

УДК 620.193.2, 621.793

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-87-96>

Научная статья

Research article



Высокоэнтропийные покрытия Fe–Co–Cr–Ni–(Cu) с повышенной коррозионной и трибокоррозионной стойкостью, полученные электроискровым легированием в вакууме

М.Н. Фатыхова, К.А. Купцов, А.Н. Шейко, А.Р. Гизатуллина,
П.А. Логинов, Д.В. Штанский

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

✉ Мария Николаевна Фатыхова (mariya.antonyuck@ya.ru)

Аннотация: Высокоэнтропийные покрытия представляют большой интерес для защиты стальных изделий, используемых в прибрежной и морской инфраструктуре, от коррозионного и трибокоррозионного воздействия. В данной работе исследованы свойства средне- и высокоэнтропийных покрытий Fe–Co–Cr–Ni–(Cu), полученных методом электроискрового легирования в вакууме. Показано, что покрытия толщиной до 30 мкм с различным содержанием меди характеризуются структурой однофазного твердого раствора с ГЦК-решеткой и плотной, однородной морфологией. Выявлено, что введение 14 ат.% Cu положительно влияет на коррозионную стойкость, смещая потенциал коррозии до 100 мВ. В условиях трения в искусственной морской воде добавление меди также улучшает трибокоррозионные свойства, повышая потенциал коррозии во время трения до –165 мВ. Это обусловлено гальваническим осаждением растворенной меди на изношенные части покрытия, что также положительно сказывается на коэффициенте трения, снижая его с 0,37 до 0,26. Полученные покрытия Fe–Co–Cr–Ni–(Cu) обладают высокой износостойкостью на уровне $(5,6 \div 9,6) \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Результаты исследования подтверждают перспективность их использования в условиях трения и коррозии.

Ключевые слова: электроискровое легирование, покрытия, морская вода, электрохимия, износостойкость, коррозионная стойкость, трибокоррозия.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10104-П.

Для цитирования: Фатыхова М.Н., Купцов К.А., Шейко А.Н., Гизатуллина А.Р., Логинов П.А., Штанский Д.В. Высокоэнтропийные покрытия Fe–Co–Cr–Ni–(Cu) с повышенной коррозионной и трибокоррозионной стойкостью, полученные электроискровым легированием в вакууме. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(3):87–96.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-87-96>

High-entropy Fe–Co–Cr–Ni–(Cu) coatings with enhanced corrosion and tribocorrosion resistance obtained by vacuum electrospark deposition

M.N. Fatykhova, K.A. Kuptsov, A.N. Sheveyko, A.R. Gizatullina, P.A. Loginov, D.V. Shtansky

National University of Science and Technology “MISIS”
4 Bld. 1 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

✉ Mariya N. Fatykhova (mariya.antonyuck@ya.ru)

Abstract: High-entropy coatings are highly promising for protecting steel parts in coastal and marine infrastructure from corrosion and tribocorrosion. This study examines the properties of medium- and high-entropy Fe–Co–Cr–Ni–(Cu) coatings produced by vacuum

electrospark deposition. The coatings, with thicknesses of up to 30 μm and varying copper content, exhibit a single-phase solid solution structure with an FCC lattice and a dense, homogeneous morphology. The addition of 14 at.% Cu was found to enhance corrosion resistance, shifting the corrosion potential to 100 mV. In friction conditions within artificial seawater, the inclusion of copper also improved tribocorrosion properties, raising the corrosion potential during friction to -165 mV. This improvement is attributed to the galvanic deposition of dissolved copper on the worn areas of the coating, which also reduces the friction coefficient from 0.37 to 0.26. The Fe–Co–Cr–Ni–(Cu) coatings demonstrate high wear resistance, ranging from 5.6 to $9.6 \cdot 10^{-6}$ $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. The findings confirm the potential of these coatings for applications in environments subject to both friction and corrosion.

Keywords: electrospark deposition, coatings, seawater, electrochemistry, wear resistance, corrosion resistance, tribocorrosion.

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 20-79-10104-П

For citation: Fatykhova M.N., Kuptsov K.A., Sheveyko A.N., Gizatullina A.R., Loginov P.A., Shtansky D.V. High-entropy Fe–Co–Cr–Ni–(Cu) coatings with enhanced corrosion and tribocorrosion resistance obtained by vacuum electrospark deposition. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;30(3):87–96. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-87-96>

Введение

В контексте активного использования морских ресурсов вопросы качества и продолжительности службы инженерного оборудования становятся все более актуальными [1; 2]. Морская вода, являясь агрессивной средой, способствует развитию коррозии металлических деталей в процессе их эксплуатации [3; 4]. Большинство подвижных элементов морского и прибрежного оборудования, включая насосы, подшипники, клапаны, гребные винты, шестерни и т.д., подвергаются синергетическому воздействию износа и коррозии в морской воде — процессу, известному как трибокоррозия. Это неизбежно ускоряет повреждение и деградацию механических узлов трения, сокращая время их эксплуатации [5–8]. Кроме того, детали, длительное время находящиеся в контакте с морской водой, подвержены биообрастанию — зарастанию поверхности микроорганизмами, которые вызывают микробиологическую коррозию (МБК) [9]. В результате сокращается срок службы и увеличивается энергопотребление инженерного оборудования [10].

Нержавеющие стали с повышенным содержанием хрома (до 18 мас.%) широко применяются для деталей морского оборудования из-за образования поверхностной оксидной пленки, состоящей из Cr_2O_3 , позволяющей снижать коррозионное воздействие на поверхность. Недавно был открыт новый тип материалов — высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), которые содержат пассивирующиеся элементы, такие как Cr, Ni, Mo и др., обладают лучшими коррозионными и трибокоррозионными характеристиками в агрессивных условиях (морская вода, кислоты) по сравнению с обычными сплавами [11; 12]. Известно, что медь оказывает значительное влияние на МБК и биообрастание, подавляя рост и размножение микроорганизмов, участвующих в этих процессах [13; 14]. Однако вве-

дение Cu в многокомпонентные покрытия на основе Fe–Co–Cr–Ni может привести к структурным неоднородностям, например образованию двухфазной структуры *fcc/bcc* или к сегрегации Cu, что приводит к формированию зон, богатых и обедненных медью, и, как следствие, к более интенсивной локальной коррозии [15].

