



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки).
УДК 620.1:669.018.95

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.034



ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БРИКЕТОВ ДЛЯ ФРИКЦИОННЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ И ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ТЯЖЕЛОЙ ТЕХНИКИ

Сергей Анатольевич Гаврилов¹, Денис Александрович Габец²,
Михаил Алексеевич Гурьев³, Сергей Геннадьевич Иванов⁴

^{1, 3, 4} Алтайский государственный технический университет, Россия, г. Барнаул

² ООО «Композит-инжиниринг», Россия, г. Барнаул

^{3, 4} Уханьский текстильный университет, г. Ухань, КНР

³ Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. China

¹ serggavrilov873@gmail.com

² ke-altai@mail.ru,

³ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-17872>

⁴ serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

Аннотация. Основные требования, предъявляемые к фрикционным пластинам и тормозным накладкам тяжелой техники - устойчивость к ударным нагрузкам и термоциклам в интервале температур от температуры окружающей среды до 850...870 °С, стабильность коэффициента трения, отсутствие схватывания с материалом тормозных дисков, изготавливаемых из стали либо чугуна, а также максимально возможная удельная энергоемкость материалов тормозных колодок. В настоящей работе проведены металлографические исследования с применением оптической микроскопии и установлено, что неудовлетворительное качество металлокерамического покрытия фрикционной пластины обусловлено локализацией сульфидной эвтектики на границе «керамика-подложка», а также наличием оксидных пленок на поверхности частиц порошков-прекурсоров, что в свою очередь приводит к формированию пористой границы «керамика-подложка». Проведен металлографический анализ влияния различных микродобавок в порошковый прекурсор для формирования металлокомпозитных пластин, таких как медный, никелевый и железные порошки различных фракций. Установлено, что фракционный состав добавляемых порошков в большей степени определяет структурно-фазовое состояние, а также адгезионную прочность границы «керамика-подложка».

Ключевые слова: металлокомпозиты, фрикционные пластины, энергопоглощающие аппараты, тормозные колодки.

Благодарности: исследования выполнены на базе инжинирингового центра «ХимБио-Маш АлтГТУ».

Для цитирования. Влияние химического состава на структурно-фазовое состояние и адгезионную прочность металлокомпозитных брикетов для фрикционных поглощающих аппаратов и тормозных колодок тяжелой техники / С. А. Гаврилов [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 264–269. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.034. EDN: <https://elibrary.ru/DJTPJW>.

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON STRUCTURAL-PHASE STATE AND ADHESIVE STRENGTH OF METAL-COMPOSITE BRIQUETTES FOR FRICTION DRAFT GEARS AND BRAKE PADS OF HEAVY EQUIPMENT

Sergei A. Gavrilov ¹, Denis A. Gabets ², Michael A. Guryev ³, Sergei G. Ivanov ⁴

¹ Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

² Composite-engineering LLC, Barnaul, Russia

³ Wuhan Textile University, Wuhan, China,

⁴ Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. China

^{1, 3, 4} serggavrilov873@gmail.com

² ke-altai@mail.ru

^{3, 4} gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-17872>

³ serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

Abstract. *The main requirements for friction plates and brake linings of heavy equipment are resistance to shock loads and thermal cycles in the temperature range from ambient temperature to 850...870 °C, stability of the friction coefficient, lack of adhesion to the material of brake discs made of steel or cast iron, as well as the maximum possible specific energy intensity of brake pad materials. In this work, metallographic studies were carried out using optical microscopy and it was established that the unsatisfactory quality of the metal-ceramic coating of the friction plate is due to the localization of sulfide eutectic at the ceramic-substrate interface, as well as the presence of oxide films on the surface of particles of precursor powders, which in turn leads to the formation porous ceramic-substrate interface. A metallographic analysis of the influence of various microadditives in the powder precursor for the formation of metal composite plates, such as copper, nickel and iron powders of various fractions, was carried out. It has been established that the fractional composition of the added powders largely determines the structural-phase state, as well as the adhesive strength of the ceramic-substrate interface.*

Keywords: metal composites, friction plates, energy-absorbing devices, brake pads.

Acknowledgment: The research was carried out on the basis of the engineering center "ChemBioMash ASTU".

