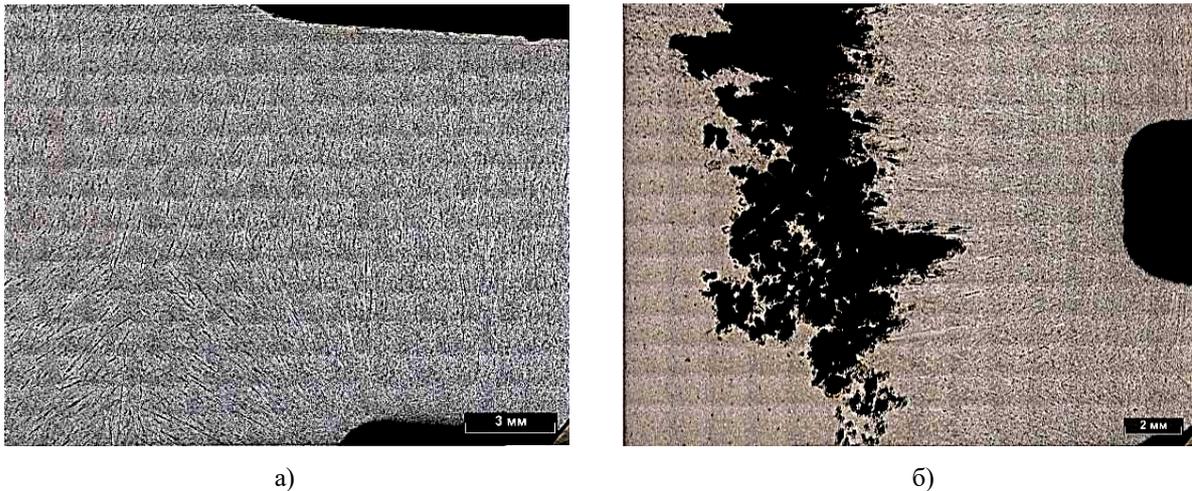


Рис.2. Панорамная микроструктура: а) образца №1, б) образца №2

Fig.2. Panoramic microstructure: a) sample No. 1, b) sample No. 2

Исследования структурно-фазового состояния образцов в поляризованном свете (рис.3) указывают на равномерность элементного и химического состава по сечению фаз. Очевидно, что структура материала представляет собой механическую смесь первичных карбидов хрома и твердого раствора хрома и углерода в железе, имеющего форму бесструк-

турного мартенсита, который в свою очередь обладает высокой твердостью и износостойкостью. Однако такой материал не обладает высокой износостойкостью при высоких температурах, что ограничивает его применение в высокотемпературных условиях. Выделения структурно-свободного графита отсутствуют.