Перспективным использованием коррозионно-стойких высокоэнтропийных сплавов является нанесение их в качестве покрытий [16]. С экономической точки зрения стоимость объемных ВЭС, полученных методом дуговой плавки или литья, выходит достаточно высокой, учитывая добавки дорогостоящих легирующих элементов. Однако нанесение покрытий позволяет решить эту проблему. На сегодняшний момент покрытия на основе ВЭС получают методами лазерной наплавки [17; 18], электроискрового осаждения [12; 19], магнетронного распыления [20] и т.д.

Электроискровое легирование (ЭИЛ) в вакууме является перспективным способом получения износ- и коррозионно-стойких покрытий на различных сталях [21], позволяющим наносить «толстые» покрытия (до 200 мкм) с высокой адгезионной прочностью благодаря процессу микросварки между материалом электрода и подложкой во время нанесения. Дополнительные преимущества ЭИЛ включают его простоту, возможность локальной обработки крупных деталей и легкую автоматизацию процесса.

С целью улучшения качества поверхности и повышения эффективности электроискрового легирования процесс реализуется в вакууме, что способствует увеличению смачиваемости поверхности расплавом [22]. Этот эффект связан с одновременным протеканием двух параллельных процессов — импульсного катодно-дугового испарения электрода, инициированного искровым

пробоем, и классического массопереноса материала электрода на подложку.

Целью данной работы являлась разработка защитных покрытий Fe–Co–Cr–Ni–Cu с различным содержанием меди методом вакуумного электроискрового легирования для обеспечения защиты стальных изделий от коррозионного и трибокоррозионного воздействий при эксплуатации в морской воде.

Материалы и методы исследований

Нанесение покрытий Fe–Co–Cr–Ni–Cu_x с различным содержанием меди осуществляли методом электроискрового легирования в вакууме [12]. В качестве подложек использовали диски диаметром 30 мм из стали 30X13. Электроды разных составов, ат.-%: Fe₂₅–Co₂₅–Cr₂₅–Ni₂₅, Fe₂₀–Co₂₀–Cr₂₀–Ni₂₀–Cu₂₀ и Fe_{17,5}–Co_{17,5}–Cr_{17,5}–Ni_{17,5}–Cu₃₀, были получены методами порошковой металлургии из элементных металлических порошков на прессе горячего прессования (ГП) DSP-515 SA («Dr. Fritsch», Германия) при температуре 950 °С, давлении 35 МПа и изобарической выдержке 3 мин [20].

В процессе нанесения покрытий давление в вакуумной камере поддерживали на уровне 20 Па, скорость вращения электрода составляла 1000 об/мин, шаг и скорость сканирования — соответственно 0,5 мм и 500 мм/мин. Для обеспечения высокой сплошности покрытий после каждого цикла обработки направление сканирования менялось на перпендикулярное.

Всю серию покрытий Fe–Co–Cr–Ni–Cu_x наносили с использованием электроискрового генератора Alier 303 metal (Молдова) при следующих технологических параметрах: амплитуда тока импульса 120 (± 20 %) А, частота импульсов 1600 (± 20 %) Гц и их длительность 40 (± 20 %) мкс. Время нанесения каждого покрытия составляло 15 мин.

Исследование морфологии, элементного и фазового составов покрытий осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе S-3400N («Hitachi», Япония) с энергодисперсионным спектрометром NORAN («Thermo Scientific», США), а также рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра D8 Advance («Bruker», Германия).

Исследование электрохимических свойств покрытий проводили в трехэлектродной ячейке с помощью потенциостата IPC Pro MF (Россия).

В качестве вспомогательного использовали платиновый электрод, а в качестве электрода сравнения — широко применяемый из-за своей простоты, надежности и повторяемости результатов Ag/AgCl-электрод. Перед проведением экспериментов поверхность покрытий покрывали токопроводящим лаком для исключения воздействия материала подложки на электрохимические параметры. Площадь рабочей поверхности составляла 1 см².

Стойкость покрытий к трибокоррозионному воздействию оценивали с помощью трибометра Tribometer («CSM Instruments», Швейцария), оснащенного специальной трехэлектродной ячейкой, позволяющей регистрировать электрохимический потенциал коррозии в процессе трибологических испытаний по схеме шарик–диск. Испытания проводили в искусственной морской воде при нагрузке 5 Н, дистанции 500 м и скорости скольжения 10 см/с. В качестве контртела использовали шарик из оксида алюминия (Al₂O₃) диаметром 6 мм и шероховатостью 0,8 мкм. Дорожки износа покрытий исследовали методом оптической профилометрии на профилометре WYKO NT1100 («Veeco», США) [21]. Расчет приведенного износа покрытий проводили по методике, описанной в работе [22].

Твердость покрытий измеряли методом микроиндентирования на их поверхности с помощью автоматического микротвердомера DuraScan 70 («EMCO-TEST Prüfmaschinen GmbH», Австрия) путем расчета среднего значения из 10 измерений. Нагрузка на вдавливание составляла 0,01 Н.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены СЭМ-изображения и соответствующие карты распределения элементов поверхности покрытий, полученных с использованием электродов Fe–Co–Cr–Ni–Cu_x (x = 0, 20, 30 ат.%), образцы которых далее обозначены как Cu0V, Cu2V и Cu3V соответственно. Все они обладают однородной морфологией без видимых трещин и сколов. Согласно картам распределения основные элементы Fe, Cr и Cu распределены равномерно. В табл. 1 приведен элементный состав покрытий. Видно, что содержание железа в них примерно одинаковое и составляет 39–43 ат.%, в образцах Cu2V и Cu3V содержится 14 и 19 ат.% меди соответственно, и с увеличением ее концентрации количество Cr, Ni и Co уменьшается с 18–21 до 12–16 ат.%.