For citation: Gavrilov, S. A., Gabets, D. A., Guryev, M. A. & Ivanov, S. G. (2023). Influence of chemical composition on structural-phase state and adhesive strength of metal-composite briquettes for friction draft gears and brake pads of heavy equipment. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 264-269. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.034. EDN: <https://elibrary.ru/DJTJPJW>.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития машиностроения остро стоит вопрос надежности и долговечности узлов, работающих в сложных режимах ударно-фрикционного износа. Детали тормозных систем, рабочие части горнодобывающих машин и детали железнодорожного подвижного состава, изготовленные из металлокомпозитных сплавов на основе порошковых материалов, должны обеспечивать высокую надежность как при воздействии ударных нагрузок, так и обеспечивать высокую износостойкость и прочность в различном диапазоне нагрузок и температур. При этом они должны удовлетворять строгим требованиям стандартов, обеспечивая необходимую твердость и механические свойства материалов в

интервале температур от –50 до 850 °С. При этом, как известно, высокая прочность сопровождается повышением хрупкости материала, следовательно в процессе износа наряду со схватыванием трущихся поверхностей происходит хрупкое разрушение и выкрашивание частиц с поверхностей трения. Одним из наиболее ответственных изделий в паре трения является энергопоглощающий фрикционный металлокомпозитный брикет тормозных систем и энергопоглощающих устройств горнодобывающих машин и железнодорожного подвижного состава.

МЕТОДЫ

Подготовку для исследования методами оптической, электронной и сканирующей мик-

роскопии осуществляли с помощью прецизионного отрезного станка MICRACUT–201. Далее образцы для оптической микроскопии запрессовывали в бакелитовый компаунд с помощью автоматического программируемого пресса METAPRESS, после чего осуществляли шлифовку на автоматическом шлифовально-полировальном станке DIGIPREP.

Шлифовку производили на алмазных шлифовальных кругах MAGNETO I 54 grid, далее – на дисках MAGNETO II с зернистостью 18 grid. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовали воду. Полировку осуществляли на полировочных кругах с периодической подачей алмазной суспензии зернистостью 9, 6, 3, 1 мкм. На окончательном этапе производили суперфинишную полировку кислотной суспензией оксида кремния зернистостью 0,05 мкм.

Травление приготовленных шлифов осуществляли следующими реактивами:

- 5 % спиртовой раствор пикриновой кислоты («Пикраль») – выявление общей микроструктуры, идентификация фазового состава материала.

- 5 % спиртовой раствор азотной кислоты («Ниталь») – выявление общей микроструктуры, идентификация фазового состава материала.

- Реактив Бераха № 3 («Сульфаминия»).

Микроскопические исследования проводили на оптическом микроскопе «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» и растровом электронном микроскопе (РЭМ) с ЭДС системой химического анализа Tescan MIRA 3LMU.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Специфика металлокомпозитного брикета заключается в том, что он работает в режиме ударно-фрикционного трения, характеризующемся малой длительностью процесса торможения, сопряженным с высоким удельным поверхностным давлением зачастую при высоких температурах контактных поверхностей пары трения, достигающих значений 800–900 °С. Данные условия работы предъявляют повышенные требования к поверхностной и объемной твердости, стабильности фрикционных характеристик, металлокомпозитного брикета, а также к прочности адгезии самого металлокомпозитного брикета к стальной либо чугунной подложке.

Главным рабочим элементом в тяжело-нагруженном фрикционном узле служит фрикционная пластина, которая состоит из металлической пластины и припеченного к ней металлокомпозитного брикета. В настоящее время самым применяемым фрикционным материалом является композиционный материал

на основе металлокерамики. Процентный состав данного материала, как правило, подобран таким образом, чтобы максимально удовлетворить основным показателям: коэффициенту трения, стабильности коэффициента трения и износостойкости поверхностей.

Основную долю энергии, выделяющейся при торможении, поглощает фрикционный узел, поглощение энергии происходит вследствие работы сил трения в движении стального либо чугунного контр-тела относительно фрикционной металлокомпозитной пластины. При этом взаимодействии происходит выделение большого количества тепла. Данный режим работы характеризуется малой длительностью процесса (обычно от 0,03 до 10 с) с высоким удельным давлением (до 100 МПа), при этом температуры на поверхности пар трения достигают 870 °С [1–3].

Главные требования, предъявляемые к металлокерамической фрикционной пластине тормозных устройств, работающих в тяжело-нагруженных условиях – устойчивость к ударным нагрузкам, устойчивость к термоциклам в интервале температур от температуры окружающей среды (до минус 50 °С) до 850–870 °С, высокая стойкость к касательным напряжениям, стабильность коэффициента трения в рабочем интервале температур, отсутствие схватывания с материалом сопрягаемого стального либо чугунного контр-тела, высокий ресурс работы – до 10 000 циклов нагружения. Высокая энергоемкость материала керамики.

