

Научная статья

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

УДК 621.762; 62-408.2

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.010

## КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА И ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА С АЛЮМИНИДНОЙ МАТРИЦЕЙ НА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ AISI304

Александр Анатольевич Бурков<sup>1†</sup>, Александра Юрьевна Быцуро<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН, ул. Тихоокеанская 153, 680042, Хабаровск, Россия

<sup>1</sup> burkovalex@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5636-4669>

<sup>2</sup> alex\_btst@mail.ru

**Аннотация.** Методом электроискрового легирования аустенитной нержавеющей стали AISI304 в анодной смеси из алюминиевых и железных гранул с добавлением порошка карбида вольфрама получены WC-Fe-Al покрытия. Покрытия имели двухфазную микроструктуру, представленную интерметаллидной Fe-Al матрицей с крупными включениями карбида вольфрама. Импедансная спектроскопия в 3,5 % р-ре NaCl показала снижение коррозионной стойкости WC-Fe-Al покрытий с ростом концентрации карбида вольфрама в анодной смеси. Поляризационные испытания показали монотонное повышение потенциала коррозии покрытий от -0,77 до -0,61 В с ростом содержания WC в анодной смеси. При этом плотность тока коррозии линейно увеличивалась с 19,4 до 62,7 мкА/см<sup>2</sup>. Высокотемпературное окисление покрытий при температуре 900 °С за 100 часов испытаний, интенсифицировалось с ростом концентрации карбида вольфрама, однако умеренное армирование Fe-Al матрицы карбидом вольфрама не ухудшало ее жаростойкость. С ростом содержания армирующей керамики в Fe-Al покрытии повышалась его микротвердость с 7,3 до 11 ГПа, снижался коэффициент трения до 0,51 и улучшалась износостойкость. Применение WC-Fe-Al покрытий на нержавеющей стали AISI304 позволяет повысить твердость и жаростойкость ее поверхности, снизить коэффициент трения, и улучшить износостойкость до 19 раз.

**Ключевые слова:** покрытия, электроискровое легирование, нержавеющая сталь AISI304, карбид вольфрама, износ, коррозия, микротвердость, коэффициент трения, жаростойкость.

---

**Для цитирования:** Бурков А.А., Быцуро А.Ю. Коррозионные свойства и трибологическое поведение покрытий из карбида вольфрама с алюминидной матрицей на нержавеющей стали AISI304 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 4. С. 509–519. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.010.

---

Original article

## CORROSION PROPERTIES AND TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF TUNGSTEN CARBIDE COATINGS WITH ALUMIDE MATRIX ON SS AISI304

Alexander A. Burkov<sup>1†</sup>, Alexandra Yu. Bytsuro<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of sciences, 153 Tikhookeanskaya, Khabarovsk, 680042, Russia

<sup>1</sup> burkovalex@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5636-4669>

<sup>2</sup> alex\_btst@mail.ru

**Abstract.** WC-Fe-Al coatings were obtained by the electrospark deposition of AISI304 stainless steel in an anode mixture of aluminum and iron granules with the addition of tungsten carbide powder. The coatings had a two-phase microstructure represented by an intermetallic Fe-Al matrix with large inclusions of tungsten carbide. Impedance spectrometry in 3.5 % NaCl showed a decrease in the corrosion resistance of WC-Fe-Al coatings with an increase in the concentration of tungsten carbide in the anode mixture. Polarization tests showed that with an increase in the content of tungsten carbide in the anode mixture, the corrosion potential of coatings monotonically increased

from -0.77 to -0.61 V. At the same time, the corrosion current density increased linearly from 19.4 to 62.7  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . High-temperature oxidation of coatings are intensified with an increase in the concentration of tungsten carbide at a temperature of 900 °C for 100 hours of testing, however, moderate reinforcement of the Fe-Al matrix with tungsten carbide did not worsen its oxidation resistance. With increase in the of reinforcing ceramic content in the Fe-Al coating, its microhardness increases from 7.3 to 11 GPa, the coefficient of friction decreases to 0.51 and wear resistance improves. The use of WC/Fe-Al coatings on AISI304 stainless steel makes it possible to increase the hardness and oxidation resistance of steel surface, reduce the coefficient of friction, and improve wear resistance up to 19 times.

**Keywords:** coatings, electrospark deposition, stainless steel AISI304, tungsten carbide, wear, corrosion, microhardness, coefficient of friction, oxidation resistance.

**For citation:** Burkov, A. A. & Bytsura, A. Yu. (2022). Corrosion properties and tribological behavior of tungsten carbide coatings with alumide matrix on SS AISI304. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 509–519. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.010.

## Введение

Аустенитная нержавеющая сталь AISI304 это универсальный конструкционный материал, обладающий высокой стойкостью к коррозии и высокотемпературному окислению до 800 °C из-за высокого содержания легирующих элементов и прежде всего хрома [1]. Благодаря этому, она широко используется в пищевой индустрии, химической, судостроительной и аэрокосмической промышленности, энергетике, медицине и других областях [2-4]. Доля потребления аустенитной нержавеющей стали AISI304 среди других марок нержавеющей стали составляет около 72 % [5]. Однако, сравнительно низкая твердость (200 HV) стали 304, обуславливает высокую изнашиваемость в узлах подверженных трению [6]. К тому же, известно, что она подвержена очаговой питтинговой коррозии [3]. Повысить твердость и износостойкость ее поверхности, а также улучшить жаростойкость можно путем нанесения покрытий [1, 7, 8].

Хорошо известно, что жаростойкость и триботехнические характеристики сталей могут быть значительно улучшены путем нанесения металлокерамических (МК) покрытий [9, 10]. МК материалы являются разновидностью металлматричных композитов, и сочетают в своем составе металлическую матрицу, армированную частицами керамики [11]. Керамические фазы обеспечивают высокую твердость, а относительно мягкая матрица удерживает керамику и придает такой композиции высокую трещиностойкость и прочность. МК материалы обладают высокой устойчивостью к абразивным воздействиям [12].

