



УДК 621.762; 62-408.2

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-51-58>Научная статья
Research article

Электроискровое осаждение покрытий Fe–Cr–Cu на сталь Ст3

А. А. Бурков[✉], М. А. КуликИнститут материаловедения Хабаровского федерального исследовательского центра
Дальневосточного отделения РАН
Россия, 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153[✉ burkovalex@mail.ru](mailto:burkovalex@mail.ru)

Аннотация. Известно, что хром в составе металлических композиций формирует плотные пассивирующие пленки, замедляющие коррозию. Новое Fe–Cr–Cu-покрытие осаждено на сталь Ст3 электроискровой обработкой в анодной смеси, состоящей из медных и титановых гранул с добавлением порошка хрома в количестве от 4,85 до 13,26 мас. %. Привес катода увеличивался почти вдвое с ростом добавки порошка хрома в анодную смесь. Структуру покрытий исследовали методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии. Фазовый состав покрытий представлен феррохромом и медью. Показано, что предложенная методика электроискровой обработки позволяет получать Fe–Cr–Cu-покрытия со средней концентрацией хрома от 55 до 83 ат. %. Среднее содержание меди в приготовленных покрытиях находилось в диапазоне от 5 до 16 ат. %. Наибольшая концентрация хрома наблюдалась в покрытии, приготовленном с добавкой 13,26 мас. % Cr в анодную смесь. Коррозионное поведение покрытий исследовали методами потенциодинамической поляризации и импедансной спектроскопии в 3,5 %-ном растворе NaCl. Поляризационные испытания показали, что нанесение Fe–Cr–Cu-покрытий на сталь Ст3 позволяет повысить ее коррозионный потенциал от 12 до 19 % и снизить ток коррозии от 1,5 до 3,4 раза. Микротвердость поверхности покрытий составляла от 3,08 до 4,37 ГПа, а коэффициент трения – от 0,75 до 0,91. Максимальная твердость и наименьший коэффициент трения наблюдались у покрытия с наибольшим содержанием хрома. Показано, что Fe–Cr–Cu-покрытия позволяют улучшить износостойкость поверхности стали Ст3 от 1,5 до 3,8 раз.

Ключевые слова: покрытия Fe–Cr–Cu, электроискровое легирование, сталь Ст3, плотность тока коррозии, коэффициент трения, твердость, износ

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01108-23-02 (тема № 123020700174-7 «Создание и исследование новых металлических, керамических, интерметаллидных, композиционных материалов и наноструктурных покрытий с высокими физико-химическими и эксплуатационными свойствами»).

Для цитирования: Бурков А.А., Кулик М.А. Электроискровое осаждение покрытий Fe–Cr–Cu на сталь Ст3. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2023;17(4):51–58. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-51-58>

Electrospark deposition of Fe–Cr–Cu coatings on St3 steel

А. А. Burkov[✉], М. А. KulikInstitute of Materials Science of the Khabarovsk Federal Research Center
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
153 Tikhookeanskaya Str., Khabarovsk 680042, Russia[✉ burkovalex@mail.ru](mailto:burkovalex@mail.ru)

Abstract. It is well-known that chromium in metallic compositions forms dense passivating films that slow down corrosion. The new Fe–Cr–Cu coating was applied on St3 steel through electrospark deposition in an anode mixture consisting of copper and titanium granules, with the addition of chromium powder ranging from 4.85 to 13.26 wt. %. The weight gain of the cathode increased

nearly twofold with the addition of chromium powder to the anode mixture. The structure of the coatings was analyzed through X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, and energy dispersive spectrometry. The phase composition of the coatings consists of ferrochrome and copper. It is demonstrated that the proposed method of electrospark processing allows for the creation of Fe–Cr–Cu coatings with an average chromium concentration ranging from 55 to 83 at. %. The average copper content in the prepared coatings varied from 5 to 16 at. %. The highest concentration of chromium was observed in the coating prepared with the addition of 13.26 wt. % Cr to the anodic mixture. The corrosion behavior of the coatings was investigated using potentiodynamic polarization and impedance spectroscopy in a 3.5 % NaCl solution. Polarization tests have shown that applying Fe–Cr–Cu coatings to St3 steel can increase its corrosion potential by 12 to 19 % and reduce the corrosion current by 1.5 to 3.4 times. The microhardness of the coating surface ranged from 3.08 to 4.37 GPa, and the coefficient of friction ranged from 0.75 to 0.91. The maximum hardness and the lowest coefficient of friction were observed in the coating with the highest chromium content. It has been demonstrated that Fe–Cr–Cu coatings can enhance the wear resistance of the surface of St3 steel by 1.5 to 3.8 times.

Keywords: Fe–Cr–Cu coatings, electrospark deposition, St3 steel, corrosion current density, coefficient of friction, hardness, wear

Acknowledgements: This research has received support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Governmental contract No. 075-01108-23-02 “Development and study of innovative metallic, ceramic, intermetallic, composite materials and nanostructural coatings with superior physicochemical and operational properties”.