Наиболее частыми причинами выхода из строя металлокомпозитных тормозных накладок и колодок являются в большинстве случаев отслаивание металлокомпозитного брикета от стальной либо чугунной основы, а также интенсивный износ как самого металлокомпозита, так и сопряженной с ним контрповерхности, что отрицательно влияет на работоспособность фрикционного энергопоглощающего аппарата. Исходя из этого, повышение прочности и износостойкости металлокомпозитного брикета необходимо не только с точки зрения увеличения срока службы детали, но и для нормального функционирования фрикционного энергопоглощающего аппарата в целом [1–3]. При этом традиционные методы поверхностного упрочнения материалов, такие как напыление наплавка и поверхностная химико-термическая обработка в данном случае неприемлемы ввиду малой толщины формирующихся слоев, а также их чрезмерной поверхностной твердости [4–6], приводящей к сильному износу поверхности сопряженного контр-тела.

Нанесение дополнительного рельефа на стальном основании существенно повышает

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОКОМПЗИТНЫХ БРИКЕТОВ ДЛЯ ФРИКЦИОННЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ И ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ТЯЖЕЛОЙ ТЕХНИКИ

сцепление материалов, наблюдаются частицы металлокомпозита на стальном основании после проведения испытаний на изгиб. Возникающие в процессе изготовления металлокомпозитных брикетов термические напряжения приводили к появлению трещин на границе контакта металлокомпозита со стальным основанием.

Применение нового химического состава, заключающегося в микродобавках (0,7 масс. %) порошков как никеля, так и меди либо железа с фракционным составом 3–5, 10–14 и 20–25 мкм позволило существенно повысить адгезионные свойства спекаемых материалов как самих по себе, так и со стальными и чугуными подложками (рис. 1).

При этом выяснилось, что в большей степени влияние на адгезионную прочность металлокомпозита оказывает прежде всего фракция добавляемого порошка.

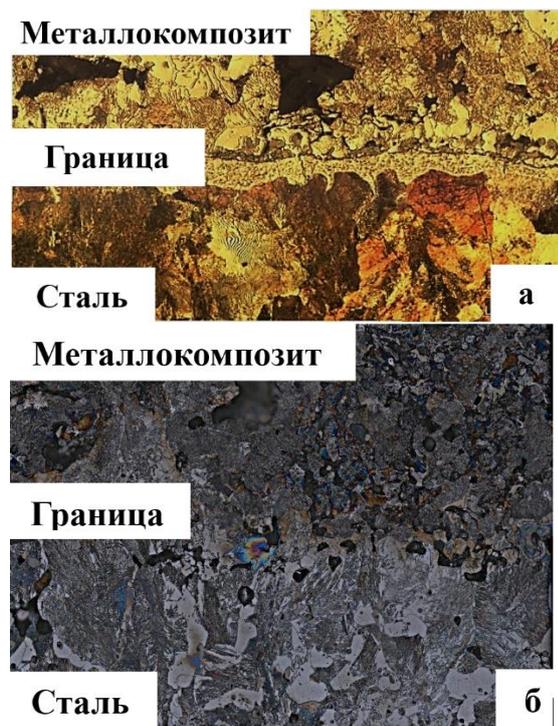


Рисунок 1 – Микроструктура припеченного металлокерамического брикета и стального основания без добавок микропорошков (а) и с добавками микропорошков (б)

Figure 1 – Microstructure of a baked metal-ceramic briquette and a steel base without additives of micro-powders (a) and with additives of micro-powders (b)

Испытания, проведенные на металлокомпозитных брикетах, изготовленных по оптими-

зированной технологии с добавлением мелкодисперсных порошков железа фракции 10–14 мкм, показали, что разрушение металлокомпозитного брикета в этом случае происходит не по границе раздела между металлокерамикой и металлической подложкой, а по металлокерамической составляющей металлокомпозита (рис. 2 и 3 и табл. 1).