Карбид вольфрама WC является одним из самых распространенных армирующих материалов для создания МК покрытий, поскольку

он обладает высокими твердостью и прочностью [13, 14]. Благодаря этому, WC-Co покрытия широко используются для упрочнения исполнительных поверхностей резцов горнодобывающих инструментов и изнашиваемых деталей машин [15]. Несмотря на свои многочисленные преимущества, WC-Co материалы имеют низкую жаростойкость, что ограничивает их применение в высокотемпературных и высокоинтенсивных приложениях [16]. Поэтому, карбид вольфрама необходимо комбинировать с коррозионностойким и жаростойким металлическим связующим, таким как Fe-Al интерметаллиды. Аллюминиды железа обладают более привлекательными свойствами по сравнению с нержавеющей сталью и даже суперсплавами. А именно, высокая жаростойкость даже при 1000 °C; лучшая коррозионная стойкость в окислительных и восстановительных средах из-за более высокого содержания алюминия, чем в сталях и жаропрочных сплавах [17, 18]. Интерметаллидные Fe-Al покрытия могут служить для придания прочности и коррозионной стойкости стальных изделий [19, 20]. Аллюминиды железа соответствуют большому расширению и поэтому покрытия на их основе характеризуются высокой адгезией [21]. Таким образом, комбинация твердого карбида вольфрама с Fe-Al связкой является удачным сочетанием в качестве покрытия для нержавеющей стали AISI304. В работе [22] наносили WC/Fe-Al покрытия на среднеуглеродистую и нержавеющую сталь методом газопламенного напыления, однако не исследовали их жаростойкость. К тому же газопламенные покрытия характеризуются неоднородной структурой и более слабой внутренней связью по сравнению с электроискровыми покрытиями [23]. Поэтому в настоящей работе исследуются коррозионные и

трибологические свойства композиционных WC-Fe-Al МК электроискровых покрытий на нержавеющей стали AISI304. Метод электроискровой обработки нелокализованным электродом [24] удачно подходит для осаждения WC-Fe-Al покрытий, используя анодную смесь из железных и алюминиевых гранул с добавлением порошка карбида вольфрама.

### Методика и материалы

В качестве нелокализованного электрода использовались анодные смеси из алюминиевых и железных гранул с добавлением разного количества порошка карбида вольфрама (ТУ 6-09-03-360-78) чистотой 99,9 %, состоящего из частиц диаметром  $1,1 \pm 0,3$  мкм (Табл.1). Гранулы были изготовлены в форме цилиндров длиной  $4 \pm 1$  мм из прутков алюминиевого сплава 1188 и стали Ст3 диаметром  $4 \pm 0,5$  мм. Молярное соотношение алюминия к железу в анодной смеси составляло 60 ат. %. Данная смесь, с небольшим избытком алюминия над железом, была выбрана поскольку, в процессе электроискрового легирования (ЭИЛ), покрытия обогащаются железом из стальной подложки [25].

**Таблица 1.** Объемная доля карбида вольфрама в анодной смеси и обозначение образцов

**Table 1.** The volume fraction of tungsten carbide in the anode mixture and the designation of samples

Обозначение образцов	Соотношение металлов, ат. %		WC, об.%
	Al	Fe	
FeAl <sub>60</sub>	60	40	-
W1.8	60	40	1,78
W3.5	60	40	3,50
W5.2	60	40	5,15

Схема установки для ЭИЛ нелокализованным электродом подробно описана в работе [26]. Гранулы и порошок засыпались в стальной контейнер, установленный под углом 40° и соединенный с двигателем. Частота вращения контейнера с гранулами составляла 1 об/с. Покрытия осаждались на цилиндрическую подложку из нержавеющей стали AISI304 (Табл.2), диаметром 12 мм и высотой 10 мм, которая размещалась в центре контейнера и подключалась к отрицательному выводу генератора импульсов. Подложка также подсоединялась к двигателю для вращения в направлении противоположном контейнеру. Положительный вы-

вод генератора подсоединялся к стенкам контейнера через медные щетки. Генератор импульсов IMES-40 вырабатывал импульсы тока прямоугольной формы амплитудой 110 А при напряжении 30 В, длительностью 0,1 мс с периодом 1 мс. В контейнер подавался аргон со скоростью 10 л/мин для предотвращения окисления образцов.

**Таблица 2.** Химический состав стали AISI304

**Table 2.** Chemical composition of AISI304 steel

Элемент	Концентрация, ат. %
Fe	65,01-72,61
Cr	16,79
Ni	7,49
Mn	2,00
Cu	0,87
P	0,08
C	0,14
S	0,05

Электронные изображения приготовленных покрытий были получены с применением растрового электронного микроскопа Sigma 300 VP. Твердость покрытий измерялась на микротвердомере ПМТЗМ при нагрузке 0,5 Н по методу Виккерса. Износостойкость покрытий исследовалась по стандарту ASTM G99 при сухом трении скольжения на скорости 0,47 м/с при нагрузках 10 и 50 Н. В качестве контртела использовались диски из быстрорежущей стали M45 с твердостью 60 HRC. Было проведено не менее трех измерений для каждого образца. Износ измеряли гравиметрическим способом с точностью 0,1 мг. Поляризационные испытания проводились в трехэлектродной ячейке, после 30, минутной выдержки образцов в 3,5 %-ном растворе NaCl, с использованием потенциостата Р-2Х со скоростью сканирования 10 мВ/с. Импедансные исследования выполнялись на приборе Z2000. Площадь образцов контактирующая с раствором электролита составляла 1 см<sup>2</sup>. Контрэлектрод представлял собой платиновый электрод “ЭТП-02”, а электродом сравнения выступал стандартный хлор-серебряный электрод. Потенциал коррозии, а также плотность тока коррозии были извлечены с участков методом экстраполяции Тафеля. Испытания на жаростойкость проводили в печи при температуре 900 °С. Общее время тестирования составляло 100 ч. Образцы выдерживали при заданной температуре в течение ~ 6 ч, затем удаляли и охлаждали в эксикаторе до ком-

натной температуры. Во время испытания образцы помещались в корундовый тигель для учета массы отслоившихся оксидов.