For citation: Burkov A.A., Kulik M.A. Electrospark deposition of Fe–Cr–Cu coatings on St3 steel. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(4):51–58. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-51-58>

Введение

Ежегодный ущерб, наносимый экономике коррозией, составляет приблизительно 2,5 трлн долл. США, что эквивалентно 3,4 % мирового валового внутреннего продукта [1]. При этом не учитываются косвенные потери, связанные с негативными последствиями для окружающей среды и угрозой чрезвычайных происшествий [2]. По данным на 2014 г., общие затраты Китая в борьбе с коррозией достигли 152 млрд долл. США, из которых большая часть приходится на нанесение покрытий (66,15 %) и обработку поверхности (13,24 %) [3]. В Российской Федерации ежегодные потери металлов из-за их коррозии составляют до 12 % общей массы металлофонда, что соответствует утрате до 30 % ежегодно производимого металла [4; 5].

Хорошо известно, что коррозионная стойкость сталей может быть значительно улучшена путем нанесения защитных покрытий [6]. На сегодняшний день наиболее широко используются гальванические методы нанесения хрома или никель-хромовых композиций. Однако гальванические покрытия обладают слабой адгезией, и в суровых условиях эксплуатации на границе раздела покрытия с подложкой легко возникают повреждения, приводящие к местному отслаиванию хромового покрытия вдоль границы раздела [7]. Более того, шестивалентный хром, применяемый в гальванике, относится к I классу опасности. Загрязненный им воздух вызывает смертельные заболевания у сотрудников таких предприятий, а серьезные загрязнения сточных вод представляют опасность для экологии, из-за чего несколько правительств уже ограничили использование гальваники [8].

Широко распространенные методы магнетронного напыления плохо применимы к ферромагнитным материалам из-за слабой стабильности плазмы.

В отличие от гальваники, электроискровое легирование (ЭИЛ) обеспечивает более высокую адгезию покрытий благодаря металлургической связи осажденного материала с подложкой. В качестве покрытий на сталях используют хром из-за образования на его поверхности пассивного оксида Cr_2O_3 [9; 10]. Более того, композиционные Cr–Ti-покрытия показывают более высокую коррозионную стойкость по сравнению с чистыми хромовым или титановым покрытиями [11]. Однако известно, что даже коррозионно-устойчивые хромовые сплавы могут подвергаться локальной коррозии, вызванной микробным облагораживанием [12]. С другой стороны, установлено, что добавление в сплав более 5 мас. % меди придает ему устойчивую антибактериальную активность [13]. Таким образом, добавление меди в Cr–Ti-композицию должно придать ей антимикробную активность и уменьшить риск коррозии, вызванной микробным облагораживанием. Ранее нами была разработана методика автоматизированного электроискрового легирования нелокализованным электродом, потенциально не уступающая хромированию по производительности и энергоэффективности [14; 15].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании применимости электроискрового легирования нелокализованным электродом для нанесения защитных Fe–Cr–Cu-покрытий на сталь Ст3 и изучении влияния концентрации порошка хрома в анодной смеси на структуру, коррозионные и трибологические характеристики покрытий.

Методика исследований

В качестве анодной смеси применяли медные и титановые гранулы с молярным соотношением 3:2 ($\text{Cu}_{60}\text{Ti}_{40}$) и порошок хрома марки ПХ чистотой 98,5 %. Смесь гранул $\text{Cu}_{60}\text{Ti}_{40}$ была выбрана

в качестве источников меди и титана. Гранулы изготавливались путем нарезания медной (М0) и титановой (ВТ-00) проволоки диаметром 4 мм на отрезки длиной $4 \pm 0,5$ мм. Порошок хрома предварительно измельчался с использованием планетарной мельницы «Retsch PM400» (Retsch GmbH, Германия) в спирте и атмосфере аргона при скорости 250 мин^{-1} в течение 80 мин. Средний размер частиц хрома после измельчения составил $1,90 \pm 0,98$ мкм. Количество хрома, добавляемого в анодную смесь, варьировалось от 4,85 до 13,26 мас. % (табл. 1). Подложка (катод) была изготовлена из стали Ст3 в форме цилиндра диаметром 12 мм и высотой 10 мм. Схема установки для осаждения покрытий нелокализованным анодом с добавлением порошка Cr_3C_2 подробно описана в работе [16]. Генератор разрядных импульсов IMES-40 (Институт материаловедения ХНЦ РАН, г. Хабаровск) вырабатывал импульсы тока прямоугольной формы амплитудой 110 А, длительностью 100 мкс и частотой 1000 Гц при напряжении 40 В. Для предотвращения окисления поверхности образцов в рабочий объем контейнера подавался аргон со скоростью 5 л/мин.