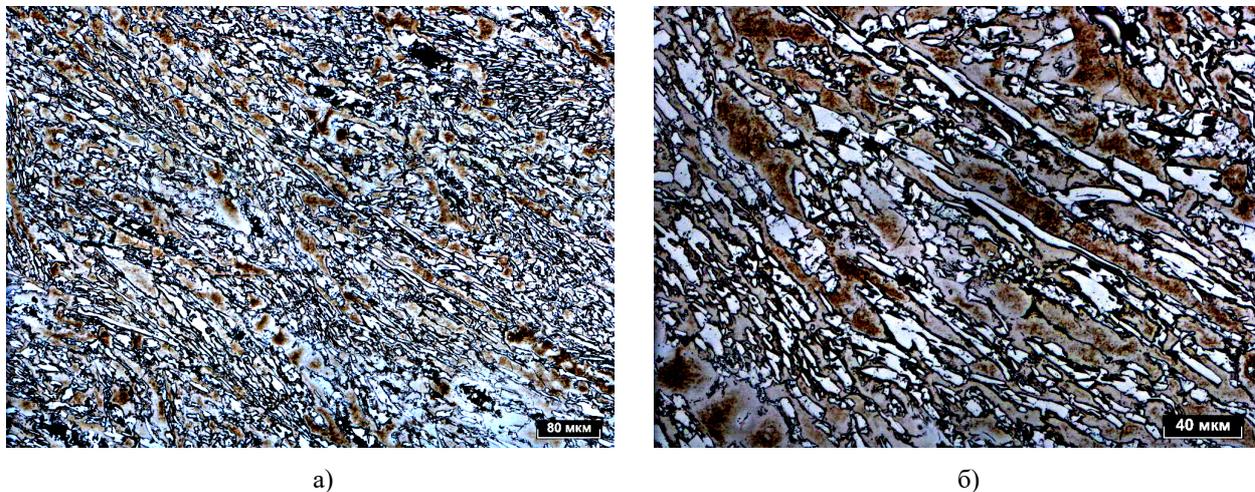


Рис.3. Структурно-фазовое состояние в поляризованном свете: а) образец № 1, б) образец № 2

Fig.3. Structural-phase state in polarized light: a) sample No. 1, b) sample No. 2

Согласно результатам микроструктурного анализа по ранее разработанной методике [6], наиболее представительной фазой карбидов хрома в данном образце является карбид с брутто-формулой Cr_7C_3 , (светлые области на рис.3), а металлическая матрица (темные области на рис.3), окружающая эти карбиды – преимущественно твердый раствор хрома в железе, дополнительно легированный никелем,

молибденом и ванадием, имеющий фазовое состояние бесструктурного мартенсита.

Необходимо отметить, что в областях формирования рельефа в виде гребней (рис.3б) в результате более быстрого протекания процесса кристаллизации сформировалась более дисперсная смесь, отличающаяся повышенными показателями твердости.

Заключение

В ходе проведения реинжиниринга определен вид материала исследуемой детали, химический состав которой соответствует высокохромистому чугуноу марки ЧХ28, дополнительно легированного молибденом, ванадием и никелем. Зарубежным аналогом данного материала может служить сталь марки DIN 1695-81: G-260Cr27.

Измерение твердости образцов показало, что их массивные части имеют твердость 531 ± 20 НВ, тогда как твердость в районе рельефных формирований соответствует значениям 664 ± 35 НВ.

Исходя из результатов микроструктурного и дюрOMETрического анализов, очевидно, что данный материал подвергался операции закалки, вероятно с нагрева в интервале температур $950-1050$ °С и выдержке при этих температурах в течение времени не менее 2 ч, с последующим охлаждением на воздухе до $160-200$ °С и отпуском при 200 °С в течение времени не менее 2 ч, о чем свидетельствует твердость образцов на уровне 53-64 HRC и высокая степень равновесности структурно-фазового состояния и гомогенности фаз [7-9].

Полученные результаты исследований представляют значительный научно-технический интерес для создания импортозамещающих технологий производства деталей горнодобывающего рудо- и лесоперерабатывающего оборудования. В настоящее время результаты исследования находятся в процессе внедрения на одном из предприятий Алтайского края.

Материалы, представленные в данной статье, докладывались на XXII Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производства» (11-13 августа 2023 г., г. Барнаул).

Список литературы

1. Импортзамещение: стратегии, перспективы, возможности: [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://www.vnedra.ru>. Дата обращения: 24.07.2023.
2. ASM International 1991, ASM Handbook: Heat Treatment, Vol. 4, American Society for Metals Park, Ohio. 2173 p.
3. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Черных Е.В. Выявление фазо-

вого состава боридных покрытий методами цветного травления // Ползуновский альманах. 2020. № 3. С. 19–23.

4. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Гурьев А.М., Романенко В.В. Фазовый анализ боридных комплексных диффузионных слоев на углеродистых сталях при помощи цветного травления // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17, № 1. С. 74–77.