### Результаты и обсуждение

В ходе ЭИЛ возникали электрические разряды между гранулами и подложкой, в результате которых происходил жидкофазный перенос металла с поверхности гранулы в микрованну расплава на подложке. Частицы карбида вольфрама, оказавшиеся в межэлектродном промежутке в момент развития разрядного канала, погружались в микрованну расплава и сплавлялись с металлом.

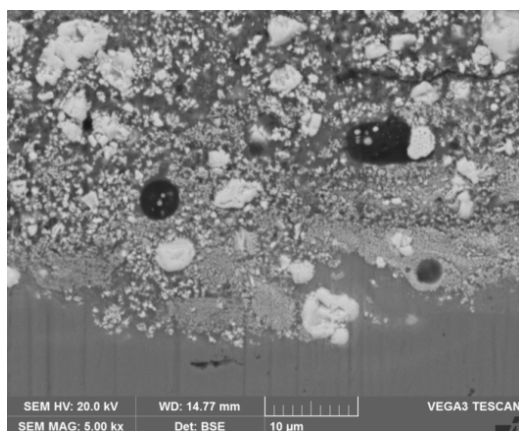


Рис.1. СЭМ изображение поперечного сечения покрытия V5.2

Fig.1. SEM image of the cross-section of the coating V5.2

На рис.1 изображено поперечное сечения покрытия V5.2 в режиме обратно отраженных

электронов. Все покрытия имели двухфазную структуру в виде серой матрицы с белыми включениями. Соответственно, темная матрица представлены более легкими элементами (Al, Fe, Cr), тогда как белые включения богаты вольфрамом. Вероятно, это частицы и агломераты порошка карбида вольфрама, не подвергшиеся плавлению и обезуглероживанию. В структуре покрытий наблюдаются поры и микротрещины, возникшие при остывании материала после окончания разряда [27]. Таким образом, при ЭИЛ осаждении порошка WC в смеси с железными и алюминиевыми гранулами удается получить МК структуру из Fe-Al матрицы с обильными включениями карбида вольфрама.

На рис.2а показаны результаты циклических испытаний образцов из нержавеющей стали AISI304 с WC/Fe-Al покрытиями на жаростойкость при температуре 900 °С. По результатам 100 часов испытаний, привес образцов с покрытиями составил от 28 до 49 г/м<sup>2</sup>. Наибольший привес по результатам 100 часов испытания наблюдался у образца с самым высоким содержанием карбида вольфрама, а наименьший у покрытия W3.5. Это свидетельствует о деструктивной роли карбида вольфрама, ухудшающего жаростойкость покрытий и согласуется с данными работы [28]. Это связано с тем, что карбид вольфрама начинает окисляться при температурах выше 600 °С, формируя рыхлый оксид WO<sub>3</sub> [29]. Однако, привес образцов с умеренным содержанием карбида вольфрама W1.8 и W3.5 был немного ниже, чем у покрытия FeAl<sub>60</sub> без WC.

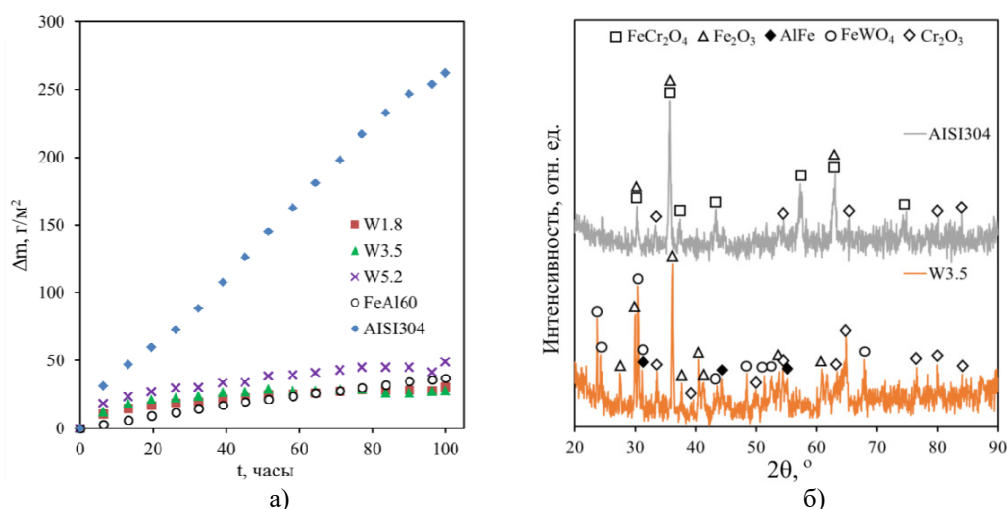


Рис.2. Жаростойкость образцов при температуре 900 °С на воздухе (а) и рентгеновские дифрактограммы поверхности покрытия W3.5 после испытания на жаростойкость по сравнению со сталью AISI304 (б)

Fig.2. Oxidation resistance of samples at a temperature of 900 °C in air (a) and X-ray patterns of the coating surface W3.5 after testing compared to AISI304 steel (b)

Таким образом, умеренное армирование Fe-Al матрицы карбидом вольфрама не сказывается на ее жаростойкости. Привес образцов обусловлен фиксацией кислорода в виде оксидов железа, хрома и вольфрама в модификациях гематита, хромита железа (II)  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  и вольфрамата железа (II)  $\text{FeWO}_4$  (рис.26). На рентгеновской дифрактограмме поверхности покрытий, в отличие от стали AISI304, наблюдаются рефлексы эквимольного алюминиды железа, который устойчив к окислению. Высокую жаростойкость Fe-Al материалов к окислению принято объяснять образованием плотной пленки  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , которая формируется при содержании Al в Fe-Al сплаве от 8-10 мас. % [30]. Сравнение итогового привеса образцов позволяет заключить, что применение электроискровых WC/Fe-Al покрытий позволяет повысить жаростойкость нержавеющей стали AISI304 от 5,4 до 9,4 раз.

