

УДК 621.9.048

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-55-69>

Научная статья

Research article



Получение электрода из быстрорежущей стали с керамической добавкой MoSi₂–MoB–HfB₂ для электроискровой обработки штамповой стали

А. Ахметов¹, Ж.В. Еремеева¹, А.Е. Кудряшов¹, П.А. Логинов¹, С.Д. Шляпин^{2,1},
М.Е. Самошина¹, Е.А. Левашов¹

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

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

✉ Аманкельды Ахметов (amanlaotero@gmail.com)

Аннотация: Получены электроды для электроискровой обработки (ЭИО) из горячепрессованных заготовок механически легированной порошковой смеси быстрорежущей стали марки Р6М5К5 с 40 %-ной добавкой жаростойкой керамики MoSi₂–MoB–HfB₂, полученной методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (электрод марки Р6М5К5-К), и без добавки (электрод Р6М5К5). Изучены состав и структура электродных материалов и сформированных из них покрытий. Определены особенности массопереноса горячепрессованных электродов на подложках из штамповой стали 5ХНМ при варьировании частотно-энергетических режимов обработки. Электрод Р6М5К5 состоит из матрицы на основе α-Fe, в которой растворены легирующие элементы, и нерастворенных частиц феррованадия, карбида вольфрама и молибдена. Электрод Р6М5К5-К содержит матрицу на основе α-Fe, бориды и карбид, а также оксид гафния. При использовании электрода Р6М5К5 наблюдался устойчивый привес на катоде за все 10 мин обработки. В случае электрода с добавкой керамики привес отмечался в первые 3 мин легирования. В результате ЭИО на поверхности стали 5ХНМ были сформированы покрытия толщиной до 22 и 50 мкм для Р6М5К5 и Р6М5К5-К соответственно. Введение СВС-керамики способствовало росту шероховатости (R_a) поверхностных слоев с 6 до 13 мкм и твердости с 9,1 до 15,8 ГПа. Покрытие из электрода Р6М5К5 состояло из аустенита (γ-Fe) и характеризовалось высокой однородностью. Покрытие из электрода Р6М5К5-К представляло собой гетерогенную матрицу на основе кристаллического и аморфного железа, аморфной фазы на основе сплава Fe–В и дисперсных фаз HfO₂, HfSiO₄, Fe₃Si и Fe₃B. Высокотемпературными трибологическими испытаниями при температуре 500 °С на воздухе выявлено, что покрытия обладают коэффициентом трения 0,55–0,57 в паре с контртелом из стали AISI 440С, а введение добавки жаростойкой керамики способствовало увеличению износостойкости покрытия в 13,5 раза.

Ключевые слова: электроискровая обработка, легирование, порошковая быстрорежущая сталь, инструментальная сталь, керамика, силициды, бориды, оксиды, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, износостойкость.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-49-00141, <https://rscf.ru/project/23-49-00141/>

Для цитирования: Ахметов А., Еремеева Ж.В., Кудряшов А.Е., Логинов П.А., Шляпин С.Д., Самошина М.Е., Левашов Е.А. Получение электрода из быстрорежущей стали с керамической добавкой MoSi₂–MoB–HfB₂ для электроискровой обработки штамповой стали. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(2):55–69. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-55-69>

Fabrication of high speed steel electrodes with MoSi_2 – MoB – HfB_2 ceramic additives for electrospark deposition on die steel

A. Akhmetov¹, Zh.V. Eremeeva¹, A.E. Kudryashov¹, P.A. Loginov¹, S.D. Shlyapin^{2,1}, M.E. Samoshina¹, E.A. Levashov¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS”

4 Bld 1 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University)

4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia

✉ Amankeldy Akhmetov (amanlaotero@gmail.com)

Abstract: The electrodes for electrospark deposition (ESD) were fabricated from hot-pressed blanks composed of a mechanically alloyed powder mixture of R6M5K5 high speed steel. This mixture was enriched with a 40 % addition of heat-resistant MoSi_2 – MoB – HfB_2 ceramics, produces through the self-propagating high-temperature synthesis method (resulting in the R6M5K5-K electrode), as well as variant without any ceramic addition (resulting in the R6M5K5 electrode). We examined both the composition and structure of the electrode materials and the coatings derived from them, identifying the characteristics of mass transfer from hot-pressed electrodes to substrates of 5KhNM die steel under various frequencies and energy conditions during processing. The R6M5K5 electrode consists of an α -Fe-based matrix incorporating dissolved alloying elements and contains discrete particles of ferrovanadium, tungsten carbide, and molybdenum. The R6M5K5-K electrode, in addition to the α -Fe-based matrix, includes borides and carbides, as well as hafnium oxide. The use of the R6M5K5 electrode resulted in a consistent weight increase in the cathode throughout the entire 10-minute processing period. In contrast, the application of the ceramic-enhanced electrode led to weight gain only during the initial 3 min of processing. Subsequently, ESD produced coatings of 22 and 50 μm thickness on the surface of 5KhNM steel using R6M5K5 and R6M5K5-K electrodes, respectively. The introduction of SHS ceramics escalated the roughness (R_a) of the surface layers from 6 to 13 μm and the hardness from 9.1 to 15.8 GPa. The coating from the R6M5K5 electrode was composed of austenite (γ -Fe) and exhibited high uniformity. Conversely, the coating from the R6M5K5-K electrode consisted of a diverse matrix with both crystalline and amorphous iron, an amorphous phase rooted in the Fe–B alloy, and scattered phases of HfO_2 , HfSiO_4 , Fe_3Si , and Fe_3B . High-temperature tribological testing at 500 °C in an air atmosphere showed that the coatings possess a friction coefficient of 0.55–0.57 when coupled with a counterbody of AISI 440C steel. The integration of heat-resistant ceramics notably enhanced the coating's wear resistance, increasing it by a factor of 13.5.

Keywords: electrospark deposition, powder high speed steel, tool steel, ceramics, silicides, borides, oxides, self-propagating high-temperature synthesis, wear resistance.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-49-00141: <https://rscf.ru/project/23-49-00141/>

For citation: Akhmetov A., Eremeeva Zh.V., Kudryashov A.E., Loginov P.A., Shlyapin S.D., Samoshina M.E., Levashov E.A. Fabrication of high speed steel electrodes with MoSi_2 – MoB – HfB_2 ceramic additives for electrospark deposition on die steel. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;30(2):55–69. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-55-69>

Введение

В процессе эксплуатации штамповый инструмент, работающий в условиях высоких температур, подвергается сильному износу и трещинообразованию, причинами которых могут служить тепловое воздействие, трение, адгезия, микротрещины и т.д. [1–4]. В результате требуется замена инструмента, что сопровождается остановкой технологического процесса и влечет значительные экономические затраты.

Одним из эффективных методов предотвращения быстрого износа и повышения срока эксплуатации штампового инструмента является метод электроискрового осаждения (ЭИО) износостой-

ких покрытий с использованием различных электродных материалов [5; 6], включая графит [7; 8], металлы [9; 10], сплавы [11; 12], керамики [13; 14] и твердые сплавы [15; 16]. Широкий спектр электродных материалов позволяет выбрать подходящий состав для формирования покрытия заданного функционального назначения, а применение высокоэнергетических режимов расширяет возможности метода, позволяя восстанавливать изношенные поверхности инструмента [17]. Получение электродов консолидированием порошковых компонентов открывает возможности комбинирования вышеперечисленных материалов, которые

зачастую могут представлять собой отходы производства, что в перспективе повышает потенциал их промышленного применения [18–21].