На рис. 2 приведены СЭМ-изображения попе-

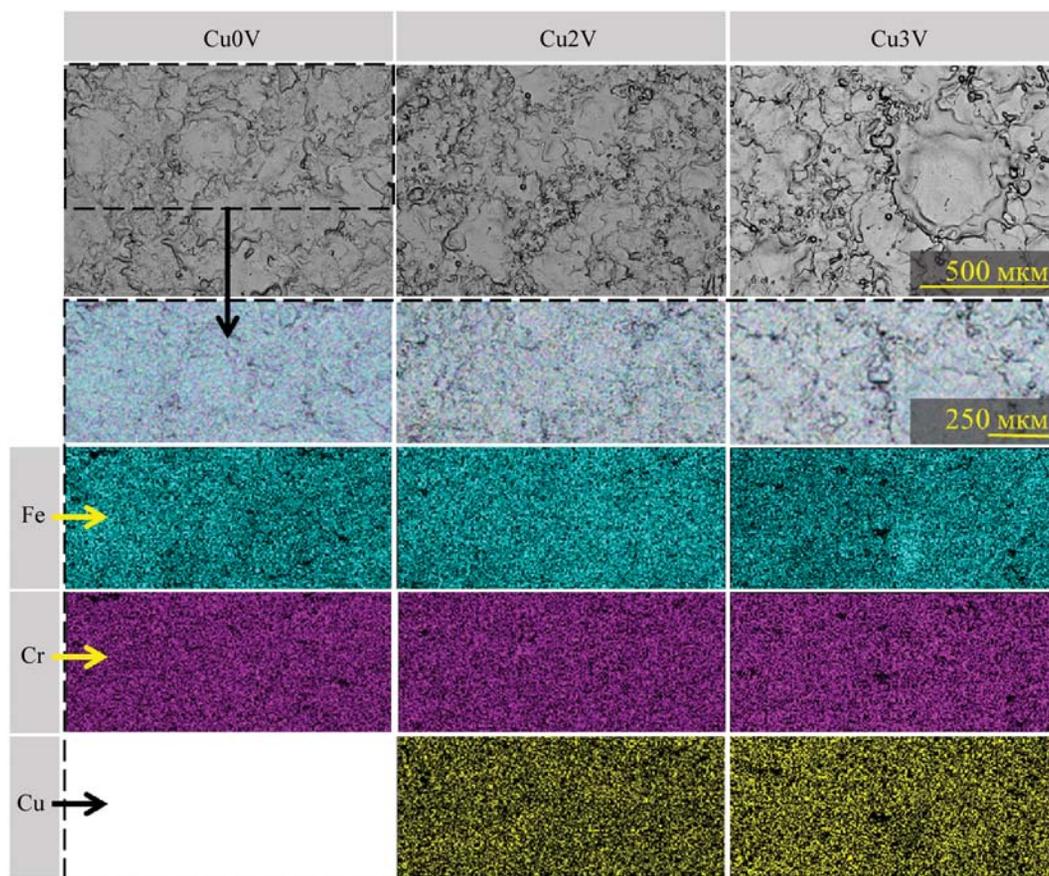


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности и карты распределения элементов на поверхности образцов покрытий Cu0V, Cu2V и Cu3V

Fig. 1. SEM images of the surface and element distribution maps on the surface of Cu0V, Cu2V, and Cu3V coatings

речных шлифов высокоэнтропийных покрытий Fe–Co–Cr–Ni–Cu_x. Все они обладают высокой сплошностью и бездефектной структурой (отсутствие трещин и пор). Распределение Cu по толщине покрытий равномерно с незначительным снижением от поверхности к подложке (рис. 2, б). С увеличением содержания меди в составе покрытий от 0 до 19 ат.% наблюдается уменьшение толщины покрытий с 30 до 21 мкм.

На рис. 3 показаны рентгенограммы покрытий Fe–Co–Cr–Ni–Cu_x. Все образцы имеют одно-

фазную структуру с ГЦК-решеткой на базе твердого раствора всех металлических элементов. Помимо этого, особенностью структуры покрытий является наличие сильной текстуры в направлении (200), связанной с направленной кристаллизацией при затвердевании расплава. С увеличением содержания Cu в составе покрытий наблюдается смещение ГЦК-пигов в сторону меньших углов, связанное с увеличением параметра решетки с 3,570 до 3,582 Å за счет встраивания большего количества меди в кубическую фазу (см. вставку на рис. 3). Отдельных фаз на основе меди не обнаружено, вероятно, вся медь растворилась в основной ГЦК-фазе. Оценка размера кристаллитов по методу Дебая–Шеррера выявила минимальное влияние меди на этот параметр. Так, введение 19 ат.% Cu привело к незначительному снижению размера кристаллитов: с 36 нм (Cu0V) до 34 нм (Cu3V).