Спектры электрического импеданса в 3,5 % растворе NaCl при комнатной температуре показаны на рис.3а. Оси Im и Re – это мнимая и действительная составляющие электрического импеданса, соответственно. Диаграммы Найквиста для всех покрытий характеризуются сходными полукруглыми емкостными контурами в высокочастотной области. Большой ра-

диус дуги обычно отражает более высокую коррозионную стойкость материала [31]. Радиус емкостного контура монотонно снижался с увеличением концентрации карбида вольфрама в покрытиях. Так, наименьший радиус дуги был у покрытия W5.2, а наибольший у образца W1.8. Это связано с тем, что при повышении концентрации карбида вольфрама в аноде повышалась его концентрация в покрытии, тогда как концентрация интерметаллида снижалась. Так, максимальные значения сопротивлений Re на низких частотах монотонно увеличивались с ростом содержания алюминия в покрытиях, что указывает на повышение их барьерных свойств, за счет формирования  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Таким образом, коррозионная стойкость Fe-Al/WC покрытий снижалась с ростом концентрации карбида вольфрама.

На рис.3б видно, что потенциодинамические кривые WC-Fe-Al покрытий демонстрируют меньший потенциал коррозии  $E_{\text{corr}}$  по сравнению со сталью AISI304. Это объясняется высокой активностью алюминия, так его электрохимический потенциал составляет -1,66 В. Более того, с ростом содержания алюминия в покрытиях потенциал их коррозии монотонно снижался.

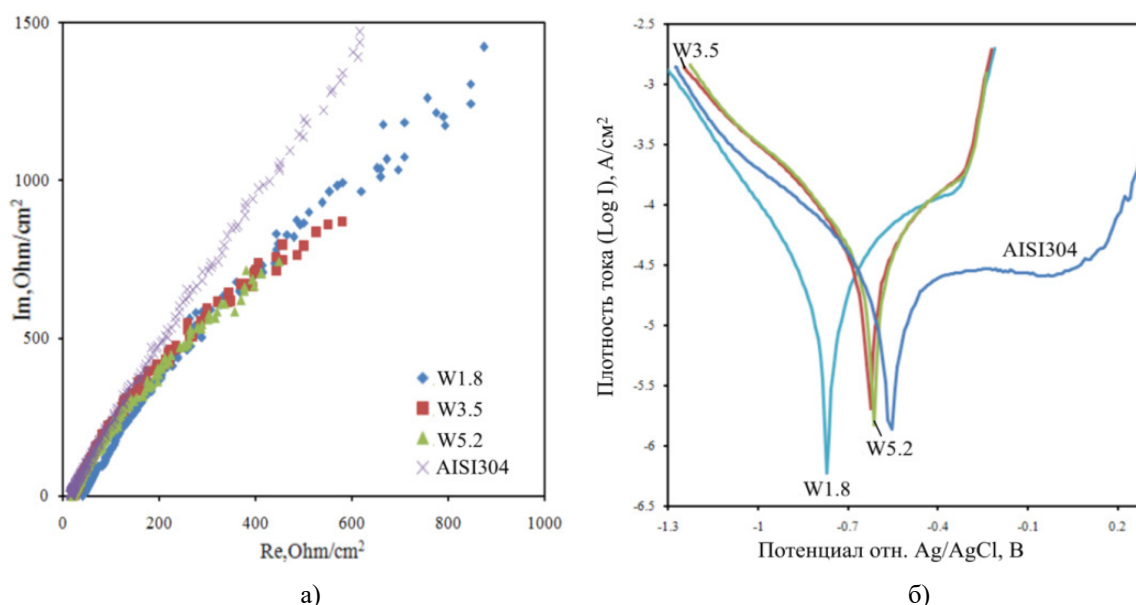


Рис.3. Импедансные спектры в координатах Найквиста а) и потенциодинамические поляризационные кривые б) для WC/Fe-Al покрытий и нержавеющей стали AISI304

Fig.3. Impedance spectra in Nyquist coordinates a) and potentiodynamic polarization curves b) for WC/Fe-Al detection and detection steel AISI304

Таким образом, с повышением концентрации карбида вольфрама в анодной смеси потенциал коррозии покрытий повышался. Для

детального описания коррозионного поведения образцов, по наклонам тафелевских участков потенциодинамических кривых, была расчи-

тана плотность тока коррозии  $I_{\text{corr}}$  (Табл.3). Из Таблицы 1 следует, что с ростом концентрации карбида вольфрама в анодной смеси  $I_{\text{corr}}$  монотонно повышался от  $1,94 \cdot 10^{-5}$  до  $6,27 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>, что связано с уменьшением концентрации алюминия в составе покрытий. Это объясняется тем, что карбид вольфрама обладает достаточно высокой электропроводностью, но в отличие от Fe-Al связки не формирует барьерных слоев. В целом WC-Fe-Al покрытия не представляют ценности для защиты нержавеющей стали AISI304 от коррозии в электролитах. Вместе с тем, продемонстрировано негативное влияние карбида вольфрама на коррозионное поведение WC-Fe-Al композитов.