Для упрочнения поверхности штампов, работающих при высоких температурах, актуальным является использование износостойких и жаростойких электродных материалов, среди которых особое место занимают гетерофазные керамики состава MoSi₂–MoB–HfB₂, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и обладающие высокой однородностью распределения компонентов в смеси [22; 23]. Электроискровые покрытия, полученные из данной керамики, имеют высокую твердость и жаростойкость, что важно для упрочнения инструмента, работающего в условиях повышенных температур, однако они характеризуются низкой скоростью осаждения и недостаточной износостойкостью при высокотемпературных трибологических испытаниях [23]. Для увеличения массопереноса в дуге разряда и повышения износостойкости покрытий используют металлокерамические электроды, состоящие из металлической связки и тугоплавкой составляющей. В качестве связки может быть выбрана быстрорежущая сталь (БРС), которая характеризуется красностойкостью (способностью сохранять твердость при повышенных температурах) и высокой износостойкостью [24; 25]. Применение БРС, помимо роста износостойкости при повышенных температурах, снижает себестоимость и упрощает технологический процесс производства электродов за счет уменьшения температуры спекания.

Цель данной работы состояла в получении электродов из горячепрессованных заготовок механически легированной порошковой смеси быстрорежущей стали Р6М5К5 с керамикой MoSi₂–MoB–HfB₂ и изучении особенностей формиро-

вания электроискровых покрытий на штамповой стали 5ХНМ.

Материалы и методы исследований

В качестве связки выбрана распространенная сталь Р6М5К5, которую получали в планетарной центробежной мельнице (ПЦМ) Активатор-4М (ЗАО «Активатор», г. Новосибирск) из элементов путем смешивания порошков Fe, W, Mo, Co, Cr, C, феррованадия ФВд50У0,5 (ФВд) при следующем соотношении, мас. %: 6,0 W; 5,0 Mo; 5,0 Co; 4,0 Cr; 0,9 C; 4,0 ФВд (2,0 V); остальное — Fe. Характеристики порошков приведены в табл. 1.

Смешивание проводили в течение 30 мин при скорости вращения барабанов 800 об/мин. Готовая смесь БРС характеризовалась зернистостью основной фракции 3–20 мкм при среднем размере частиц 10 мкм.

Гетерофазная керамика состава 60 % (90%MoSi₂–10%MoB) + 40%HfB₂ была получена путем элементного синтеза по методике, описанной в работе [22]. СВС-спек измельчали в шаровой вращающейся мельнице до образования порошковой фракции менее 40 мкм. Полученный порошок, взятый из расчета 40 %, смешивали с порошком БРС в ПЦМ Pulverisette 5/2 («Fritsch», Германия) в течение 60 мин при скорости вращения барабанов 300 об/мин.

Конечный состав порошковой смеси был следующий, мас. %: 3,6 W; 3,0 Mo; 3,0 Co; 2,4 Cr; 0,54 C; 1,2 V; 21,6 MoSi₂; 2,4 MoB; 16,0 HfB₂; ост. Fe.

Заготовки составов Р6М5К5 (электрод Р6М5К5), а также смеси БРС с гетерофазной керамикой (электрод Р6М5К5-К) получали методом горячего прессования (ГП) при температуре 1000 °С, давлении 50 МПа и времени выдержки 3 мин на прессе DSP-515 SA («Dr. Fritsch Sondermaschinen GmbH»,

Таблица 1. Характеристики порошков, использованных для получения порошковой смеси Р6М5К5

Table 1. Characteristics of powders used in the preparation of the R6M5K5 powder mixture

Марка порошка	Элемент	ГОСТ/ТУ	Размер частиц, мкм	Чистота, %
ПЖРВ 2.200.26	Fe	ТУ 14-5365-98	<120	99,24
ПВЧ	W	ТУ 48-19-57-91	1–5	99,99
ПМЧ	Mo	ТУ 14-22-160-2002	40–60	99,9
ПК-1	Co	ГОСТ 9721-79	<50	99,95
ЭРХ-1	Cr	ГОСТ 5905-2004	<50	99,99
ФВд50У0,5	V	ГОСТ 27130-94	<50	99,00
П-803	C	ГОСТ 7885-86	<20	99,9

Таблица 2. Параметры процесса ЭИО

Table 2. ESD process parameters

Режим	Установка	Сила тока импульсного разряда, А	Частота следования, Гц	Длительность импульса, мкс	Энергия единичного импульса, Дж	Суммарная энергия ΣE , кДж·мин
1	Alier-Metal 30	170	1500	25	0,1	7,65
2	Alier-Metal 30	170	3000	25	0,1	15,30
3	Alier Metal G53*	200	400	100	0,4	9,60

* Зависимый генератор.

Германия) в графитовой пресс-форме диаметром 50 мм. Electroды длиной 20–50 мм и сечением 5×5 мм получали электроэрозионной резкой горячепрессованных заготовок на проволочном станке АРТА 200-2 (НПК «Дельта-Тест», г. Фрязино).

Процесс ЭИО осуществляли на установках Alier-Metal 30 и Alier-Metal G53 (ООО НПО «Металл»—SCINTI SRL, Россия—Молдова) на различных частотно-энергетических режимах, параметры которых представлены в табл. 2.

Осаждение покрытия выполняли поочередным локальным воздействием импульсного разряда на все участки обрабатываемой поверхности образцов из стали 5ХНМ путем многократного прохождения анода над одним и тем же участком катода в среде аргона.

Кинетику массопереноса — удельную эрозию анода (ΔA_i) и удельный привес катода (ΔK_i) — электродов Р6М5К5 и Р6М5К5-К определяли гравиметрическим методом на аналитических весах марки KERN 770 (KERN, Германия) с точностью 10^{-5} г. Взвешивание электродов проводили после 1 мин обработки площади 1 см². Общая продолжительность обработки составила 10 мин. Суммарный привес катода определяли по формуле [26]

$$\Sigma \Delta K_i = \Delta K_1 + \Delta K_2 + \dots + \Delta K_{10}, \quad (1)$$

где ΔK_i — привес катода за i -ю мин легирования, г; $i = 1, 2, \dots, 10$.

Аналогично рассчитывали суммарную эрозию анода $\Sigma \Delta A_i$.

Микроструктуру полученных электродов и покрытий исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) S-3400N («Hitachi High-Technologies Corporation», Япония), оснащенном приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДС) NORAN System 7 X-ray Microanalysis System («Thermo Scientific», США).

Съемку дифрактограмм для рентгеноструктурного фазового анализа (РФА) электродов про-

водили на дифрактометре ДРОН-4 (НПП «Буревестник», г. С.-Петербург) с использованием CoK_α -излучения. Для РФА электроискровых покрытий применяли дифрактометр D2 PHASER («Bruker AXS GmbH», Германия) с монохроматическим CuK_α -излучением.

Топографию поверхности покрытий и профили дорожек износа покрытий изучали на оптическом профилометре WYKO NT 1100 (VEECO, США).

Твердость определяли на поперечных шлифах методом измерительного индентирования на нанотвердомере NanoHardness Tester («CSM Instruments», Швейцария) согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577).

Трибологические испытания покрытий проводили по схеме pin-on-disk на высокотемпературной машине трения High-Temperature Tribometer («CSM Instruments», Швейцария) согласно стандарту ASTM G 99. В качестве контртела использовали шарик диаметром 6 мм из стали марки AISI 440C (аналог 95X18). Условия испытаний были следующие: температура 500 °С, нагрузка 5Н, линейная скорость 10 см/с, длина пробега контртела 500 м, длина дорожки 3,76 см.

Приведенный износ определяли по формуле

$$W = SL/(Hl), \quad (2)$$

где S — площадь сечения износа канавки, мм²; L — длина дорожки, мм; H — нагрузка, Н; l — путь трения, м.

На микроскопе JEM-2100 («Jeol», Япония) методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ ВР) исследовали микроструктуру ламели из покрытия, осажденного электродом Р6М5К5-К. Образцы ламели вырезали на установке сфокусированного ионного луча Quanta 200 3D FIB Instrument («FEI Company», США). В колонне просвечивающего электронного микроскопа также проводились *in situ* исследования при нагреве до температуры 500 °С.