Для оценки коррозионной стойкости покрытий были проведены электрохимические испытания в искусственной морской воде, результаты

Таблица 1. Элементный состав покрытий

Table 1. Elemental composition of coatings

Образец покрытия	Содержание, ат.%				
	Fe	Co	Cr	Ni	Cu
Cu0V	43	18	21	18	–
Cu2V	43	11	19	13	14
Cu3V	39	12	16	14	19

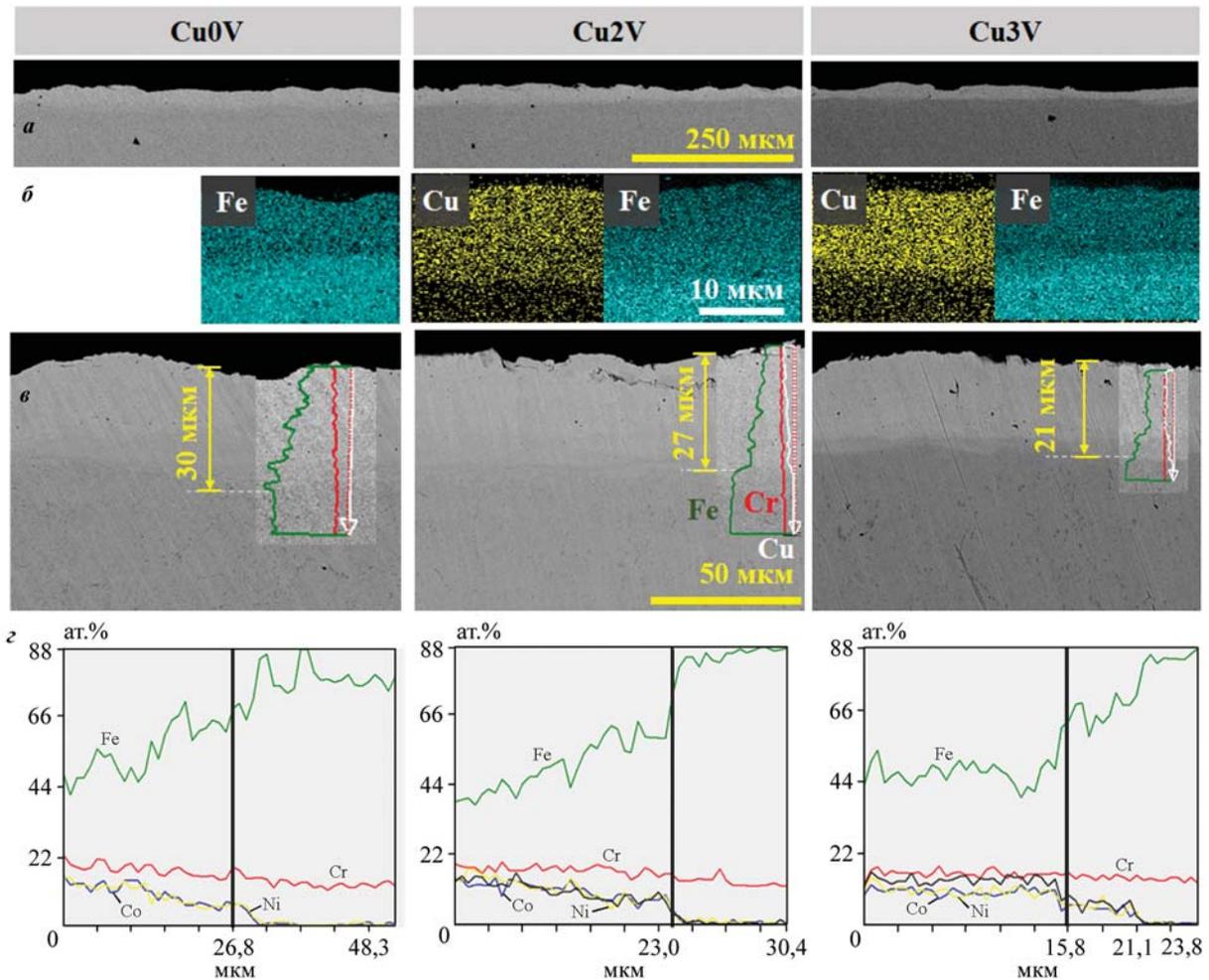


Рис. 2. СЭМ-изображения шлифов покрытий Cu0V, Cu2V и Cu3V (*a*, *в*), карты распределения Cu и Fe (*б*) и профили распределения элементов (*г*) по толщине покрытия

Fig. 2. SEM images of cross-sections of Cu0V, Cu2V, and Cu3V coatings (*a*, *в*), Cu and Fe distribution maps (*б*), and element distribution profiles (*г*) across the coating thickness

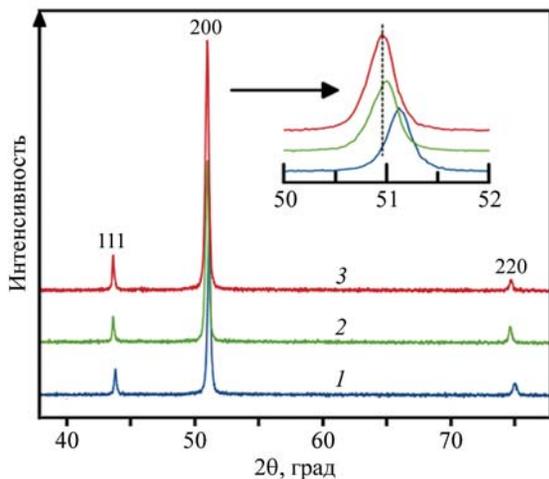


Рис. 3. Рентгенограммы покрытий Cu0V (*1*), Cu2V (*2*), Cu3V (*3*) и отдельно пика (200)

Fig. 3. XRD patterns of Cu0V (*1*), Cu2V (*2*), and Cu3V (*3*) coatings and the (200) peak at higher resolution

которых представлены на рис. 4. Коррозионный потенциал покрытия Fe–Co–Cr–Ni (обр. Cu0V) составил +20 мВ. Введение 14 ат.% Cu привело к его смещению в положительную сторону до +100 мВ, однако дальнейшее повышение концентрации меди до 19 ат.% вызвало резкое снижение этого показателя до –150 мВ. Интересно, что, несмотря на существенное влияние меди на потенциал коррозии, плотность тока коррозии (ПТК) покрытий практически не менялась и находилась в диапазоне 1–2 мкА/см².