Кинетику массопереноса исследовали поочередным взвешиванием катода через каждые 2 мин ЭИЛ на аналитических весах «Vibra NT120» (Shinko Denshi, Япония) с точностью 0,1 мг. Общее время обработки одного образца составляло 8 мин. Для обеспечения воспроизводимости результатов привес катода был изучен для трех образцов из каждой серии.

Фазовый состав приготовленных покрытий исследовали с применением рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 (НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург) в CuK_α -излучении в диапазоне углов $2\theta = 20 \div 90^\circ$. Микроструктуру покрытий изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «Vega 3 LMN» (Tescan, Чехия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) «X-max 80» (Oxford Instruments, Великобритания).

Шероховатость покрытий была измерена на профилометре TR 200 (TIME GROUP Inc., Китай).

Поляризационные испытания проводились в трехэлектродной ячейке с 3,5 %-ным раствором NaCl

с использованием гальваностата P-2X (Electro Chemical Instruments, г. Черноголовка) со скоростью сканирования 4 мВ/с. Стандартный хлорсеребряный электрод выступал электродом сравнения, а в качестве контрэлектрода применялся спаренный платиновый электрод ЭТП-02. Перед съемкой образцы выдерживались 30 мин для стабилизации тока разомкнутой цепи. Плотность коррозионного тока была извлечена из графиков методом экстраполяции Тафеля. Импедансные исследования выполнялись на приборе Z2000 (ООО «Элинс», г. Москва) в диапазоне частот от 100 000 до 1 Гц.

Твердость покрытий измеряли на микротвердомере ПМТ-3М (ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) при нагрузке 0,5 Н по методу Виккерса. Износостойкость и коэффициент трения образцов определяли, следуя процедуре ASTM G99-17, при сухом трении скольжения на скорости $0,47 \text{ мс}^{-1}$ при нагрузке 25 Н. Время тестирования составляло 10 мин. В качестве контртела использовались диски из быстрорежущей стали М45 с твердостью 60 HRC. Износ оценивали гравиметрическим способом. Образец каждого типа испытывался по меньшей мере трехкратно.

Результаты и их обсуждение

С ростом времени электроискровой обработки катод из стали Ст3 непрерывно набирал массу, причем скорость привеса значительно повышалась с увеличением содержания порошка хрома в анодной смеси от 4,85 до 9,25 мас. % (рис. 1, а). При большем количестве Cr-порошка (от 9,25 до 13,26 мас. %) привес подложек возрастал слабо с учетом планок погрешностей. Это может свидетельствовать о приближении содержания порошка хрома в анодной смеси к оптимальной величине. В целом, данные по привесу катода свидетельствуют о том, что порошок хрома может осаждаться на сталь Ст3 методом ЭИЛ с использованием анодной смеси $\text{Cu}_{60}\text{Ti}_{40}$.

Рентгеновские дифрактограммы приготовленных покрытий показаны на рис. 1, б. На рентгеновских спектрах покрытий наблюдаются рефлексы феррохрома Fe–Cr (#34-396 базы PDWin) и меди (#4-836). Судя по интенсивностям рефлексов, в составе покрытий преобладал феррохром, представляющий собой твердый раствор замещения хрома в железе. Это согласуется с данными работы [17], где обрабатывали сталь М50 методом ЭИЛ, используя хромовый электрод. Относительная интенсивность рефлексов меди на рентгеновских спектрах снижалась с ростом добавки хрома в анодную смесь, что свидетельствует об уменьшении концентрации меди в покрытиях.

Средняя толщина покрытий возрастала в диапазоне от 38,1 до 48,6 мкм с увеличением добавки хрома в анодную смесь (табл. 2). На рис. 2, а пока-

Таблица 1. Состав анодной смеси и обозначение покрытий

Table 1. The composition of the anode mixture and the designation of coatings

Обозначение образцов	Соотношение металлических гранул, ат. %		Порошок хрома, мас. %
	Cu	Ti	
Cr5	60	40	4,85
Cr9			9,25
Cr13			13,26