Результаты и их обсуждение

Характеристики электродов

Результаты РФА электрода Р6М5К5-К представлены в табл. 3. Видно, что электрод содержит матрицу на основе α -Fe, бориды — $(\text{Mo,W})_2\text{FeB}_2$, Mo_3CoB_3 , HfB, карбид $\text{Mo}_6\text{Fe}_6\text{C}$, а также оксид гафния. Заниженный период решетки фазы α -Fe свидетельствует о растворении в ней кремния, который способен значительно уменьшить период решетки α -Fe [27]. Это согласуется с картами распределения элементов (рис. 1).

По данным РЭМ и ЭДС электрода Р6М5К5-К (табл. 4) можно наблюдать следующие структурные составляющие: моноборид гафния HfB; фазу на основе железа (α -Fe) с растворенными легирующими элементами как самой БРС, так и кремния,

Таблица 3. Фазовый состав электрода Р6М5К5-К

Table 3. Phase composition of R6M5K5-K electrode

Фаза	Содержание		Периоды, нм
	об.%	мас.%	
α -Fe	48,4	44,8	$a = 0,2844$
$(\text{Mo,W})_2\text{FeB}_2$	23,9	23,9	$a = 0,55731$ $c = 0,3136$
$\text{Mo}_6\text{Fe}_6\text{C}$	17,2	18,3	$a = 1,1022$
Mo_3CoB_3	2,6	2,7	—
HfO ₂	5,2	6,1	—
HfB	2,2	3,3	$a = 0,4568$

входящего в состав гетерофазной керамики; комплексный карбид на основе железа и молибдена $\text{Mo}_6\text{Fe}_6\text{C}$.

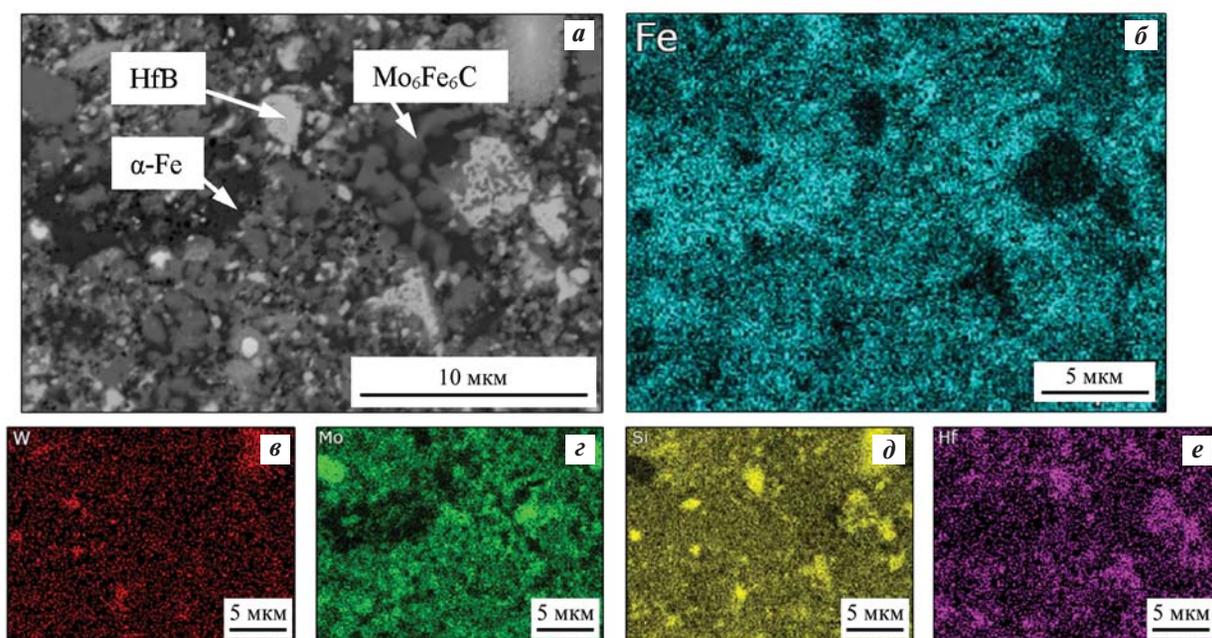


Рис. 1. РЭМ-изображение микроструктуры электрода Р6М5К5-К (а) и карта распределения элементов: Fe (б), W (в), Mo (г), Si (д) и Hf (е)

Fig. 1. SEM image of the microstructure of R6M5K5-K electrode (a) and the element distribution map: Fe (b), W (v), Mo (z), Si (d), and Hf (e)

Таблица 4. Химический состав (ат.%) структурных составляющих электрода Р6М5К5-К

Table 4. Chemical composition (at.%) of structural components in the R6M5K5-K electrode

Фаза	C	O	Si	V	Cr	Co	Fe	Mo	Hf	W
HfB*	—	—	0,4	3,3	0,5	—	11,4	15,4	69,0	—
α -Fe	—	6,2	20,9	1,6	1,3	3,3	62,5	3,6	—	0,6
$\text{Mo}_6\text{Fe}_6\text{C}$	47,9	—	9,4	1,5	1,7	1,7	22,1	15,2	—	0,2

* Фаза определена исходя из результатов РФА.

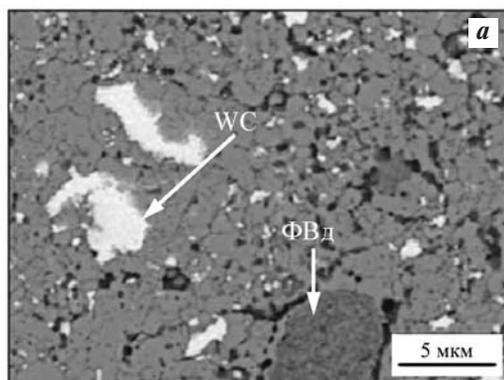
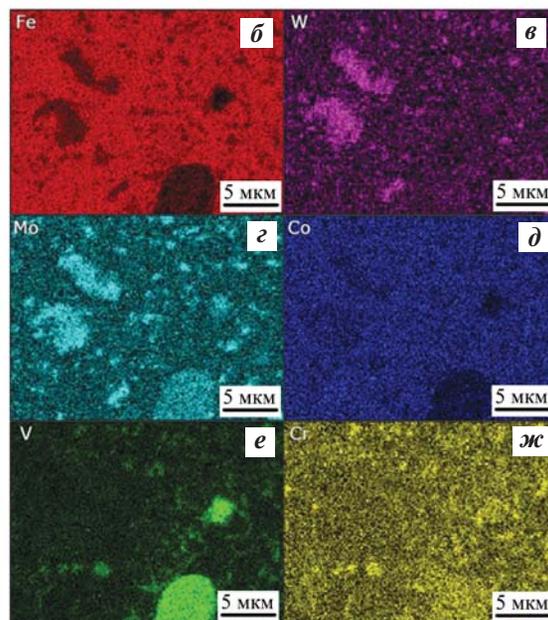


Рис. 2. РЭМ-изображение микроструктуры электрода Р6М5К5 (а) и карта распределения элементов: Fe (б), W (в), Mo (г), Co (д), V (е) и Cr (ж)

Fig. 2. SEM image of the microstructure of R6M5K5 electrode (а) and the element distribution map: Fe (б), W (в), Mo (г), Co (д), V (е) and Cr (ж)



На рис. 2 представлены РЭМ-изображение микроструктуры электрода из БРС Р6М5К5 и карта распределения элементов. Видно, что матрица на основе Fe состоит из зерен размером 1–2 мкм, в которых равномерно растворены легирующие элементы (Co и Cr). В объеме матрицы присутствуют частицы темного и белого цвета. Из данных ЭДС и карты распределения элементов светлые частицы представляют собой карбид WC (образован в результате механического легирования), а темные — ФВд. В частицах карбида вольфрама и нерастворенного ФВд содержится молибден, который образует ряд непрерывных растворов как с вольфрамом, так и с ванадием [28; 29].