Вероятно, при превышении определенной концентрации меди происходит ее накопление на поверхности по мере растворения железа и других компонентов. Это приводит к появлению отдельных медных частиц, являющихся катодами по отношению к окружающей поверхности. В этом случае появляются гальванические пары на по-

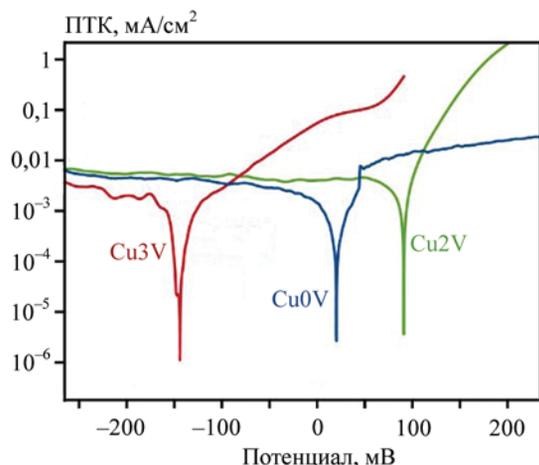


Рис. 4. Кривые зависимости плотности тока коррозии от приложенного потенциала для образцов покрытий с различным содержанием меди

Fig. 4. Corrosion current density versus applied potential for coatings with different copper content

верхности, что приводит к частичной активации металлической основы в непосредственной близости от катодов, что сопровождается сдвигом потенциала нулевого тока в отрицательную сторону. Влияние этих частиц на плотность тока коррозии двояко. С одной стороны, около частиц подложка растворяется более интенсивно, с другой — наличие катодов способствует лучшей пассивации матрицы на более удаленных участках. Наложение этих эффектов приводит к сохранению средней величины ПТК на прежнем уровне, что, однако, не исключает вероятности развития точечной коррозии.

Оценку синергетического эффекта, вызванного одновременным воздействием износа и коррозии, осуществляли с помощью трибокоррозионных испытаний в искусственной морской воде, в ходе ко-

торых регистрировали электрохимический потенциал как в стационарных условиях (без трения), так и во время трения. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

Коэффициент трения базового образца Cu0V монотонно возрастал с 0,3 до 0,37. Введение меди в состав покрытия в количестве 14 ат.% (Cu2V) и 19 ат.% (Cu3V) привело к стабилизации и снижению коэффициента трения до 0,29 и 0,26 соответственно.

С началом трения у всех покрытий происходило резкое падение потенциалов коррозии в отрицательную сторону из-за удаления защитной пассивной пленки с их поверхности. Его значение у образца Cu0V составило -200 мВ, в то время как у покрытий Cu2V и Cu3V во время трения оно не менялось и было -165 мВ, что говорит о более стабильном трибокоррозионном поведении этих образцов.

На рис. 6 показаны СЭМ-изображения, 3D-профили дорожек износа, а также данные ЭДС покрытий Fe–Co–Cr–Ni–Cu_x. Дорожки износа всей серии покрытий имеют схожую морфологию: наблюдается частичный износ шероховатости поверхности (рис. 6, а). Участки между изношенными областями заполнены продуктами износа и коррозии, состоящими в основном из оксидов Fe и Cr, а также остатками компонентов искусственной морской воды (табл. 2).

Особенностью трибологии Cu-содержащих покрытий является накопление меди в дорожках износа (рис. 6, в и табл. 3). Медь концентрируется на гладких участках износа покрытия за счет ее гальванического осаждения. В ходе коррозии и износа часть меди переходит в раствор. При трении в дорожке износа потенциал поверхности падает существенно ниже равновесного потенциала раство-

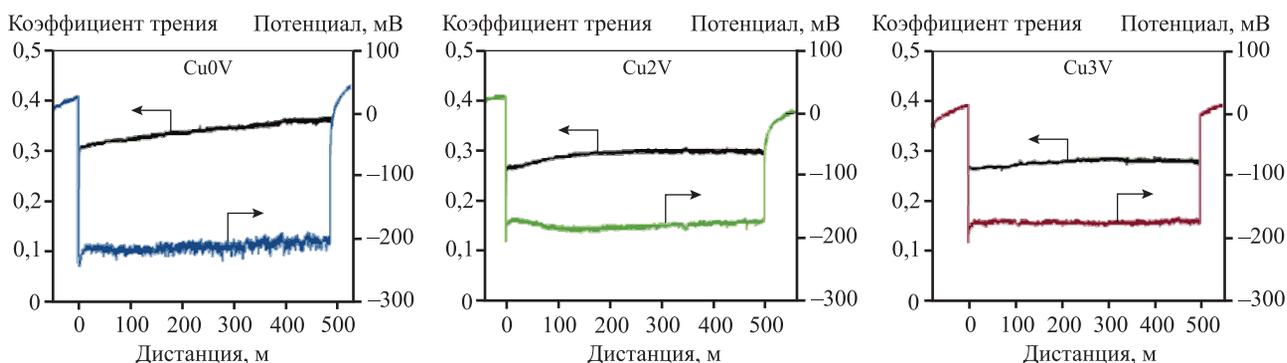


Рис. 5. Результаты трибокоррозионных исследований покрытий в искусственной морской воде