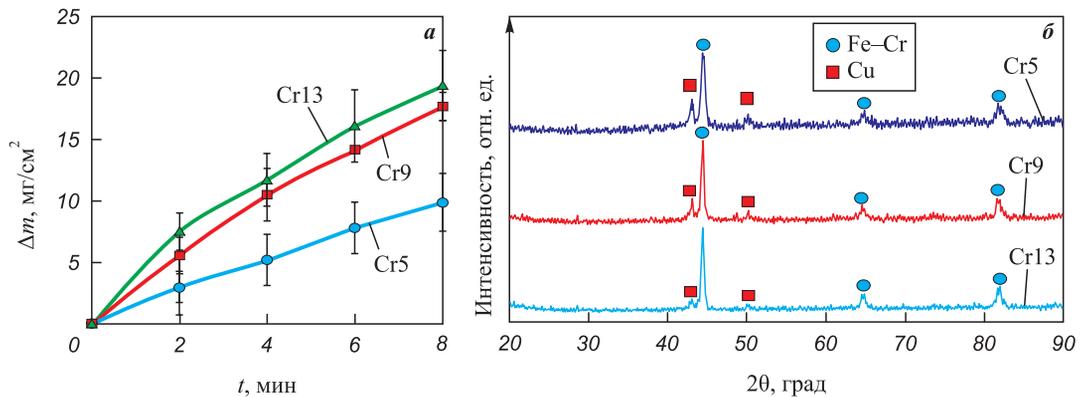


Рис. 1. Кинетика привеса катода при электроискровом нанесении покрытий (а) и рентгеновские дифрактограммы осажденных покрытий (б)

Fig. 1. The kinetics of cathode weight gain during the electrospark deposition of coatings (а) and X-ray diffraction patterns of the deposited coatings (б)

зано электронное изображение поперечного сечения покрытия Cr5 в режиме обратно отраженных электронов. В микроструктуре покрытия наблюдаются светлые включения, богатые медью (рис. 2, б). Вероятно, это именно они зафиксированы на рентгеновской дифрактограмме. Покрытие имеет плотную структуру с малым количеством мелких пор и включений оксидов меди. Оксиды меди формировались из-за высокого сродства меди к кислороду, даже несмотря на подачу аргона в контейнер с гранулами. На границе раздела между покрытием и подложкой обнаружено крупное скопление меди (рис. 2, в). Вероятно, оно сформировалось при возникновении разряда между подложкой и медной гранулой в самом начале ЭИЛ.

Средняя концентрация хрома в составе покрытий находилась в диапазоне от 55 до 83 ат. %. С ростом содержания хрома в анодной смеси его концентрация в покрытии увеличивалась немонотонно с минимумом у образца Cr9 и максимумом у Cr13 (рис. 3). Соответственно, средняя концентрация меди в покрытиях снижалась с 16 до 5 ат. % с максимумом у образца Cr9.

Несоответствие данных рентгенофазового и энергодисперсионного анализов, по тенденции изменения содержания меди в зависимости от добавки хрома в анодную смесь, может объясняться тем, что концентрация хрома в фазе феррохрома может варьироваться в широких пределах. Кроме того, результаты

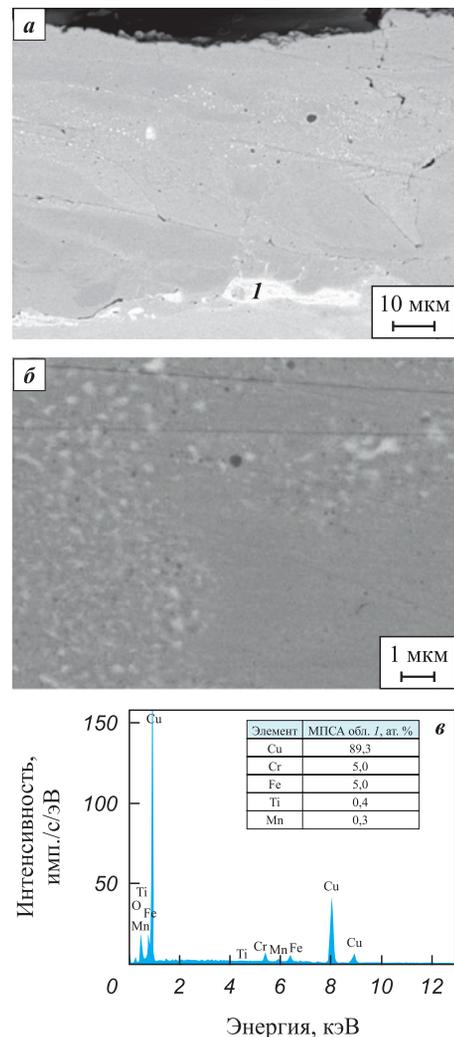


Рис. 2. СЭМ-изображения поперечного сечения покрытия Cr5 (а), его микроструктура (б) и ЭДС-спектр светлого включения (в)

Fig. 2. The SEM images of the Cr5 coating sample cross-section (а), its microstructure (б), and the EDS spectrum of a light inclusion (в)

Таблица 2. Характеристики покрытий

Table 2. Characteristics of coatings

Образец	Толщина, мкм	Шероховатость R_a , мкм	Микротвердость, ГПа
Cr5	38,1 ± 12,2	3,82 ± 0,79	3,46 ± 0,44
Cr9	47,9 ± 6,0	4,63 ± 0,85	3,08 ± 0,26
Cr13	48,6 ± 5,4	4,04 ± 1,24	4,37 ± 0,46