Получение и свойства электроискровых покрытий

На рис. 3 приведены зависимости привеса массы катода и эрозии анода от длительности ЭИО электродами Р6М5К5 и Р6М5К5-К. Обработка электродом Р6М5К5 сопровождается монотонным увеличением привеса массы катода и сопоставимой эрозией электрода. При этом наблюдается корреляция между увеличением суммарной энергии импульсов и показателем привеса массы подложки. Таким образом, режим 2 ($\Sigma E = 15,30$ кДж·мин) для электрода Р6М5К5 более предпочтителен, поскольку обеспечивает наибольший привес в течение 10 мин обработки.

Для электрода Р6М5К5-К все рассмотренные режимы обеспечивают практически аналогичный привес катода, который останавливается после

3 мин обработки. Ограничение толщины покрытий связано с накоплением внутренних напряжений, уменьшением термостойкости покрытия и образованием в ней ультрадисперсной структуры [26].

Для визуального контроля топографии поверхности определяли шероховатость (R_a) поверхности покрытий, полученных после 3 мин обработки для каждого из трех режимов. На рис. 4 приведены 3D-изображения поверхностей и значения R_a . Видно, что при использовании электрода Р6М5К5 шероховатость покрытий несколько ниже, чем в случае Р6М5К5-К. По результатам исследования кинетики массопереноса и шероховатости оптимальным является режим 2, который обеспечивает минимальную шероховатость при высоком для электрода Р6М5К5 и среднем для электрода Р6М5К5-К массопереносе.

Покрытия, полученные в режиме 2, исследовали методом РЭМ. На рис. 5 и 6 приведены топография поверхности и структура поперечного сечения покрытие—подложка.

Из рис. 5 видно, что покрытие, полученное электродом Р6М5К5 без введения керамической добавки, представляет собой наложение растекшихся капель расплава, образующегося в дуге импульсного разряда. В нем практически отсутствуют трещины, а в поверхностном слое наблюдаются микропоры. Толщина покрытия составляет 20–22 мкм, переходного слоя — 5–6 мкм. По данным РФА совместно с ЭДС (табл. 5) это покрытие состоит из γ -Fe. Образование

аустенита (γ -Fe) связано с высокими скоростями кристаллизации расплава из электродного материала, что практически представляет собой

процесс закалки [17]. В составе переходного слоя присутствуют Ni, Si и Mn, которые входят в состав подложки.

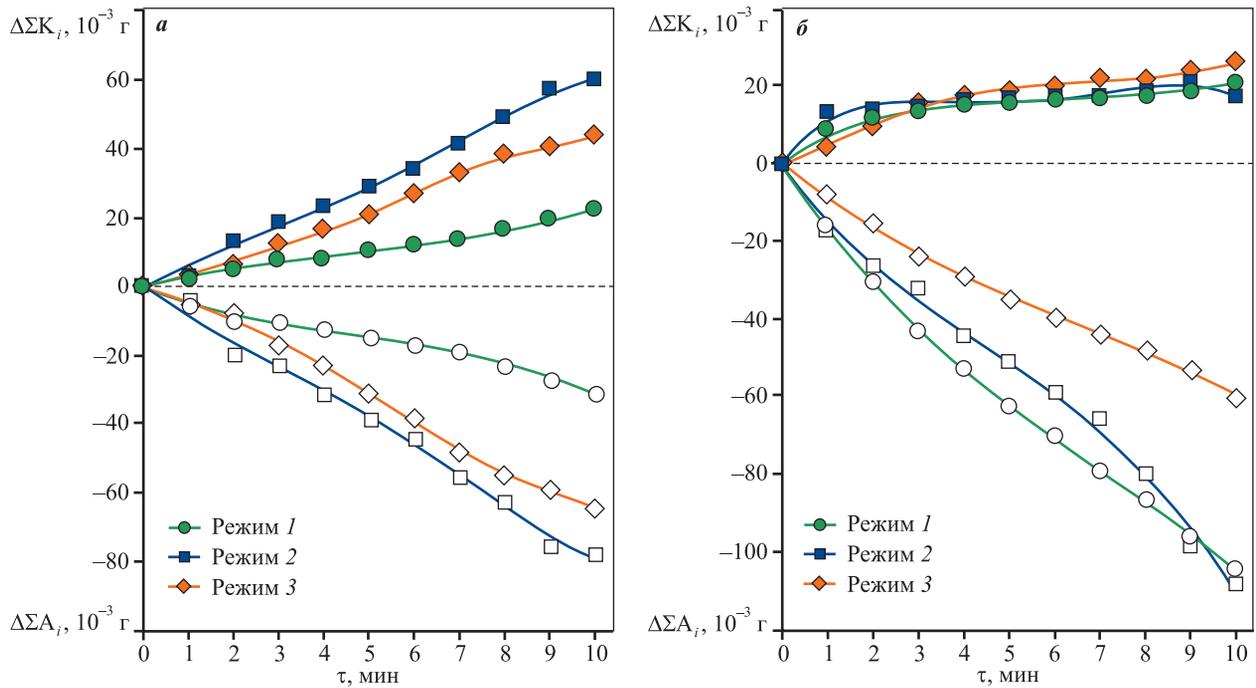


Рис. 3. Зависимости привеса массы катода ($\Delta\Sigma K_i$) и эрозии анода ($\Delta\Sigma A_i$) от длительности электроискровой обработки стали 5XhNM электродами Р6М5К5 (а) и Р6М5К5-К (б)

Fig. 3. Dependence of the mass gain of the cathode ($\Delta\Sigma K_i$) and the erosion of the anode ($\Delta\Sigma A_i$) on the duration of ESD of 5XhNM steel with R6M5K5 (a) and R6M5K5-K (b) electrodes

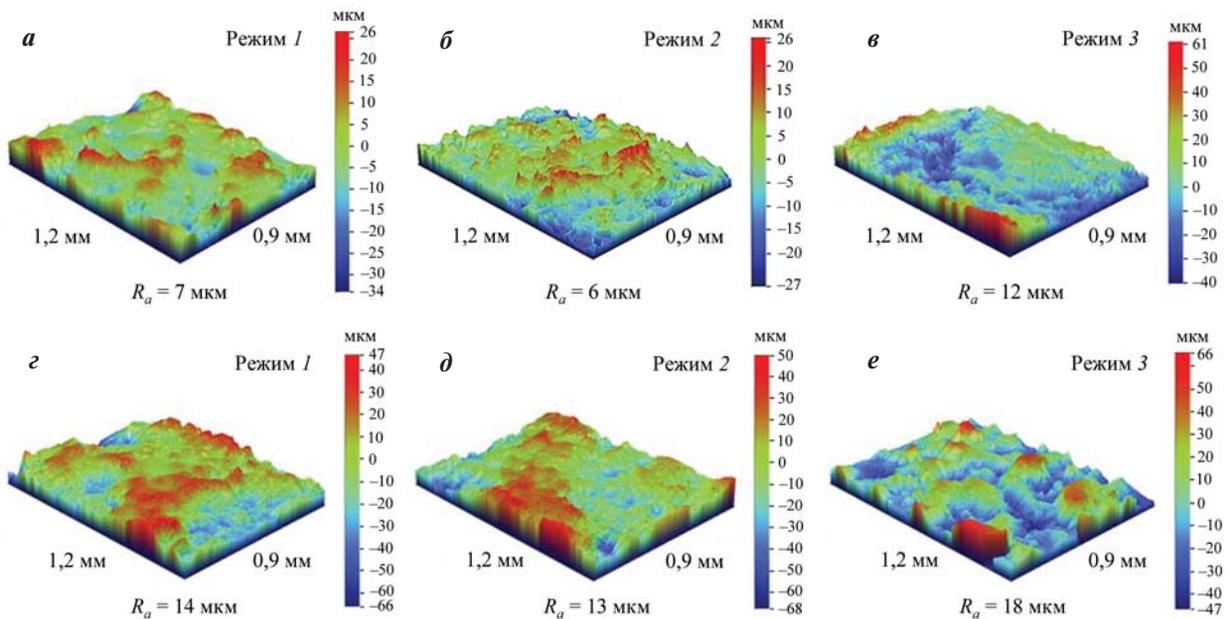


Рис. 4. Топография поверхности и шероховатость покрытий из электродов Р6М5К5 (а–в) и Р6М5К5-К (г–е) на ЭИО-режимах 1 (а, г), 2 (б, д), 3 (в, е)