Fig. 5. Tribocorrosion test results of coatings in artificial seawater

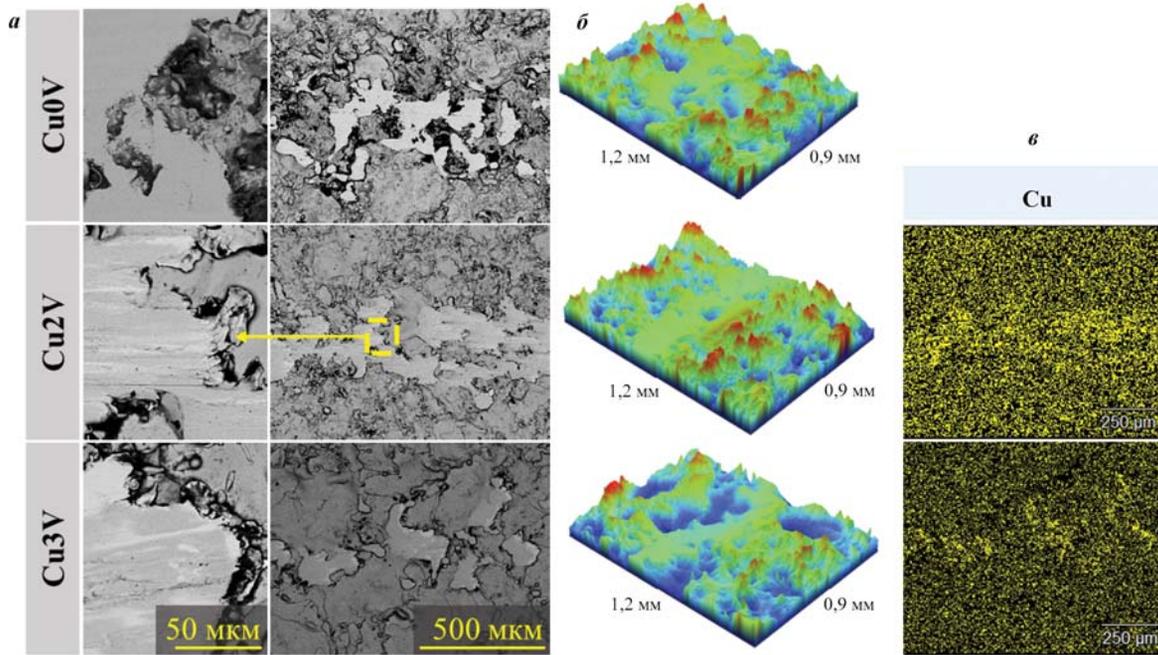


Рис. 6. Дорожки износа образцов покрытий Cu0V, Cu2V и Cu3V

a – СЭМ-изображения дорожек износа при различных увеличениях; *б* – 3D-профили дорожек износа после трибокоррозионных исследований; *в* – карта распределения меди в области дорожек износа

Fig. 6. Wear tracks of Cu0V, Cu2V, and Cu3V coatings

a – SEM images of wear tracks at different magnifications; *б* – wear track 3D profiles after tribocorrosion tests; *в* – Cu distribution maps in the area of wear tracks

Таблица 2. Элементный состав продуктов износа в дорожке износа

Table 2. Elemental composition of wear debris in wear tracks

Образец покрытия	Содержание, ат.%									
	O	C	Mg	Si	Ca	Cr	Fe	Co	Ni	Cu
Cu0V	45	25	1	1	1	7	15	3	2	–
Cu2V	45	30	1	1	2	3	12	1	2	5
Cu3V	44	27	1	1	1	5	14	3	2	2

Таблица 3. Состав покрытия и изношенной поверхности дорожки

Table 3. Composition of coating and worn surface of the wear track

Объект исследования	Содержание, ат.%							
	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	O	C	
Cu0V	17	40	10	11	–	6	16	
Дорожка износа	17	41	11	12	–	6	13	
Cu2V	14	32	8	9	9	6	22	
Дорожка износа	13	28	10	11	18	5	15	
Cu3V	14	33	10	12	15	3	13	
Дорожка износа	11	26	9	11	24	5	14	

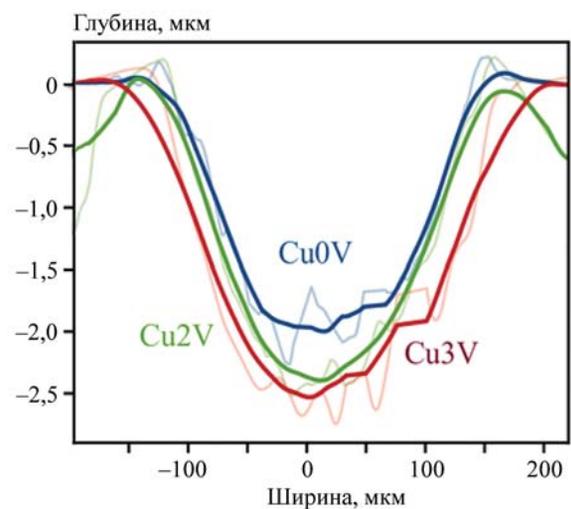


Рис. 7. Профили дорожек износа покрытий

Fig. 7. Profiles of coating wear tracks

рения—осаждения меди в данной среде. При трении на участках с изношенной пассивной пленкой наблюдается наиболее отрицательный потенциал, что приводит к осаждению меди в этих участках. Результатом накопления меди в дорожке износа является снижение коэффициента трения.

Таблица 4. Результаты трибологических испытаний

Table 4. Results of tribological tests

Образец покрытия	Приведенный износ, 10^{-6} мм ³ /(Н·м)	Твердость, ГПа
Cu0V	5,6	2,8
Cu2V	6,3	2,4
Cu3V	9,6	2,3

Для определения приведенного износа покрытий и исключения влияния шероховатости ЭИЛ-покрытий дополнительно были проведены трибологические испытания на образцах с полированной поверхностью. Полученные результаты представлены на рис. 7. Выявлено, что все покрытия обладают высокой износостойкостью, однако с увеличением содержания в них меди износостойкость незначительно снижалась с $5,6 \cdot 10^{-6}$ (Cu0V) до $9,6 \cdot 10^{-6}$ (Cu3V) мм³/(Н·м), как и твердость: от 2,8 (Cu0V) до 2,3 (Cu3V) ГПа, что коррелирует с данными табл. 4.

Выводы

1. Методом электроискрового легирования в вакууме были получены средне- и высокоэнтропийные покрытия Fe–Co–Cr–Ni–(Cu) толщиной до 30 мкм с различным содержанием меди. Они имеют структуру однофазного твердого раствора с ГЦК-решеткой и характеризуются плотной, однородной морфологией.