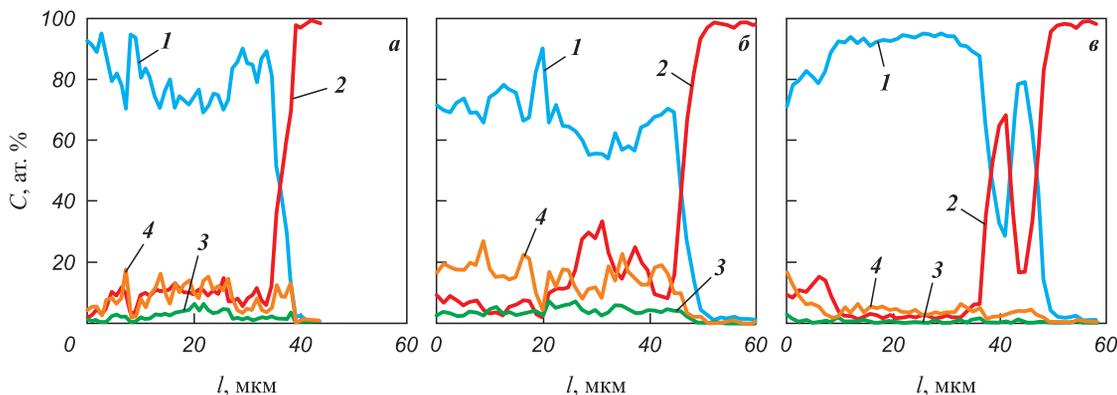


Рис. 3. Типичное распределение элементов по поперечному сечению покрытий Cr5 (а), Cr9 (б), Cr13 (в) согласно ЭДС-анализу
 1 – Cr, 2 – Fe, 3 – Ti, 4 – Cu

Fig. 3. The EDS analysis of elemental distribution along the coating cross-sections of samples Cr5 (a), Cr9 (b), and Cr13 (c)
 1 – Cr, 2 – Fe, 3 – Ti, 4 – Cu

ЭДС-метода являются более точными по сравнению с рентгенофазовым исследованием. Среднее содержание титана в покрытиях находилось в интервале от 0,6 до 4 ат. %. Сопоставление данных по меди и титану показывает, что медь из гранул гораздо активнее переходит в покрытие в процессе ЭИЛ, чем титан. Это может быть обусловлено более высокой температурой плавления титана (1660 °C) по сравнению с медью (1083 °C).

Повышение коррозионного потенциала стали Ст3 после нанесения покрытий означает снижение склонности к самопроизвольной коррозии (рис. 4, а). Для детального описания коррозионного поведения образцов была рассчитана плотность тока коррозии

I_{corr} (табл. 3). Из табл. 3 следует, что ее значения находятся в диапазоне от 43,7 до 101,1 мкА/см². Ток коррозии изменялся в обратной зависимости от концентрации хрома в покрытиях с минимумом у образца Cr9 и максимумом у образца Cr13, подобно коррозионному потенциалу. Плотность тока коррозии покрытий была ниже от 1,47 до 3,39 раз по сравнению со сталью Ст3, даже несмотря на более высокую реальную границу раздела металл/электролит, образованную шероховатостью покрытий (см. табл. 2), по сравнению со сталью.

Спектры электрического импеданса в 3,5 %-ном растворе NaCl при комнатной температуре показаны на рис. 4, б. Оси Im и Re – это мнимая и действительная

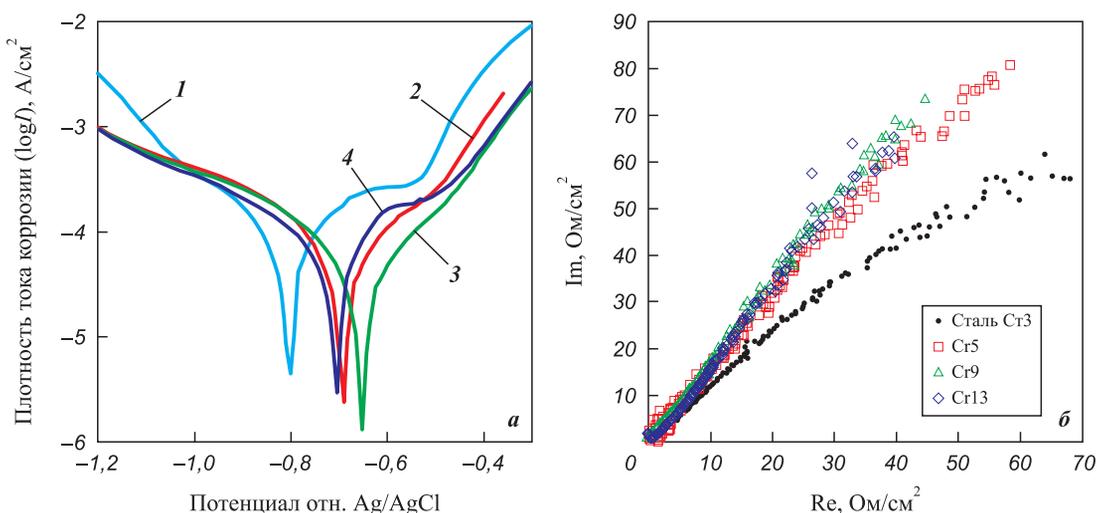


Рис. 4. Потенциодинамические поляризационные кривые (а) и импедансные графики в координатах Найквиста (б) Fe-Cr-Cu-покрытий и стали Ст3
 1 – сталь Ст3, 2 – Cr5, 3 – Cr9, 4 – Cr13