Fig. 4. Surface topography and roughness of coatings deposited from R6M5K5 (a–c) and R6M5K5-K (d–e) electrodes in ESD modes 1 (a, g), 2 (b, d), and 3 (v, e)

По данным РФА покрытие из электрода Р6М5К5-К включает фазы α -Fe, HfO_2 , HfSiO_4 , Fe_3Si , и $\text{Fe}_3\text{В}$. Силикат гафния HfSiO_4 , вероятно, образуется в дуге разряда при взаимодействии оксида гафния, присутствующего в электроде, с оксидом кремния SiO_2 , который появляется при окислении кремния примесным кислородом.

При использовании металлокерамического электрода Р6М5К5-К отмечается повышение шероховатости поверхности и гетерогенности структуры покрытия. В табл. 6 приведены результаты ЭДС-анализа различных областей покрытия, отмеченных на рис. 6, б. Толщина покрытия изменяется от 20 до 30 мкм, а на отдельных участках достигает 50 мкм. При больших увеличениях можно различить мелкозернистую микроструктуру с размером зерна 0,3–0,6 мкм, наблюдается и

дендритная структура, похожая на эвтектику. Заметны дисперсные включения размером меньше 0,1 мкм. В матрице на основе железа растворены легирующие элементы как стали, так и керамической добавки.

Субмикронные и наноразмерные структурные составляющие покрытия исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). На рис. 7 представлены ПЭМ-изображения ламели до (рис. 7, а) и после (рис. 7, в) нагрева до 500 °С, а также дифракционные картины участков матрицы на основе α -Fe (рис. 7, б) и аморфной фазы на основе Fe–В (рис. 7, г). Место, из которого вырезали ламель, показано на рис. 6, б.

С помощью ПЭМ (см. рис. 7) и ЭДС-анализа (табл. 7) был идентифицирован состав кристалли-

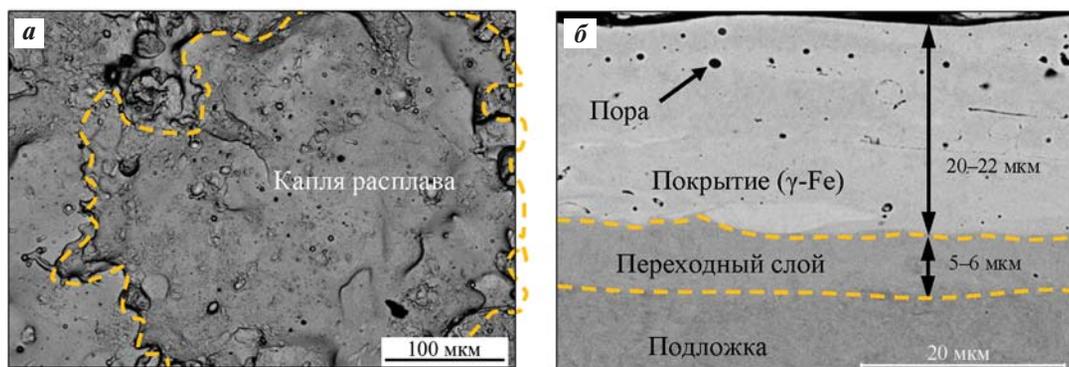


Рис. 5. РЭМ-изображения топографии (а) и структуры (б) покрытия (режим 2) из электрода Р6М5К5

Fig. 5. SEM images of the topography (a) and structure (b) of the coating (mode 2) deposited from R6M5K5 electrode

Таблица 5. Химический состав (ат.%) областей покрытия, полученного электродом Р6М5К5

Table 5. Chemical composition (at.%) of various areas within the coating deposited from R6M5K5 electrode

Область анализа	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
Покрытие	15,0	–	2,2	2,0	–	74,5	3,0	–	1,8	1,4
Переходный слой	9,4	0,6	–	0,7	1,0	86,8	0,0	1,6	–	0,1
Подложка	10,3	0,6	–	0,8	0,7	86,1	0,0	1,4	–	–

Таблица 6. Химический состав (ат.%) областей покрытия, отмеченных на рис. 6, б

Table 6. Chemical composition (at.%) of the coating areas marked in Fig. 6, б

Область	C	O	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Hf
1	–	66,3	–	–	–	–	1,9	–	–	31,8
2	16,2	–	13,9	1,4	1,5	–	59,0	–	6,4	1,5
3	23,8	34,1	5,5	1,2	1,4	–	25,8	–	6,8	1,4
4	24,4	40,8	4,5	0,7	–	0,4	25,7	–	3,3	0,2
5	11,6	–	0,8	–	0,5	0,8	84,7	1,5	–	–

Таблица 7. Химический состав (ат.%) областей, отмеченных на рис. 7, а

Table 7. Chemical composition (at.%) of the areas marked in Fig. 7, a

Область	Компонент	Fe	W	Mo	Hf	Si	Cr	V	Co	O
1	Кристаллическая матрица	84,7	1,2	4,0	–	4,8	1,4	0,5	2,0	–
2	Аморфная матрица	87,5	1,0	4,0	–	4,2	1,4	0,5	1,4	–
3	Частица на основе HfO ₂	4,6	–	–	31,0	–	–	–	–	64,4
4	Аморфная фаза Fe–B*	21,7	–	–	–	–	–	–	–	78,3

* Фаза определена исходя из дифракционной картины.