**Таблица 3.** Потенциал ( $E_{\text{corr}}$ ) и ток ( $I_{\text{corr}}$ ) коррозии покрытий, извлеченные из поляризационных кривых

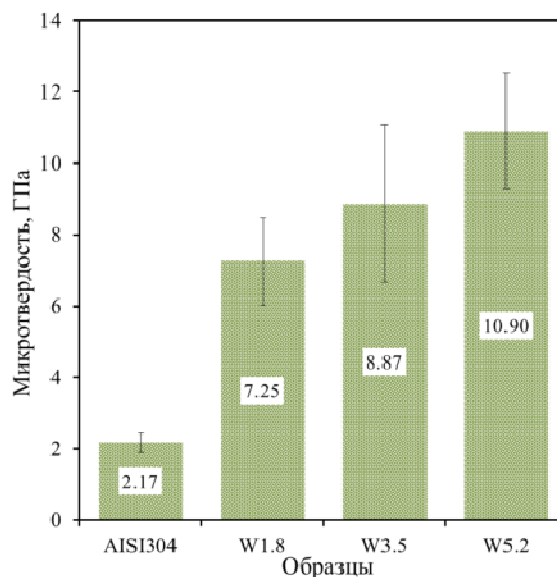
**Table 3.** Coating corrosion potential ( $E_{\text{corr}}$ ) and current ( $I_{\text{corr}}$ ) extracted from polarization curves

Параметры	Образцы			
	W1.8	W3.5	W5.2	AISI304
$E_{\text{corr}}$ , В	-0,7	-0,62	-0,61	-0,55
$I_{\text{corr}}$ , мкА/см <sup>2</sup>	19,4	38,5	62,7	13,0
$R_p$ , кОм	3,85	2,26	1,48	6,47

На рис.4 показаны средние значения микротвердости поверхности покрытий. С ростом содержания WC в анодной смеси микротвердость покрытий возрастала с 7,25 до 10,9 ГПа. Высокая стохастичность значений твердости покрытий, по сравнению с основой объясняется МК структурой покрытий состоящей из твердых частиц карбида вольфрама и более мягкой Fe-Al матрицы. Таким образом, нанесение WC/Fe-Al покрытий позволяет повысить твердость поверхности стали AISI304 от 3 до 5 раз. Рост твердости покрытий обусловлен увеличением концентраций твердых армирующих включений WC. Твердость Fe-Al матрицы также была достаточно высокой –  $7,1 \pm 0,85$  ГПа. Благодаря этому, авторы работ [32-34] объясняют более высокую микротвердость газопламенного покрытия WC-FeAl по сравнению с WC-Co.

Рисунок 5а показывает динамику коэффициента трения покрытий и стали AISI304 в процессе испытания на износ при нагрузках 10 и 50 Н. При малой нагрузке коэффициент трения WC-Fe-Al покрытий монотонно снижался от 0,51 до 0,69 с ростом концентрации WC, то-

гда как у стали AISI304 он составил 0,91. В работе [22] коэффициент трения WC-Fe-Al покрытия на стали AISI304 при близкой нагрузке 7 Н был значительно выше – 0,85. При нагрузке 50 Н коэффициент трения покрытий находился в диапазоне от 0,64 до 0,79, тогда как у стали AISI304 он был немного ниже – 0,63. При обеих нагрузках наибольший коэффициент трения наблюдался у покрытия W1.8, осажденного с наименьшим содержанием WC в анодной смеси. Это указывает на антифрикционное действие карбида вольфрама. Таким образом, нанесение WC/Fe-Al покрытий с высокой объемной долей карбида вольфрама позволяет снизить коэффициент трения стали AISI304 до 40 % при малых нагрузках трения.



**Рис.4.** Микротвердость поверхности покрытий по сравнению со сталью AISI304

**Fig.4.** Microhardness of the coating surface in comparison with AISI304 steel

Аналогично коэффициенту трения, средние значения износа покрытий нагрузке 10 Н снижались с ростом содержания карбида вольфрама в анодной смеси от  $0,41 \cdot 10^{-5}$  до  $0,21 \cdot 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/Нм (рис.5а). Износ покрытий при малой нагрузке хорошо согласуется с данными по твердости (рис.4). При нагрузке 50 Н зависимость износа от концентрации армирующей фазы имел вид параболы с минимумом у образца W3.5. Относительно слабая износостойкость покрытия W5.2 может быть вызвана выкрашиванием керамики из-за недостатка металлической связки при высоких удельных нагрузках трения.

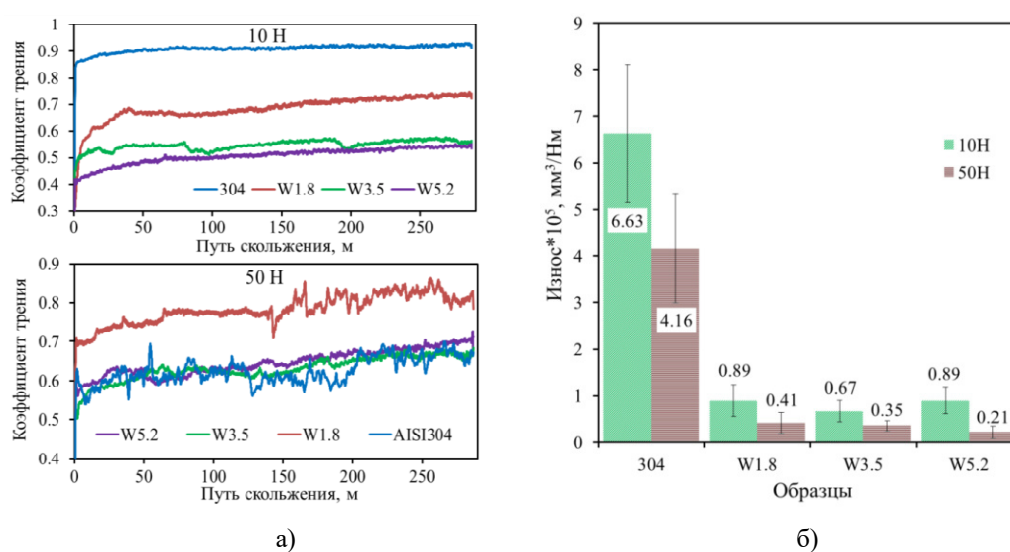


Рис.5. Коэффициент трения (а) и приведенный износ (б) покрытий по сравнению со сталью AISI304

Fig.5. Coefficient of friction (a) and reduced wear (b) of coatings compared to AISI304 steel

Таким образом, нанесение WC-Fe-Al покрытий позволяет повысить износостойкость поверхности стали AISI304 от 7,4 до 19,6 раз.