Рисунок 2 – Оптическое изображение области разрушения металлокомпозита после испытаний на адгезию металлокерамической составляющей металлокомпозитного брикета методом трехточечного изгиба

Figure 2 – Optical image of the fracture region of a metal composite after adhesion tests of a metal-ceramic component of a metal composite briquette using a three-point bending method

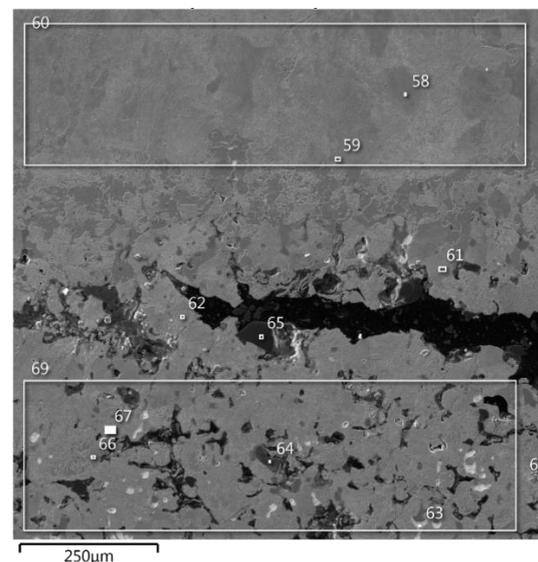


Рисунок 3 – Изображение области разрушения металлокомпозита после испытаний на адгезию металлокерамической составляющей металлокомпозитного брикета методом трехточечного изгиба, полученное на РЭМ

Figure 3 is an image of the fracture region of the metal composite after adhesion tests of the metal-ceramic component of the metal composite briquette by the three-point bending method, obtained on SEM

Как видно из таблицы 1, на границе раздела наблюдается диффузное взаимопроникновение металлокерамической составляющей и металлической матрицы протяженностью области взаимодействия 280–420 мкм. А отслоение металлокерамики от металлической подложки происходит по верхней границе области диффузного взаимопроникновения.

Для выявления характера износа фрикционного композиционного материала применяемого в узле трения был поставлен эксперимент, заключающийся в том, что в тело брикета фрикционного композиционного материала внедрялся вращающийся инструмент, представляющий собой форму цилиндра с гладкой поверхностью и не имеющий каких-либо режущих кромок, имитирующий ударно-фрикционный характер нагружения пары трения «металлокомпозитный брикет – контр-тело».

Инструмент изготавливается из твердосплавного материала ВК8 для имитации наиболее жесткого режима нагружения металлокерамического композита. Под действием вертикальной подачи прикладывалась осевая сила, имитирующая силу прижатия контр-тела к пластине.

Вращательное движение инструмента имитировало трение скольжения. Путем изменения скорости вращения шпинделя, достигалась различная температура в зоне контакта и имитировались различные температурно-силовые условия работы металлокомпозита (рис. 4).

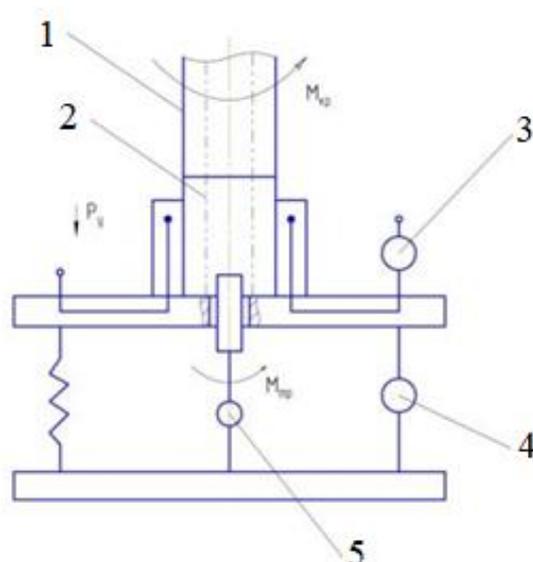


Рисунок 4 – Схема измерительного стенда: 1– инструмент-имитатор контр-тела, 2– Металлокомпозитный брикет, 3– датчик термодпары, 4– динамометр усилия контакта, 5– динамометр момента трения

Figure 4 – Diagram of the measuring stand: 1– counterbody simulator tool, 2– Metal-composite briquette, 3– thermocouple sensor, 4– contact force dynamometer, 5– friction torque dynamometer

Таблица 1. Химический состав разрушенного образца металлокомпозита после механических испытаний

Table 1 - Chemical composition of the destroyed metal composite sample after mechanical tests

Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Mo	Sn	Pb
Спектр 58				0,32				0,59	99,99			
Спектр 59	4,47		0,46	0,68	0,12	0,13		0,6	95,76		0,52	
Спектр 60	3,22		0,22	0,35	0,12		0,15	0,64	98,84		0,36	
Спектр 61	2,61		0,18	15,21	0,24				80,91		3,32	
Спектр 62	3,47		0,24	33,32	0,28				62,95		3,71	
Спектр 63	12,34								1,92		14,43	86,62
Спектр 64	32,63	7,24	5,2	14,5	14,18	7,43	0,76	0,95	23,71			1,34
Спектр 65	57,37			49,28					0,65			
Спектр 66	2,72								98,16	1,09	3,48	
Спектр 67	4,68			17,62	0,61				75,58		4,27	
Спектр 68	34,77			0,14	0,13				58,84		0,55	
Спектр 69	18,38		0,57	21,55	1,21	0,21			50,47	1,79	4,17	2,97

Проведенные эксперименты по установлению относительной износостойкости металлокомпозита свидетельствуют о том, что износ брикета происходит путем выкрашивания частиц с контактирующей поверхности металлокерамики. Это объясняется тем, что брикет получен путем спекания композиции материалов, при этом матрица, состоящая из железа, не является монолитной связкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований, установлено, что наиболее оптимальными показателями с точки зрения экономической целесообразности и получаемых свойств является порошок железа с фракцией 10–14 мкм, так как порошки меньшей фракции имеют существенно большую цену, а порошки

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОКОМПЗИТНЫХ БРИКЕТОВ ДЛЯ ФРИКЦИОННЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ И ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ТЯЖЕЛОЙ ТЕХНИКИ

никеля и меди соизмеримых с железом фракций имеют в разы большую стоимость при неочевидном выигрыше в приросте характеристик металлокомпозитного брикета. Таким образом, применение нового химического состава и усовершенствованной технологии изготовления позволило существенно повысить адгезионные свойства спекаемых материалов, при этом проникновение глубина проникновения активных частиц металлокомпозитного сплава составляет около 1 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кеглин Б.Г., Болдырев А.П., Ионов В.В. Совершенствование металлокерамического сплава для амортизаторов удара железнодорожного подвижного состава. Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. №2 (34), с. 26- 32.
2. Gabets A.V., Markov A.M., Gabets D.A., Chertovskikh E.O. Upravlenie iznosostoičnost'yu otvetstvennykh uzlov i detalei podvizhnogo sostava [Wear-Resistance Properties Control of Units and Details of the Rolling Stock]. Barnaul, Polzunov Alt. State Techn. Univ. Publ, 2016, 213 p. ISBN 978-5-7568-1188-9.
3. Габец Д.А., Марков А.М., Габец А.В., Гурьев А.М., Гурьев М.А., Иванов С.Г., Иванов А.В. Исследование работы металлокомпозитных брикетов во фрикционных узлах поглощающих аппаратов. Металлург. 2020. № 3. С. 86-91.
4. Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М. Повышение прочности диффузионных карборидных покрытий термоциклированием в процессе их получения. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2007" (НиМ-2007). 2007. С. 110-112.
5. 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.
6. Гурьев М.А., Иванов А.Г., Иванов С.Г., Гурьев А.М. Упрочнение литых сталей поверхностным легированием из борсодержащих обмазок. Успехи современного естествознания. 2010. № 3. С. 123.

Информация об авторах

С. А. Гаверилов – аспирант АлтГТУ.
Д. А. Габец – директор ООО «Композит-инжиниринг».

М. А. Гурьев – к. т. н., доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» АлтГТУ, профессор Уханьского текстильного университета (КНР), инженер-исследователь Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. (КНР).

С. Г. Иванов – д. т. н., ведущий научный сотрудник Научного управления, и.о. заведующего кафедрой «Машиностроительные технологии и оборудование», профессор кафедры «Современные специальные материалы», директор лаборатории микроскопических исследований ИЦ «ХимБиоМаш» АлтГТУ, профессор Уханьского текстильного университета (КНР).

Information about the authors

S. A. Gavrilov – Postgraduate student at Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.

D. A. Gabets – Director of Kompozit-engineering LLC.

M. A. Guryev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Polzunov Altai State Technical University, professor at Wuhan Textile University (PRC), research engineer at Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. (PRC).

S. G. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, leading researcher of the Scientific Directorate, acting. Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Professor of the Department of Modern Special Materials, Director of the Microscopic Research Laboratory of the ChemBioMash Research Center of the Polzunov Altai State Technical University, professor at Wuhan Textile University (PRC).

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

*Статья поступила в редакцию 26 марта 2023; одобрена после рецензирования 18 сентября 2023; принята к публикации 20 ноября 2023.
The article was received by the editorial board on 26 Mar 2023; approved after editing on 18 Sep 2023; accepted for publication on 20 Nov 2023.*