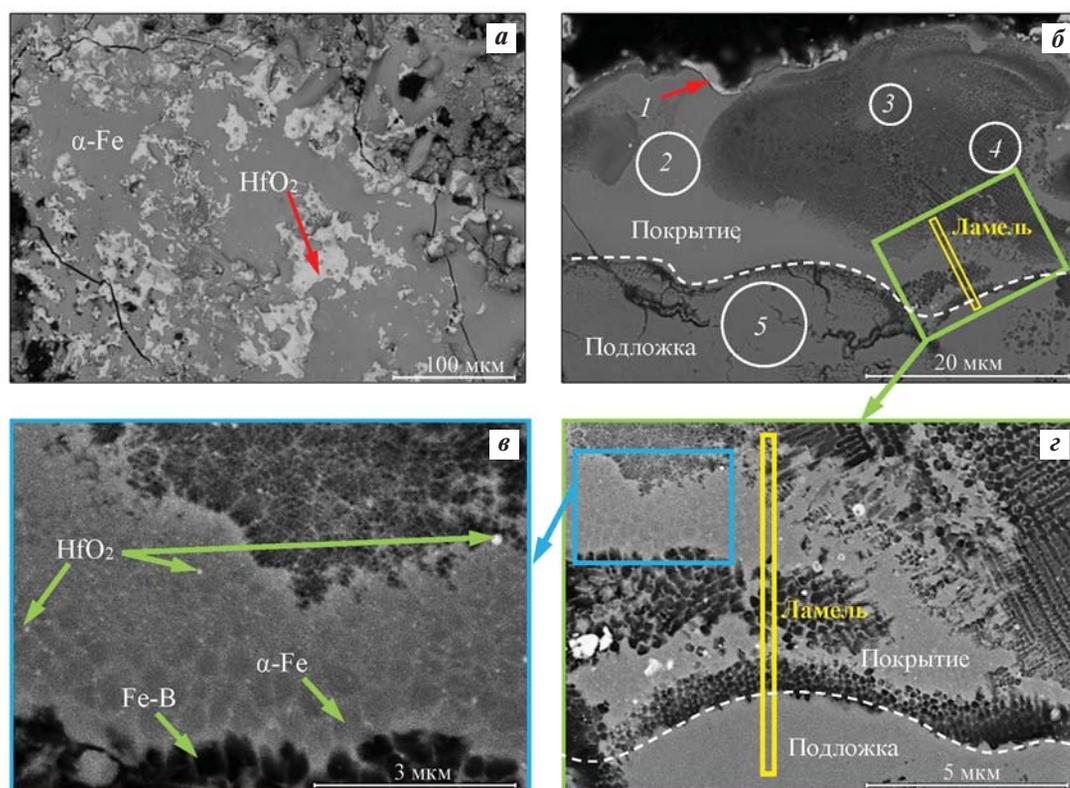


Рис. 6. РЭМ-изображения топографии поверхности (а) и микроструктуры (б–д) покрытия, полученного из электрода Р6М5К5-К

Fig. 6. SEM images of the surface topography (a) and the microstructure (b–d) of the coating deposited from R6M5K5-K electrode

ческой матрицы на основе α -Fe с аморфными прожилками аналогичного состава, что обусловлено как переохлаждением в процессе ЭИО, так и влиянием аморфизирующих элементов бора и кремния [30; 31]. Кроме того, обнаружена аморфная фаза Fe–B с включениями наночастиц боридов железа Fe₃B, которые выделяются при нагреве в результате распада аморфной матрицы на Fe₃B и α -Fe [32]. В объеме матрицы присутствуют наночастицы HfO₂ (размером 30–50 нм) и силицида железа Fe₃Si (15–20 нм).

По результатам измерительного наноиндентирования электроискровых покрытий, полученных при использовании электродов Р6М5К5 и Р6М5К5-К, построены распределения твердости по толщине покрытия (рис. 8). Видно, что твердость покрытия из электрода Р6М5К5-К составляет $15,8 \pm 0,4$ ГПа, что существенно выше, чем у покрытия из электрода Р6М5К5 – $9,1 \pm 0,4$ ГПа. Рост твердости обусловлен наличием в составе покрытия упрочняющих фаз HfO₂, HfSiO₄, Fe₃B, Fe₃Si.

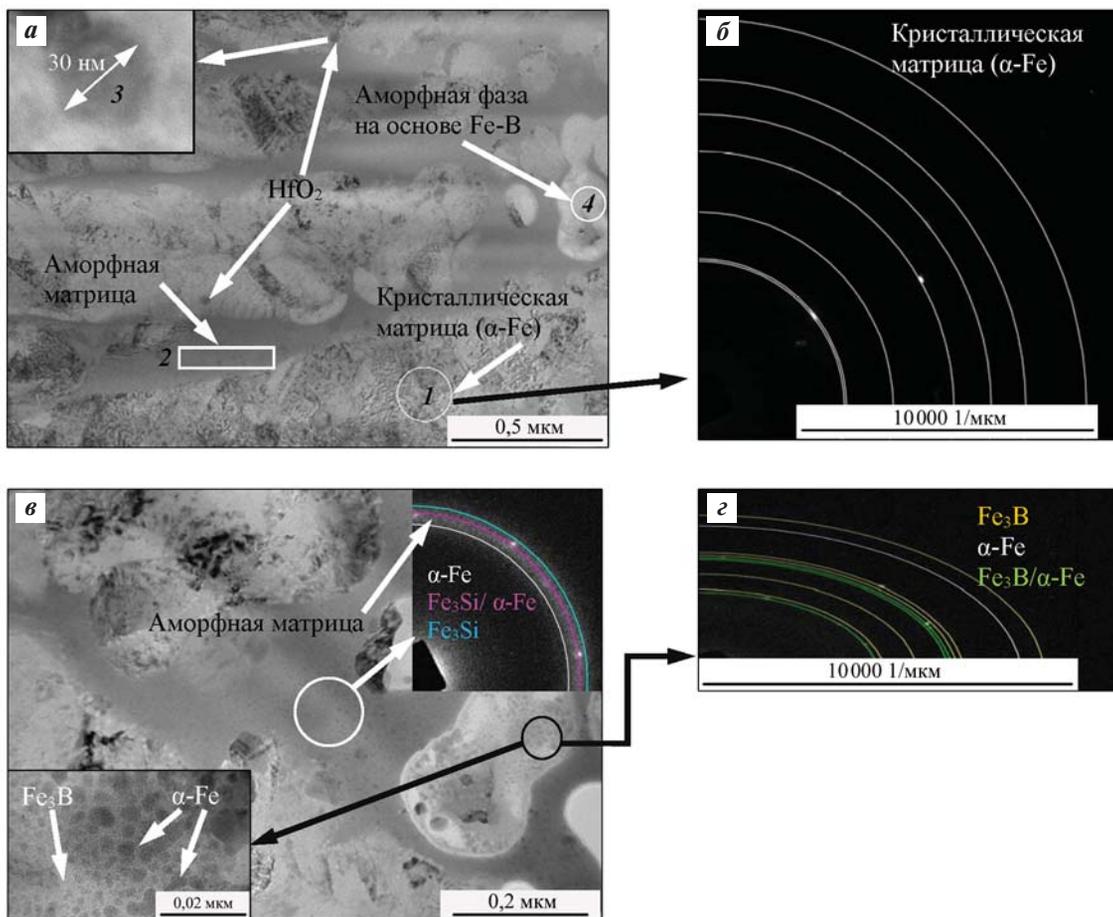


Рис. 7. ПЭМ- изображения покрытия из электрода Р6М5К5-К до (а) и после (в) нагрева ламели до 500 °С, а также дифракционная картина матрицы на основе α-Fe (б) и аморфной фазы Fe–В после нагрева (г)

Fig. 7. TEM images of the coating deposited from R6M5K5-K electrode before (a) and after (c) heating the lamella to 500 °C, diffraction pattern of α-Fe-based matrix (b) and Fe–B-based amorphous phase after heating (d)

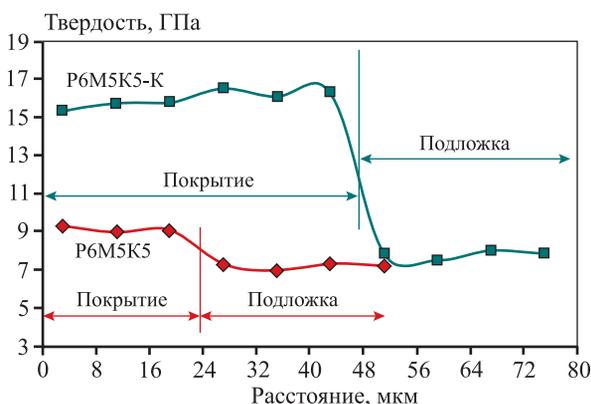


Рис. 8. Распределение твердости по толщине электроискровых покрытий из электродов Р6М5К5 и Р6М5К5-К

Fig. 8. Hardness distribution over the thickness of electrospark coatings deposited with R6M5K5 and R6M5K5-K electrodes

Высокотемпературные трибологические испытания

Важной характеристикой инструмента для изотермической штамповки является его износостойкость в условиях высокотемпературного трения. Несмотря на то, что трибологические испытания, проводимые по стандартной методике, несколько отличаются от реальных условий эксплуатации штампов, полученные результаты позволяют сделать вывод о влиянии покрытий на износостойкость.