### Выводы

1. Добавление порошка карбида вольфрама к смеси алюминиевых и железных гранул состава Fe<sub>40</sub>Al<sub>60</sub> при электроискровой обработке стали AISI304, приводит к получению металл-керамических WC-Fe-Al покрытий с двухфазной структурой из агломератов частиц карбида вольфрама и Fe-Al матрицы.

2. Коррозионная стойкость и жаростойкость WC-Fe-Al покрытий снижались с ростом концентрации карбида вольфрама в анодной смеси. Умеренное армирование Fe-Al матрицы карбидом вольфрама до 3,5 об. % не ухудшает ее жаростойкость.

3. С ростом содержания армирующей добавки в Fe-Al анодной смеси повышается микротвердость осаждаемых покрытий с 7,25 до 10,9 ГПа, снижается коэффициент трения до 0,51 и улучшается износостойкость. Применение WC-Fe-Al покрытий на нержавеющей стали AISI304 позволяет повысить твердость ее поверхности и жаростойкость до 5 и 9,4 раз, соответственно, снизить коэффициент трения до 40 %, и улучшить износостойкость до 19 раз.

### Список литературы

1. Ushashri K., Masanta M. Hard TiC coating on AISI304 steel by laser surface engineering using pulsed Nd: YAG laser // Materials and

Manufacturing processes. 2015. V. 30, N 6. P. 730–735.

2. Liu H., Wei Y., Han Y., Li Z., Shi Y. Effect of excess Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on microstructure and tensile properties of 304 stainless steel with dual nanocrystalline and microcrystalline austenite prepared by aluminothermic reaction casting // Materials. Technologies. Design. 2019. V. 1, N 1. P. 24–33

3. Штефан В.В., Канунникова Н. А. Оксидирование стали AISI304 в Al-, Ti-содержащих растворах // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2020. Т. 56, № 2. С. 202–207.

4. Рыбалка К.В., Бекетаева Л.А., Давыдов А.Д. Определение скорости коррозии стали AISI304 в растворах HCl методом измерения омического сопротивления исследуемого образца // Электрохимия. 2019. Т. 55, № 9. С. 1147–1152.

5. Kulkarni A., Sargade V., More C. Machinability investigation of AISI304 austenitic stainless steels using multilayer AlTiN/TiAlN coated carbide inserts // Procedia Manufacturing. 2018. V. 20. P. 548–553.

6. De Frutos A., Arenas M.A., Fuentes G.G., Rodríguez R.J., Martínez R., Avelar-Batista J.C., De Damborenea J.J. Tribocorrosion behaviour of duplex surface treated AISI304 stainless steel // Surface and Coatings Technology. 2010. V. 204, N 9–10. P. 1623–1630.

7. Храменкова А.В., Яковенко А.А., Изварин А.И., Мощенко В.В., Финаева О.А.,

- Арискина Д.Н. Получение защитных оксидных покрытий на поверхности нержавеющей стали // В сб. материалов международной научно-практической конференции «Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса». Т. 4. Санкт-Петербург, 2021. С. 25–27.
8. Iswanto P.T., Malau V., Priyambodo B.H., Wibowo T.N., Amin N. Effect of shot-peening on hardness and pitting corrosion rate on load-bearing implant material AISI304 // *Materials Science Forum*. 2017. V. 901. P. 91–96.
9. Liu H., Zhang X., Jiang Y., Zhou R. Microstructure and high temperature oxidation resistance of in-situ synthesized TiN/Ti<sub>3</sub>Al intermetallic composite coatings on Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alloy by laser cladding process // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. V. 670. P. 268–274.
10. Бурков А.А., Кулик М.А., Беля А.В., Крутикова В.О. Электроискровое осаждение порошка диборида хрома на нержавеющую сталь AISI304 // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2022. Т. 24, № 2. С. 78–90.
11. Бурков А.А., Кулик М.А. Коррозионная и триботехническая характеристика металлматричных Fe-Ti-Cr-B покрытий // *Сварочное производство*. 2021. № 12. С. 43–49.
12. Qi C., Zhan X., Gao Q., Liu L., Song Y., Li Y. The influence of the pre-placed powder layers on the morphology, microscopic characteristics and microhardness of Ti-6Al-4V/WC MMC coatings during laser cladding // *Optics & Laser Technology*. 2019. V. 119. P. 105572.
13. Erfanmanesh M., Abdollah-Pour H., Mohammadian-Semnani H., Shoja-Razavi R. Kinetics and oxidation behavior of laser clad WC-Co and Ni/WC-Co coatings // *Ceramics International*. 2018. V. 44, N 11. P. 12805–12814.
14. Yang L.J., Wang S.P., Wang P., Li H., Yang H.Y., Ye Y.S., Li Z.X. Microstructural evolution and abrasive resistance of WC<sub>7</sub>Co ceramic particle-reinforced Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V composite coating prepared by pulse laser cladding // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2020. V. 27, N 2. P. 228–237.
15. Cheng J., Peng J., Wang M., Bo K., Li K., Zhang G., Yang Z. Effects of cyclic heating and water-cooling on the mechanical properties of WC-Co coatings // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. V. 831. P. 154769.
16. Aristizabal M., Sanchez J.M., Rodriguez N., Ibarreta F., Martinez R. Comparison of the oxidation behaviour of WC-Co and WC-Ni-Co-Cr cemented carbides // *Corrosion Science*. 2011. V. 53, N 9. P. 2754–2760.
17. Deevi S.C. Powder processing of FeAl sheets by roll compaction // *Intermetallics*. 2000. V. 8, N 5–6. P. 679–685.
18. Deevi S.C. Advanced intermetallic iron aluminide coatings for high temperature applications // *Progress in Materials Science*. 2021. V. 118. P. 100769.
19. Wang W., Wang D., Han F. Improvement of corrosion resistance of twinning-induced plasticity steel by hot-dipping aluminum with subsequent thermal diffusion treatment // *Materials Letters*. 2019. V. 248. P. 60–64.
20. Yürektürk Y., Baydoğan M. Effect of aluminizing and austempering processes on structural, mechanical and wear properties of a SSF ductile iron // *Materials Research Express*. 2018. V. 6, N 1. P. 016550.
21. Бурков А.А., Чигрин П.Г., Кулик М.А. Гидротермальное нанесение C/MOS<sub>2</sub> на электроискровые Fe-Al покрытия для нержавеющей стали AISI304 // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. 2019. Т. 21, № 4. С. 59–69.
22. Xu B., Zhu Z., Ma S., Zhang W., Liu W. Sliding wear behavior of Fe-Al and Fe-Al/WC coatings prepared by high velocity arc spraying // *Wear*. 2004. V. 257, N 11. P. 1089–1095.
23. Бурков А.А., Кулик М.А. Композиционные электроискровые покрытия на основе аморфной матрицы с включениями боридов вольфрама // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2018. Т. 15, № 3. С. 320–327.
24. Бурков А.А., Кулик М.А. Износостойкие и антикоррозионные покрытия на основе карбида хрома Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, полученные электроискровым осаждением // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2020. Т. 56, № 6. С. 667–672.
25. Burkov A.A. Wear resistance of electrospark WC-Co coatings with different iron contents // *Journal of Friction and Wear*. 2016. V. 37, N 4. P. 385–388.
26. 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. С. 57–67.