2. В стационарных условиях введение 14 ат.% Cu положительно повлияло на коррозионную стойкость, существенно сместив потенциал коррозии с +20 до +100 мВ, однако дальнейшее повышение содержания меди до 19 ат.% негативно сказалось на потенциале коррозии, сместив его до –150 мВ. Значения плотности тока коррозии всех покрытий отличались незначительно и находились в диапазоне 1–2 мкА/см².

3. При трении в искусственной морской воде добавка меди также положительно сказалась на трибокоррозионных свойствах покрытий, что позволило повысить потенциал коррозии во время трения с –200 до –165 мВ за счет гальванического осаждения растворенной меди на изношенных частях покрытия. Обратное осаждение меди также положительно влияло на коэффициент трения и привело к его снижению с 0,37 (Cu0V) до 0,26 (Cu3V). Помимо этого, покрытия Fe–Co–

Cr–Ni–(Cu) обладают высокой износостойкостью на уровне $(5,6 \div 9,6) \cdot 10^{-6}$ мм³/(Н·м).

Список литературы/References

- Lu Z., Mao Y., Ren S., Pu J., Fu Z., Fan X., Gao S., Fan J. A novel design of VAlTiCrCu/WC alternate multilayer structure to enhance the mechanical and tribo-corrosion properties of the high-entropy alloy coating. *Materials Characterization*. 2021;176:111115. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2021.111115>
- Kuruvi R., Kumaran S.T., Khan M.A., Uthayakumar M. A brief review on the erosion-corrosion behavior of engineering materials. *Corrosion Reviews*. 2018;36:435–447. <https://doi.org/10.1515/CORRREV-2018-0022/HTML>
- Feng Z., Huang J., Guo H., Zhang X., Li Y., Fang B., Li Y., Song G.L., Liu J. A magnetic “Band-Aid” incorporated with Fe₃O₄ NPs modified epoxy binder for in-situ repair of organic coating under seawater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023;676:132317. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2023.132317>
- Liu Z.X., Li Y., Xie X.H., Qin J., Wang Y. The tribo-corrosion behavior of monolayer VN and multilayer VN/C hard coatings under simulated seawater. *Ceramics International*. 2021;47:25655–25663. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2021.05.291>
- Usta O., Korkut E. Prediction of cavitation development and cavitation erosion on hydrofoils and propellers by Detached Eddy Simulation. *Ocean Engineering*. 2019;191:106512. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2019.106512>
- Shao T., Ge F., Dong Y., Li K., Li P., Sun D., Huang F. Microstructural effect on the tribo-corrosion behaviors of magnetron sputtered CrSiN coatings. *Wear*. 2018; (416-417):44–53. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2018.10.001>
- Niu D., Zhang X., Sui X., Shi Z., Lu X., Wang C., Wang Y., Hao J., Tailoring the tribo-corrosion response of (CrNbTiAlV)C_xN_y coatings by controlling carbon content. *Tribology International*. 2023;179:108179. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2022.108179>
- Ma Y., Li Y., Wang F. The atmospheric corrosion kinetics of low carbon steel in a tropical marine environment. *Corrosion Science*. 2010; 52: 1796–1800. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.022>
- Wang D., Luo H., Zhao S., Tan J., Liang X., Yang J., Zhou S. Seawater-triggered self-renewable amphiphilic coatings with low water swelling and excellent biofilm prevention properties. *Progress in Organic Coatings*. 2013;175:107351. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2022.107351>

10. Zhang X., Yu Y., Li T., Wang L., Qiao Z., Liu Z., Liu W. Effect of the distribution of Cu on the tribo-corrosion mechanisms of CoCrFeNiCu_{0.3} high-entropy alloys. *Tribology International*. 2024;193:109401. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2024.109401>
11. Wu P., Gan K., Yan D., Fu Z., Li Z. A non-equiatom FeNiCoCr high-entropy alloy with excellent anti-corrosion performance and strength-ductility synergy. *Corrosion Science*. 2021;183:109341. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2021.109341>
12. Kuptsov K.A., Antonyuk M.N., Sheveyko A.N., Bondarev A. V., Ignatov S.G., Slukin P. V., Dwivedi P., Fraile A., Polcar T., Shtansky D. V. High-entropy Fe–Cr–Ni–Co–(Cu) coatings produced by vacuum electro-spark deposition for marine and coastal applications. *Surface and Coatings Technology*. 2023;453:129136. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2022.129136>
13. Liu Z., Cui T., Chen Y., Dong Z. Effect of Cu addition to AISI 8630 steel on the resistance to microbial corrosion. *Bioelectrochemistry*. 2023;152:108412. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2023.108412>
14. Zeng Y., Yan W., Shi X., Yan M., Shan Y., Yang K. Enhanced bio-corrosion resistance by Cu alloying in a micro-alloyed pipeline steel. *Acta Metall Sin Engl Lett*. 2022;35(10):1731–1743. <https://doi.org/10.1007/s40195-022-01392-9>
15. Shi Y., Yang B., Liaw P. Corrosion-resistant high-entropy alloys: A review. *Metals*. 2017;7(2):43. <https://doi.org/10.3390/met7020043>
16. Zhang C., Lu X., Zhou H., Wang Y., Sui X., Shi Z.Q., Hao J. Construction of a compact nanocrystal structure for (CrNbTiAlV)N_x high-entropy nitride films to improve the tribo-corrosion performance. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127921. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2021.127921>
17. Shon Y., Joshi S.S., Katakam S., Shanker Rajamure R., Dahotre N.B. Laser additive synthesis of high entropy alloy coating on aluminum: Corrosion behavior. *Materials Letters*. 2015;142:122–125. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2014.11.161>
18. Jin G., Cai Z., Guan Y., Cui X., Liu Z., Li Y., Dong M., Zhang D. High temperature wear performance of laser-cladded FeNiCoAlCu high-entropy alloy coating. *Applied Surface Science*. 2018;445:113–122. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2018.03.135>
19. Li Q.H., Yue T.M., Guo Z.N., Lin X. Microstructure and corrosion properties of alcoerfeni high entropy alloy coatings deposited on AISI 1045 steel by the electro-spark process. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2013;44:1767–1778. <https://doi.org/10.1007/S11661-012-1535-4/FIGURES/15>
20. An Z., Jia H., Wu Y., Rack P.D., Patchen A.D., Liu Y., Ren Y., Li N., Liaw P.K. Solid-solution CrCoCuFeNi high-entropy alloy thin films synthesized by sputter deposition. *Materials Research Letters*. 2015;3:203–209. <https://doi.org/10.1080/21663831.2015.1048904>
21. Шевейко А.Н., Купцов К.А., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Левашов А.Е., Штанский Д.В. Гибридная технология осаждения твердых износостойких покрытий, сочетающая процессы электроискрового легирования, катодно-дугового испарения и магнетронного напыления. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2018;(4):92–103. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-92-103>
Sheveyko A.N., Kuptsov K.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V., Levashov E.A., Shtansky D.V. Hybrid technology combining electrospark alloying, cathodic arc evaporation and magnetron sputtering for hard wear-resistant coating deposition. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2018;4:92–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-92-103>
22. Sheveyko A.N., Kuptsov K.A., Antonyuk M.N., Bazlov A.I., Shtansky D.V. Electro-spark deposition of amorphous Fe-based coatings in vacuum and in argon controlled by surface wettability. *Materials Letters*. 2022;318:132195. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.132195>