На рис. 9 показаны зависимости коэффициента трения образцов стали 5ХНМ с покрытиями от длины пробега контртела при температуре 500 °С и 2D-изображения профилей дорожек износа.

Хотя коэффициенты трения для обоих покрытий близки и находятся в интервале 0,55–0,57,

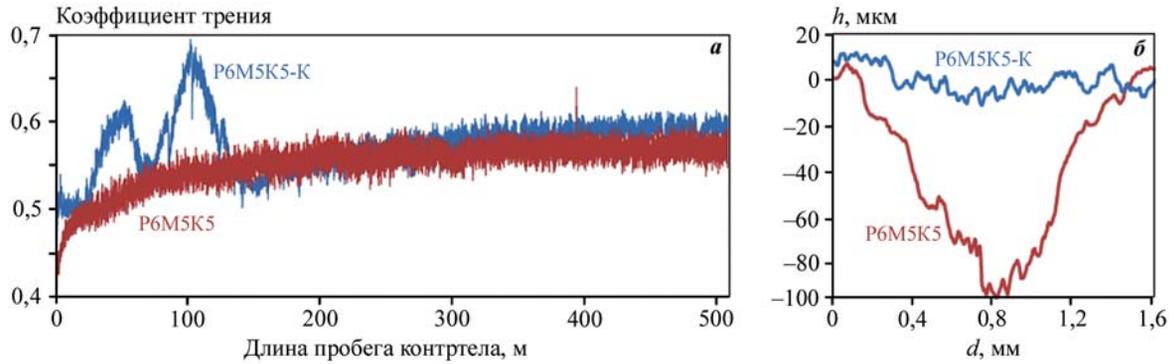


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения электроискровых покрытий из электродов Р6М5К5 и Р6М5К5-К от длины пробега контртела при температуре 500 °С (а) и 2D-профили дорожек износа (б)

Fig. 9. Dependence of the friction coefficient of electrospark coatings deposited from R6M5K5 and R6M5K5-K electrodes on the sliding distance of the counterbody at 500 °C (a) and 2D profiles of wear tracks (b)

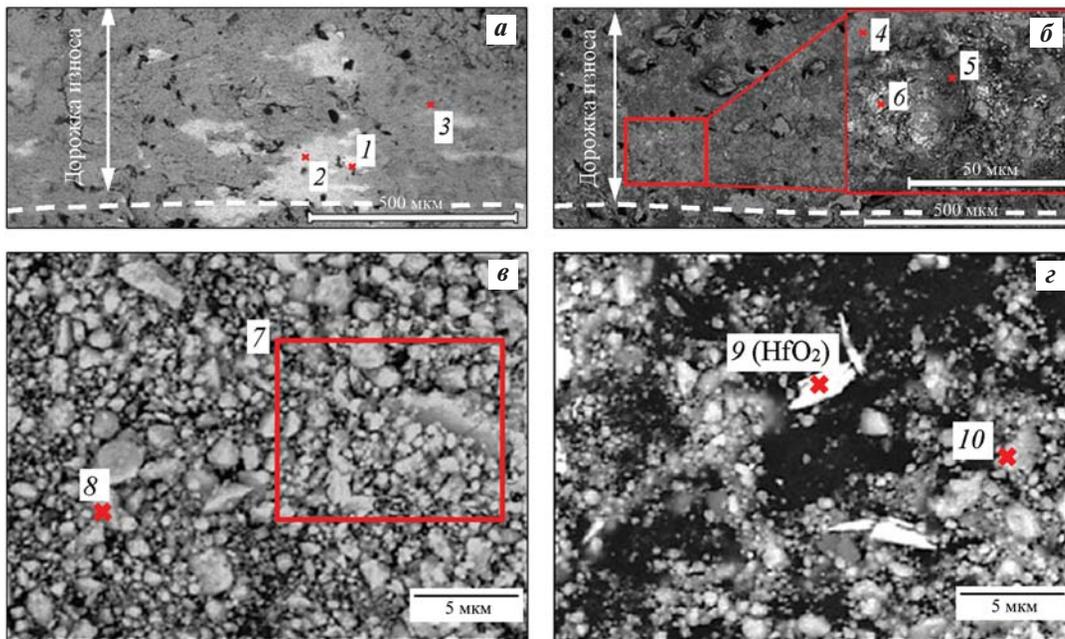


Рис. 10. РЭМ-изображения дорожек (а, б) и продуктов износа (в, г) при испытаниях электроискровых покрытий, полученных из электродов Р6М5К5 (а, в) и Р6М5К5-К (б, г)

Fig. 10. SEM images of tracks (a, b) and wear products (v, z) during the tests of electrospark coatings deposited from R6M5K5 (a, v) and R6M5K5-K (b, z) electrodes

значения приведенного износа отличаются существенно: $38,24 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}/\text{м}$ для покрытия из электрода Р6М5К5 и $2,82 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}/\text{м}$ для покрытия из Р6М5К5-К, что свидетельствует о повышенной износостойкости (в 13,5 раза) покрытия, содержащего упрочняющие фазы HfO₂, HfSiO₄, Fe₃B, Fe₃Si.

При этом незначительное колебание на начальном участке пробега (20—150 м) в случае покрытия из электрода Р6М5К5-К связано с приработкой контртела и удалением выступающих участков

шероховатой поверхности ($R_a = 13 \text{ мкм}$), а также выкрашиванием частиц HfO₂ в ходе испытаний, о чем свидетельствует их наличие в продуктах износа (рис. 10 и табл. 8).

Для обоих составов покрытий наблюдается окисление компонентов. Видно, что в ходе износа покрытия из электрода Р6М5К5 обнажаются и на поверхность выходят менее окисленные слои покрытия, в то время как покрытие из электрода Р6М5К5-К остается достаточно однородным и следы износа менее выражены.

Таблица 8. Химический состав (ат.%) областей на рис. 10

Table 8. Chemical composition (at.%) of areas in Fig. 10

Область	O	Si	V	Cr	Fe	Co	Mo	W	Hf
Дорожки износа (рис. 10, а, б)									
1	27,2	–	2,1	2,2	61,3	3,5	2,1	1,5	–
2	41,3	–	1,6	2,0	48,9	3,3	1,7	1,3	–
3	55,4	–	0,3	0,5	42,7	0,9	–	–	–
4	27,2	13,7	1,6	2,0	41,0	2,9	7,9	0,8	2,9
5	55,4	3,8	0,3	5,9	31,5	0,6	1,4	–	1,1
6	59,6	–	0,7	0,8	15,2	0,6	2,8	–	20,2
Продукты износа (рис. 10, в, г)									
7	54,0	0,8	–	3,6	41	–	0,6	–	–
8	42,7	–	1,5	1,5	50,8	–	1,9	1,6	–
9	45,2	5,4	0,7	3,5	28,7	–	2,1	–	14,4
10	47,1	9,7	0,7	1,5	32,4	1,0	3,3	–	4,3

Выводы

1. Из порошковой смеси быстрорежущей стали Р6М5К5 и Р6М5К5 с 40 %-ной добавкой боридно-силицидной керамики $\text{MoSi}_2\text{—MoB—HfB}_2$ получены электродные материалы для электроискровой обработки штамповой стали. По результатам исследования кинетики массопереноса и шероховатости установлен оптимальный режим обработки штамповой стали 5ХНМ, обеспечивающий минимальную шероховатость при удовлетворительном массопереносе.

2. Покрытие из электрода Р6М5К5, состоящее из аустенита, характеризуется высокой однородностью, имеет толщину 20–22 мкм и твердость $9,1 \pm 0,4$ ГПа. Покрытие из электрода с керамической добавкой Р6М5К5-К содержит равномерно распределенные упрочняющие фазы HfO_2 , HfSiO_4 , Fe_3Si , Fe_3B , имеет толщину 20–30 мкм и твердость $15,8 \pm 0,4$ ГПа. Размер дисперсных выделений HfO_2 составляет 30–50 нм, а Fe_3Si – 15–20 нм.