27. Chen Z., Zhou Y. Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization // *Surface and coatings technology*. 2006. V. 201, N 3–4. P. 1503–1510.

28. Бурков А. А., Кулик М. А. Упрочнение FeCrMoWCBSi аморфных электроискровых покрытий карбидом вольфрама // *Письма о материалах*. 2021. Т. 11, N 3. С. 304–308.

29. Jafari M., Enayati M.H., Salehi M., Nahvi, S.M., Han J.C., Park C.G. High temperature oxidation behavior of micro/nanostructured WC-Co coatings deposited from Ni-coated powders using high velocity oxygen fuel spraying // *Surface and Coatings Technology*. 2016. V. 302, P. 426–437.

30. Frangini S., Masci A. Intermetallic FeAl based coatings deposited by the electrospark technique: Corrosion behavior in molten (Li+ K) carbonate // *Surface and Coatings Technology*. 2004. V. 184, N 1. P. 31–39.

31. Nikolenko S.V., Syui N.A. Investigation of coatings produced by the electrospark machining method of steel 45 with electrodes based on carbides of tungsten and titanium // *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*. 2017. V. 53, N 5. P. 889–894.

32. Gubisch M., Liu Y., Krischok S., Ecke G., Spiess L., Schaefer J.A., Knedlik C. Tribological characteristics of WC<sub>1-x</sub>, W<sub>2</sub>C and WC tungsten carbide films // *Tribology and Interface Engineering Series*. 2005. V. 48. P. 409–417.

33. Burkov A.A., Pyachin S.A. Investigation of WC-Co electrospark coatings with various carbon contents // *Journal of materials engineering and performance*. 2014. V. 23, N 6. P. 2034–2042.

34. Furushima R., Katou K., Nakao S., Sun Z.M., Shimojima K., Hosokawa H., Matsumoto A. Relationship between hardness and fracture toughness in WC–FeAl composites fabricated by pulse current sintering technique // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2014. V. 42. P. 42–46.

#### Информация об авторах

А. А. Бурков – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.

А. Ю. Быцура – инженер Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.

#### References

1. Ushashri, K. & Masanta, M. (2015). Hard TiC coating on AISI304 steel by laser surface engineering using pulsed Nd: YAG laser. *Materials and Manufacturing processes*, 30(6), 730–735.

2. Liu, H., Wei, Y., Han, Y., Li, Z. & Shi, Y. (2019). Effect of excess Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on microstructure and tensile properties of 304 stainless steel with dual nanocrystalline and microcrystalline austenite prepared by aluminothermic reaction casting. *Materials. Technologies. Design*, 1(1), 24–33.

3. Shtefan, V. V. & Kanunnikova, N. A. (2020). Oxidation of AISI304 steel in Al-and Ti-containing solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 56(2), 379–384.

4. Rybalka, K. V., Beketaeva, L. A. & Davydov, A. D. (2019). Determination of AISI304 steel corrosion rate in the HCl solutions by the method of measuring specimen ohmic resistance. *Russian Journal of Electrochemistry*, 55(9), 920–924.

5. Kulkarni, A., Sargade, V. & More, C. (2018). Machinability investigation of AISI304 austenitic stainless steels using multilayer AlTiN/TiAlN coated carbide inserts. *Procedia Manufacturing*, 20, 548–553.

6. De Frutos, A., Arenas, M. A., Fuentes, G. G., Rodríguez, R. J., Martínez, R., Avelar-Batista, J. C. & De Damborenea, J. J. (2010). Tribocorrosion behaviour of duplex surface treated AISI304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 204(9–10), 1623–1630.

7. Khramenkova, A. V., Yakovenko, A. A., Izvarin, A. I., Moshchenko, V. V., Finayeva, O. A. & Ariskina, D. N. (2021). Polucheniye zashchitnykh oksidnykh pokrytiy na poverkhnosti nerzhaveyushchey stali. *V sb. materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Modernizatsiya i innovatsionnoye razvitiye toplivno-energeticheskogo kompleksa»*. T. 4. Sankt-Peterburg, 25–27. (In Russ.).

8. Iswanto, P. T., Malau, V., Priyambodo, B. H., Wibowo, T. N. & Amin, N. (2017). Effect of shot-peening on hardness and pitting corrosion rate on load-bearing implant material AISI304. *In Materials Science Forum*, 901, 91–96.