Информация об авторах

Мария Николаевна Фатыхова – к.т.н., мл. науч. сотрудник Научно-учебного центра (НУЦ) СВС МИСИС–ИСМАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС).
<https://orcid.org/0000-0001-6817-5999>

E-mail: mariya.antonyuck@ya.ru

Константин Александрович Купцов – к.т.н., ст. науч. сотрудник НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН.

<https://orcid.org/0000-0003-2585-0733>

E-mail: kuptsov.k@gmail.com

Александр Николаевич Шейвейко – науч. сотрудник НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН.

<https://orcid.org/0000-0003-3704-515X>

E-mail: sheveyko@mail.ru

Альфина Рустемовна Гизатуллина – лаборант-исследователь НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН.

E-mail: alfina.gizatullina@yandex.ru

Павел Александрович Логинов – к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Порошковая металлургии и функциональные покрытия» НИТУ МИСИС; ст. науч. сотрудник лаборатории «In situ диагностика структурных превращений» НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН.

<https://orcid.org/0000-0003-2505-2918>

E-mail: pavel.loginov.misis@list.ru

Дмитрий Владимирович Штанский – д.ф.-м.н., зав. научно-исследовательским центром «Неорганические наноматериалы» НИТУ МИСИС; гл. науч. сотрудник НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН.

<https://orcid.org/0000-0001-7304-2461>

E-mail: shtansky@shs.misis.ru

Information about the authors

Mariya N. Fatykhova – Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher of the Scientific-Educational Center of SHS (SHS-Center) of MISIS–ISMAN, National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”).

<https://orcid.org/0000-0001-6817-5999>

E-mail: mariya.antonyuck@ya.ru

Konstantin A. Kuptsov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of SHS-Center of MISIS–ISMAN.

<https://orcid.org/0000-0003-2585-0733>

E-mail: kuptsov.k@gmail.com

Aleksandr N. Sheveyko – Researcher of SHS-Center of MISIS–ISMAN.

<https://orcid.org/0000-0003-3704-515X>

E-mail: sheveyko@mail.ru

Alfina R. Gizatullina – Research Assistant of SHS-Center of MISIS–ISMAN.

E-mail: alfina.gizatullina@yandex.ru

Pavel A. Loginov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings of NUST MISIS; Senior Research Scientist of the Laboratory “In situ Diagnostics of Structural Transformations” of SHS-Center of MISIS–ISMAN.

<https://orcid.org/0000-0003-2505-2918>

E-mail: pavel.loginov.misis@list.ru

Dmitriy V. Shtansky – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Research Center “Inorganic Nanomaterials” of NUST MISIS; Chief Researcher of SHS-Center of MISIS–ISMAN.

<https://orcid.org/0000-0001-7304-2461>

E-mail: shtansky@shs.misis.ru

Вклад авторов

М.Н. Фатыхова – определение цели работы и концепции исследований, написание текста статьи, подготовка графического материала, проведение микроструктурных исследований, механических и трибокоррозионных испытаний, обсуждение и описание результатов.

К.А. Купцов – определение цели работы и концепции исследований, написание текста статьи, подготовка графического материала, проведение рентгенофазового структурного анализа, обсуждение и описание результатов.

А.Н. Шейвейко – проведение и описание электрохимических результатов.

А.Р. Гизатуллина – обсуждение результатов исследований, подготовка графического материала, описание результатов механических испытаний.

П.А. Логинов – изготовление электродов, обсуждение результатов исследований.

Д. В. Штанский – определение цели работы и концепции исследований.

Contribution of the authors

M.N. Fatykhova – defined the research purpose and concept, wrote the article, prepared graphic materials, conducted microstructural studies, mechanical and tribocorrosion tests, and discussed and described the results.

K.A. Kuptsov – defined the research purpose and concept, contributed to writing the article, prepared graphic materials, conducted X-ray phase structural analysis, and participated in discussing and describing the results.

A.N. Sheveyko – conducted and described the electrochemical results.

A.R. Gizatullina – contributed to the discussion of research results, prepared graphic materials, and described the results of mechanical tests.

P.A. Loginov – produced the electrodes and contributed to the discussion of research results.

D.V. Shtansky – defined the research purpose and concept.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024, доработана 24.04.2024, подписана в печать 29.04.2024

The article was submitted 15.04.2024, revised 24.04.2024, accepted for publication 29.04.2024