Fig. 4. The potentiodynamic polarization curves (a) and Nyquist plot (b) of Fe-Cr-Cu coatings and St3 steel
 1 – steel St3, 2 – Cr5, 3 – Cr9, 4 – Cr13

Таблица 3. Коррозионный потенциал и ток коррозии покрытий

Table 3. Corrosion potential and corrosion current density of coatings

Образец	$E_{\text{соп}}, \text{В}$	$I_{\text{соп}}, \text{мкА/см}^2$
Ст3	-0,80	148,3
Cr5	-0,69	64,9
Cr9	-0,65	43,7
Cr13	-0,70	101,1

тельная составляющие электрического импеданса соответственно. Диаграммы Найквиста для всех покрытий характеризуются сходными полукруглыми емкостными контурами в высокочастотной области. Как правило, чем больше радиус емкостной дуги, тем выше коррозионная стойкость материала [18]. Радиус емкостного контура всех покрытий был близким, однако наблюдалась тенденция к его увеличению с ростом добавки хрома в анодную смесь. Таким образом, коррозионная стойкость покрытий Fe–Cr–Cu повышалась с увеличением концентрации хрома. Радиус емкостного контура стали Ст3 был значительно меньше, чем у покрытий, что согласуется с данными потенциодинамической поляризации.

Микротвердость, измеренная с поверхности покрытий, была близкой для всех образцов и составляла 3,08–4,37 ГПа (см. табл. 2). Как известно, микротвердость покрытия определяется фазовым составом и распределением остаточных напряжений [19]. Хром обладает большей твердостью по сравнению с железом или медью, поэтому наименьшей твердостью обладало покрытие Cr9 с малой концентрацией хрома, а наибольшей – Cr13 с самым высоким содержанием хрома (см. рис. 3). Кроме того, некоторый вклад в повышенную твердость покрытий внесло измельчение структуры из-за высоких скоростей охлаждения материала после завершения разряда при ЭИЛ [20]. Учитывая, что твердость стали Ст3 составила $1,09 \pm 0,2$ ГПа, электроискровое нанесение хрома позволяет повысить твердость ее поверхности до 4 раз.

Средние значения коэффициента трения ($K_{\text{тр}}$) покрытий находились в диапазоне от 0,75 до 0,91 (рис. 5, а). Высокие значения $K_{\text{тр}}$ согласуются с данными работы по покрытию Fe–Cr, приготовленному индукционной наплавкой, где $K_{\text{тр}} = 0,9$ [21]. Коэффициент трения покрытий был выше, чем у стали Ст3 ($K_{\text{тр}} = 0,63$). Несмотря на относительно высокий уровень $K_{\text{тр}}$, интенсивность изнашивания Fe–Cr–Cu-покрытий была от 1,5 до 3,8 раз ниже, чем у стали без покрытия (рис. 5, б). С ростом концентрации хрома в анодной смеси износ электроискровых покрытий монотонно возрастал с $1,88 \cdot 10^{-5}$

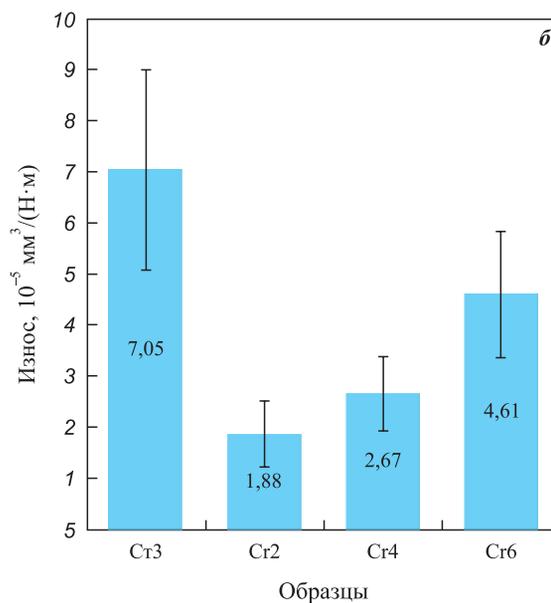
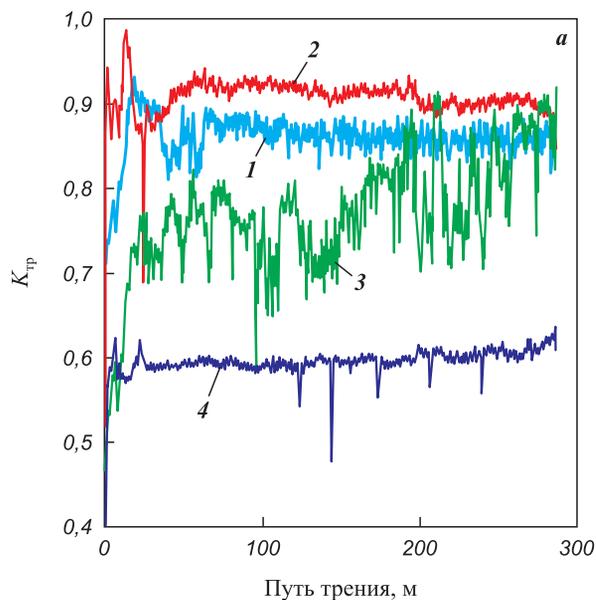