9. Liu, H., Zhang, X., Jiang, Y. & Zhou, R. (2016). Microstructure and high temperature oxidation resistance of in-situ synthesized TiN/Ti<sub>3</sub>Al intermetallic composite coatings on Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alloy by laser cladding process. *Journal of Alloys and Compounds*, 670, 268–274.
10. Burkov, A., Kulik, M., Belya, A., Krutikova, V. (2022). Electrospark deposition of chromium diboride powder on stainless steel AISI304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 24(2), 78–90. (In Russ.).
11. Burkov, A. & Kulik, M. (2021). Corrosion and tribotechnical characteristics of metal matrix FE-TI-CR-B coatings. *Svarochnoye proizvodstvo*, 12, 43–49. (In Russ.).
12. Qi, C., Zhan, X., Gao, Q., Liu, L., Song, Y. & Li, Y. (2019). The influence of the pre-placed powder layers on the morphology, microscopic characteristics and microhardness of Ti-6Al-4V/WC MMC coatings during laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 119, 105572.
13. Erfanmanesh, M., Abdollah-Pour, H., Mohammadian-Semnani, H. & Shoja-Razavi, R. (2018). Kinetics and oxidation behavior of laser clad WC-Co and Ni/WC-Co coatings. *Ceramics International*, 44(11), 12805–12814.
14. Yang, L. J., Wang, S. P., Wang, P., Li, H., Yang, H. Y., Ye, Y. S. & Li, Z. X. (2020). Microstructural evolution and abrasive resistance of WC7Co ceramic particle-reinforced Ti6Al4V composite coating prepared by pulse laser cladding. *Journal of Iron and Steel Research International*, 27(2), 228–237.
15. Cheng, J., Peng, J., Wang, M., Bo, K., Li, K., Zhang, G. & Yang, Z. (2020). Effects of cyclic heating and water-cooling on the mechanical properties of WC-Co coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 831, 154769.
16. Aristizabal, M., Sanchez, J. M., Rodriguez, N., Ibarreta, F. & Martinez, R. (2011). Comparison of the oxidation behaviour of WC-Co and WC-Ni-Co-Cr cemented carbides. *Corrosion Science*, 53(9), 2754–2760.
17. Deevi, S. C. (2000). Powder processing of FeAl sheets by roll compaction. *Intermetallics*, 8(5-6), 679–685.
18. Deevi, S. C. (2021). Advanced intermetallic iron aluminide coatings for high temperature applications. *Progress in Materials Science*, 118, 100769.
19. Wang, W., Wang, D. & Han, F. (2019). Improvement of corrosion resistance of twinning-induced plasticity steel by hot-dipping aluminum with subsequent thermal diffusion treatment. *Materials Letters*, 248, 60–64.
20. Yürektürk, Y. & Baydoğan, M. (2018). Effect of aluminizing and austempering processes on structural, mechanical and wear properties of a SSF ductile iron. *Materials Research Express*, 6(1), 016550.
21. Burkov, A. A., Chigrin, P. G. & Kulik, M. A. (2021). Hydrothermal deposition of C/MoS<sub>2</sub> on electrospark Fe-Al coatings for AISI304 stainless steel. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 21(4), 59–69. (In Russ.).
22. Xu, B., Zhu, Z., Ma, S., Zhang, W. & Liu, W. (2004). Sliding wear behavior of Fe-Al and Fe-Al/WC coatings prepared by high velocity arc spraying. *Wear*, 257(11), 1089–1095.
23. Burkov, A. A. & Kulik, M. A. (2018). Composite electro-spark coatings on the basis of the amorphous matrix with the tungsten boride inclusions. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 15(3), 320–327. (In Russ.).
24. Burkov, A. A. & Kulik, M. A. (2020). Wear-resistant and anticorrosive coatings based on chrome carbide Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> obtained by electric spark deposition. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 56(6), 1217–1221.
25. Burkov, A. A. (2016). Wear resistance of electrospark WC-Co coatings with different iron contents. *Journal of Friction and Wear*, 37(4), 385–388.
26. Burkov, A. A. & Krutikova, V. O. (2019). Deposition of amorphous hardening coatings by electrospark treatment in a crystalline granule mixture. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*, (2), 57–67. (In Russ.).
27. Chen, Z. & Zhou, Y. H. (2006). Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization. *Surface and coatings technology*, 201(3–4), 1503–1510.
28. Burkov, A. A. & Kulik, M. A. (2021). Hardening of FeCrMoWCBSi amorphous electrospark coatings with tungsten carbide. *Letters on Materials*, 11(3), 304–308.
29. Jafari, M., Enayati, M. H., Salehi, M., Nahvi, S. M., Han, J. C. & Park, C. G. (2016). High temperature oxidation behavior of micro/nanostructured WC-Co coatings deposited from Ni-coated powders using high velocity

oxygen fuel spraying. *Surface and Coatings Technology*, 302, 426–437.

30. Frangini, S. & Masci, A. (2004). Intermetallic FeAl based coatings deposited by the electrospark technique: Corrosion behavior in molten (Li+ K) carbonate. *Surface and Coatings Technology*, 184(1), 31–39.

31. Nikolenko, S. V. & Syui, N. A. (2017). Investigation of coatings produced by the electrospark machining method of steel 45 with electrodes based on carbides of tungsten and titanium. *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*, 53(5), 889–894.

32. Gubisch, M., Liu, Y., Krischok, S., Ecke, G., Spiess, L., Schaefer, J. A. & Knedlik, C. (2005). Tribological characteristics of WC<sub>1-x</sub>, W<sub>2</sub>C and WC tungsten carbide films. *In Tribology and Interface Engineering Series*, 48, 409–417.

33. Burkov, A. A. & Pyachin, S. A. (2014). Investigation of WC-Co electrospark coatings with

various carbon contents. *Journal of materials engineering and performance*, 23(6), 2034–2042.

34. Furushima, R., Katou, K., Nakao, S., Sun, Z. M., Shimojima, K., Hosokawa, H. & Matsumoto, A. (2014). Relationship between hardness and fracture toughness in WC–FeAl composites fabricated by pulse current sintering technique. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 42, 42–46.

#### **Information about the authors**

A. A. Burkov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Staff Scientist, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of sciences.

A. Yu. Bytsura – Engineer, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of sciences.

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

Статья поступила в редакцию 06.09.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 26.10.2022.

The article was received by the editorial board on 06 Sept. 22; approved after reviewing 20 Sept. 22; accepted for publication 05 Oct. 22.