5. Guriev A.M., Mei S.Q., Guriev M.A., Chernykh E.V., Ivanov S.G. Investigation of the microstructure of diffusion coatings of carbon steel obtained by simultaneous diffusion saturation with boron, chromium and titanium // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012077.

6. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы // Ползуновский вестник. 2020. № 3. С. 102–105.

7. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Особенности формирования диффузионного слоя при термоциклическом борировании углеродистой стали // В сб. тезисов докладов 5-ой Международной школы-семинара «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах». 2000. С. 149–150.

8. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П., Лыгденов Б.Д., Черных Е.В. Циклическое тепловое воздействие при термической и химико-термической обработке инструментальных сталей // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2005. Т. 2, № 3. С. 37–45.

9. Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Деев В.Б. Технология упрочнения стальных изделий в процессе литья // Литейщик России. 2013. № 6. С. 36–38.

Информация об авторах

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент Алтайского государственного технического огуниверситета им. И.И. Ползунова.

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, заведующий лабораторией микроскопии Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Е. В. Черных – кандидат физико-математических наук, доцент Алтайского

государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

В. В. Романенко – кандидат физико-математических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, профессор Уханьского текстильного университета.

References

1. Import substitution: strategies, prospects, possibly: [Electronic resource] – Access mode <https://www.vnedra.ru>. Date of the application: 24.07.2023. (In Russ.).

2. (1991) ASM International 1991, ASM Handbook: Heat Treatment, Vol. 4, American Society for Metals Park, Ohio. P. 2173.

3. Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Kosheleva, E. A. & Chernykh, E. V. (2020). Vyyavleniye fazovogo sostava boridnykh pokrytiy metodami tsvetnogo travleniya. *Polzunovskiy al'manakh*, 3, 19–23. (In Russ.). (In Russ.).

4. Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Gur'yev, A. M. & Romanenko, V. V. (2020). Fazovyy analiz boridnykh kompleksnykh diffuzionnykh slojev na uglerodistykh stalyakh pri pomoshchi tsvetnogo travleniya. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(17), 74–77. (In Russ.). (In Russ.).

5. Guriev, A. M., Mei, S. Q., Guriev, M. A., Chernykh, E. V. & Ivanov, S. G. (2019). Investigation of the microstructure of diffusion coatings of carbon steel obtained by simultaneous diffusion saturation with boron, chromium and titanium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012077.

6. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Zemlyakov, S. A., & Gur'yev, M. A. (2020). Metodika probopodgotovki obraztsov vysokolegированных

staley dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoy fazy. *Polzunovskiy vestnik*, 3, 102–105. (In Russ.).

7. Gur'yev, A. M., Kozlov, E. V., Ignatenko, L. N. & Popova, N. A. (2000). Osobennosti formirovaniya diffuzionnogo sloya pri termotsiklicheskom borirovaniy uglerodistoy stali. *V sb. tezisov dokladov 5-oy Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Evolyutsiya defektnykh struktur v kondensirovannykh sredakh»*. P. 149–150. (In Russ.).

8. Gur'yev, A. M., Voroshnin, L. G., Kharayev, Yu. P., Lygdenov, B. D. & Chernykh, E. V. (2005). Tsiklicheskiye teplovoye vozdeystviye pri termicheskoy i khimiko-termicheskoy obrabotke instrumental'nykh staley. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(3), 37–45. (In Russ.).

9. Gur'yev, M. A., Fil'chakov, D. S., Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M. & Deev, V. B. (2013). Tekhnologiya uprochneniya stal'nykh izdeliy v protsesse lit'ya. *Liteyshchik Rossii*, (6), 36–38. (In Russ.).

Information about the authors

M. A. Guryev – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

S. G. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Associate Professor, Head of the Laboratory of Microscopy, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

E. V. Chernykh – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

V. V. Romanenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

A. M. Guryev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department, I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 17.07.2023.

The article was received by the editorial board on 21 June 23; approved after reviewing 03 July 23; accepted for publication 17 July 23.