Рис. 5. Коэффициент трения (а) и износ (б) покрытий по сравнению со сталью Ст3 при нагрузке 25 Н
1 – Cr2, 2 – Cr4, 3 – Cr6, 4 – сталь Ст3

Fig. 5. The coefficient of friction (a) and wear (b) of coatings in comparison with St3 steel at a load of 25 N
1 – Cr2, 2 – Cr4, 3 – Cr6, 4 – steel St3

до $4,61 \cdot 10^{-5}$ мм³/(Н·м). Вероятно, это связано с охрупчиванием покрытий при обогащении хромом, что отражено в усилении колебаний силы трения на критических значениях коэффициента трения для образца Cr6 (рис. 5, а).

Заключение

Предложена методика осаждения покрытий Fe–Cr–Cu на стали Ст3 электроискровой обработкой нелокализованным электродом в анодной смеси, состоящей из медных и титановых гранул с добавле-

нием порошка хрома от 4,85 до 13,26 мас. %, позволяющая получать покрытия с концентрацией хрома от 55 до 83 ат. %. Наибольшее содержание хрома наблюдалось в покрытии, приготовленном с добавкой 13 мас. % хрома в анодную смесь. Средняя концентрация меди в приготовленных покрытиях находилась в диапазоне от 5 до 16 ат. %. Поляризационные испытания показали, что нанесение покрытий Fe–Cr–Cu на сталь Ст3 позволяет повысить ее коррозионный потенциал от 12 до 19 % и снизить ток коррозии от 1,5 до 3,4 раза. Микротвердость поверхности покрытий составляла 3,08–4,37 ГПа, а коэффициент трения – 0,75–0,91. Максимальная твердость и наименьший коэффициент трения наблюдались у покрытия с наибольшим содержанием хрома. Износ покрытий возрастал с увеличением добавки порошка хрома в анодную смесь.

Список литературы / References

- Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*. 2021;288:123115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115>
- Kirchgeorg T., Weinberg I., Hörnig M., Baier R., Schmid M.J., Brockmeyer B. Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*. 2018;136:257–268. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.058>
- Hou B., Li X., Ma X., Cuiwei D., Zhang D., Zheng M., Xu W., Lu D., Ma F. The cost of corrosion in China. *npj Materials Degradation*. 2017;1(1):1–10. <https://doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2>
- Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2002. 336 с.
Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. Corrosion and corrosion protection. Moscow: Fizmatlit, 2002. 336 p. (In Russ.).
- Елизарьев А.Н., Аксенов С.Г., Сарваров Т.М., Михайлов С.А., Синагатуллин Ф.К., Елизарьева Е.Н., Эпиматов Н.Л. Обеспечение экологической и промышленной безопасности на резервуарных парках нефтеперерабатывающих предприятий. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022;117(3-1):32–37. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.117.3.005>
Elizar'ev A.N., Aksenov S.G., Sarvarov T.M., Mikhailov S.A., Sinagatullin F.K., Elizar'eva E.N., Epimakhov N.L. Ensuring environmental and industrial safety at tank farms of oil refining enterprises. *International Research Journal*. 2022;117(3):32–37. (In Russ.).
- Князева Ж.В., Юдин П.Е., Петров С.С., Максимук А.В. Применение металлизационных покрытий для защиты погружных электродвигателей насосного оборудования от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020;(1):75–86. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-75-86>
Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Application of metallization coatings for protection of submersible electric motors of pumping equipment from influence of complicating factors in oil wells. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2020;(1):75–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-75-86>
- Li H., Chen G., Zhang G., Zhang K., Luo G. Characteristics of the interface of a laser-quenched steel substrate and chromium electroplate. *Surface and Coatings Technology*. 2006;201:902–907. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.011>
- Babu B.R., Bhanu S.U., Meera K.S. Waste minimization in electroplating industries: A review. *Journal of Environmental Science and Health. Part C*. 2009;27(3):155–177. <https://doi.org/10.1080/10590500903124158>
- Malyshev V.V., Shakhnin D.B. Titanium coating on carbon steel: direct-current and impulsive electrodeposition. Physicochemical and chemical properties. *Materials Science*. 2014;50(1):80–91. <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9694-7>
- Ramezani-Varzaneh H.A., Allahkaram S.R., Isakhani-Zakaria M. Effects of phosphorus content on corrosion behavior of trivalent chromium coatings in 3.5 wt.% NaCl solution. *Surface and Coatings Technology*. 2014;244:158–165. <https://doi.org/10.3390/coatings9090531>
- Bahrami A., Delgado A., Onofre C., Muhl S., Rodil S.E. Structure, mechanical properties and corrosion resistance of amorphous Ti–Cr–O coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2019;374:690–699. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.061>
- Trigodet F., Larché N., Morrison H.G., Maignien L., Thierry D. Influence of dissolved oxygen content on the bacteria-induced ennoblement of stainless steels in seawater and its consequence on the localized corrosion risk. *Materials and Corrosion*. 2019;70(12):2238–2246. <https://doi.org/10.1002/maco.201911225>
- Zhang E., Li.S., Ren J., Zhang L., Han Y. Effect of extrusion processing on the microstructure, mechanical properties, biocorrosion properties and antibacterial properties of Ti–Cu sintered alloys. *Materials Science and Engineering: C*. 2016; 69:760–768. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.051>
- Burkov A.A., Chigrin P.G. Effect of tungsten, molybdenum, nickel and cobalt on the corrosion and wear performance of Fe-based metallic glass coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2018;351:68–77. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.078>
- Бурков А.А., Крутикова В.О. Осаждение аморфных упрочняющих покрытий электроискровой обработкой в смеси кристаллических гранул. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2019;(2):57–67. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-2-57-67>
Burkov A.A., Krutikova V.O. Deposition of amorphous hardening coatings by electrospark treatment in a crystalline granule mixture. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2019;(2):57–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-2-57-67>

16. Burkov A.A., Kulik M.A. Wear-resistant and anticorrosive coatings based on chrome carbide Cr_7C_3 obtained by electric spark deposition. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020;56(6):1217–1221. <https://doi.org/10.1134/S2070205120060064>
17. Cao G., Zhang X., Tang G., Ma X. Microstructure and corrosion behavior of Cr coating on M50 steel fabricated by electrospark deposition. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019;28(7):4086–4094. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04148-2>
18. Li Y.C., Zhang W.W., Wang Y., Zhang X.Y., Sun L.L. Effect of spray powder particle size on the bionic hydrophobic structures and corrosion performance of Fe-based amorphous metallic coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;437:128377. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128377>
19. Wang Q.Y., Xi Y.C., Zhao Y.H., Liu S., Bai S.L., Liu Z.D. Effects of laser re-melting and annealing on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of Fe-based amorphous/crystalline composite coating. *Materials Characterization*. 2017;127:239–247. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.03.011>
20. Shafyei H., Salehi M., Bahrami A. Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB₂ composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electro-spark deposition method. *Ceramics International*. 2020;46(10):15276–15284. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.068>
21. Yu J., Liu Y., Song B., Wang J. Microstructure and properties of Fe-based alloy coating on gray cast iron fabricated using induction cladding. *Coatings*. 2020;10(9):801. <https://doi.org/10.3390/coatings10090801>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Александр Анатольевич Бурков – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник, заведующий лабораторией физико-химических основ технологии материалов, Институт материаловедения Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

ORCID: 0000-0002-5636-4669

E-mail: burkovalex@mail.ru

Мария Андреевна Кулик – мл. науч. сотрудник лаборатории физико-химических основ технологии материалов, Институт материаловедения Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

ORCID: 0000-0002-4857-1887

E-mail: marijka80@mail.ru

Aleksandr A. Burkov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Physical and Chemical Fundamentals of Materials and Technology, Institute of Materials Science of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-5636-4669

E-mail: burkovalex@mail.ru

Mariya A. Kulik – Junior Researcher of the Laboratory of Physical and Chemical Fundamentals of Materials and Technology, Institute of Materials Science of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-4857-1887

E-mail: marijka80@mail.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

А. А. Бурков – идея статьи, литературный обзор, проведение экспериментов, обработка и анализ данных, подготовка текста.

М. А. Кулик – исследование микротвердости и структуры образцов, поиск и анализ литературных данных, редактирование текста, оформление статьи.

A. A. Burkov – formulated the concept of the article, reviewed publications, conducted experiments, processed and analyzed data, wrote the manuscript, and edited the text.

M. A. Kulik – studied the microhardness and structure of samples, searched for and analyzed published data, and contributed to manuscript design.

Статья поступила 21.12.2022 г.
Доработана 30.12.2022 г.
Принята к публикации 13.01.2023 г.

Received 21.12.2022
Revised 30.12.2022
Accepted 13.01.2023