3. По результатам высокотемпературных трибологических испытаний установлена повышенная (в 13,5 раза) износостойкость покрытия, полученного при использовании электрода Р6М5К5-К: приведенный износ составил $2,82 \cdot 10^{-5}$ мм³/(Н·м) (что обеспечено образованием в структуре покрытия упрочняющих фаз) против $38,24 \cdot 10^{-5}$ мм³/(Н·м) у покрытия из электрода Р6М5К5.

Список литературы/References

1. Straffelini G., Bizzotto G., Zanon V. Improving the wear resistance of tools for stamping. *Wear*. 2010;269(9-10): 693–697. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.07.004>
2. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х. Упрочнение и увеличение ресурса объектов электроискровым методом: классификация, особенности технологии. *Электронная обработка материалов*. 2010;5:27–36. Ivanov V.I., Burumkulov F.Kh. Strengthening and increasing the service life of objects using the electrospark deposition method: classification, features of the technology. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2010;5:27–36. (In Russ.).
3. Иванов В.И. Повышение ресурса разделительных штампов путем упрочнения и восстановления их электроискровым легированием: Дис. ... канд. техн. наук. Саранск: ВНИИТУВИД «Ремдеталь», 2000.
4. Гадалов В.Н., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е., Романенко Д.Н., Калинин А.А., Филатов Е.А., Макарова И.А., Ворначева И.В. Повышение надежности оснастки и инструмента штампового оборудования. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017;11(2):114–124. Gadalov V.N., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Romanenko D.N., Kalinin A.A., Filatov E.A., Makarova I.A., Vornacheva I.V. Increase of reliability of tooling and instrument of the stamping equipment. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017;11(2):114–124. (In Russ.).
5. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Аксенов Л.Б., Пет-

- ров В.М. Применение технологии электроискрового легирования и перспективных наноструктурированных электродных материалов для повышения стойкости штамповой оснастки. *Металлург.* 2010;8:44–50.
- Kudryashov A.E., Levashov E.A., Aksenov L.B., Petrov V.M. Use of electric spark alloying technology and promising nanostructured electrode materials for improving the life of punching equipment. *Metallurgist.* 2010;54(7):514–522.
6. Tušek J., Kosec L., Lešnjak A., Muhič T. Electrospark deposition for die repair. *Metallurgiya.* 2012;51:17–20.
 7. Kuptsov K.A., Sheveyko A.N., Sidorenko D.A., Shtansky D.V. Electro-spark deposition in vacuum using graphite electrode at different electrode polarities: Peculiarities of microstructure, electrochemical and tribological properties. *Applied Surface Science.* 2021;566:150722. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150722>
 8. Kuptsov K.A., Antonyuk M.N., Sheveyko A.N., Shtansky D.V. Hydrophobic, anti-ice, wear- and corrosion-resistant C–(Ti)–PTFE coatings on Ti obtained by electrospark deposition using PTFE-impregnated graphite electrode. *Surface and Coatings Technology.* 2023;465:129621. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129621>
 9. Кудряшов А.Е., Кириуханцев-Корнеев Ф.В., Муканов С.К., Петржик М.И., Левашов Е.А. Влияние электроискровой обработки электродами из циркония на структуру и свойства никельсодержащего сплава, полученного селективным лазерным сплавлением. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2022;3:63–77. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2022-3-63-77>
Kudryashov A.E., Kiryukhantsev-Korneev P.V., Mukanov S.K., Petrzhik M.I., Levashov E.A. The effect of electrospark deposition using zirconium electrodes on structure and properties of nickel-containing alloy obtained selective laser melting. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2022;3:63–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2022-3-63-77>
 10. Tarellyk V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G., Konoplianchenko E.V., Martsynkovskiy V.S., Antoszewski B. Electrode materials for composite and multilayer electrospark-deposited coatings from Ni–Cr and WC–Co alloys and metals. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* 2017;55:585–595. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9843-2>
 11. Mukanov S.K., Baskov F.A., Petrzhik M.I., Levashov E.A. Electro-spark treatment with low-melting Al–Si and Al–Ca electrodes in order to improve wear and oxidation resistance of EP741NP alloy prepared by selective laser melting. *Metallurgist.* 2022;66:317–326. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01331-0>
 12. Renna G., Leo P., Casalino G., Cerri E. Repairing 2024 aluminum alloy via electrospark deposition process: A feasibility study. *Advances in Materials Science and Engineering.* 2018:8563054. <https://doi.org/10.1155/2018/8563054>
 13. Kandeve M., Kostadinov G., Penyashki T., Kamburov V., Petrzhik M., Elenov B., Nikolov A., Dimitrova R., Valkanov S. Abrasive wear resistance of electrospark coatings on titanium alloys. *Tribology in Industry.* 2022;44:132–142. <https://doi.org/10.24874/ti.1143.06.21.09>
 14. Kostadinov G., Danailov P., Dimitrova R., Kandeve M., Penyashki T., Kamburov V., Nikolov A., Elenov B. Surface topography and roughness parameters of electrospark coatings on titanium and nickel alloys. *Applied Engineering Letters Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2021;6:89–98. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2021.6.3.1>
 15. Burkov A., Pyachin S. Investigation of WC–Co electrospark coatings with various carbon contents. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2014;23:2034–2042. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0974-z>
 16. Burkov A., Pyachin S. Formation of WC–Co coating by a novel technique of electrospark granules deposition. *Materials & Design.* 2015;80:109–115. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.008>
 17. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: A short review. *Coatings.* 2022;12:1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>
 18. Kuz'min M.P., Chu P.K., Qasim A.M., Larionov L.M., Kuz'mina M.Yu., Kuz'min P.B. Obtaining of Al–Si foundry alloys using amorphous microsilica — Crystalline silicon production waste. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019;806:806–813. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.312>
 19. Kuz'min M.P., Kuz'mina M.Yu., Kuz'min P.B. Possibilities and prospects for producing silumins with different silicon contents using amorphous microsilica. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2020;30(5):1406–1418. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65306-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65306-7)
 20. Chengyong W., Xie Y., Zheng L., Qin Z., Tang D., Song Y. Research on the chip formation mechanism during the high-speed milling of hardened steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 2014;79:31–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.01.002>
 21. Дворник М.И., Михайленко Е.А. Создание ультрамелкозернистого твердого сплава WC–15Co из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов сплава ВК15 в воде. *Известия*

- вузов. *Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020;(3):4–16.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-3-4-16>
- Dvornik M.I., Mikhailenko E.A. Production of WC–15Co ultrafine-grained hard alloy from powder obtained by VK15 alloy waste spark erosion in water. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2020;(3):4–16. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-3-4-16>
22. Potanin A.Yu., Vorotilo S., Pogozhev Yu.S., Rupasov S.I., Lobova T.A., Levashov E.A. Influence of mechanical activation of reactive mixtures on the microstructure and properties of SHS-ceramics MoSi₂–HfB₂–MoB. *Ceramics International*. 2019;45(16):20354–20361.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.009>
23. Zamulaeva E.I., Sheveyko A.N., Kaplanskii Y.Y., Levashov E.A. Structure formation and tribological properties of Mo–Si–B–Hf electrospark coatings based on Mo₂Ni₃Si laves phase. *Materials*. 2022;15(16):5613.
<https://doi.org/10.3390/ma15165613>
24. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
25. Nan Chen, Ren Luo, Huiwen Xiong, Zhiyou Li. Dense M2 high speed steel containing core-shell MC carbonitrides using high-energy ball milled M2/VN composite powders. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;771(138628).
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138628>
26. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М.: Наука, 1988. 200 с.
27. Huyan F., Larker R., Rubin P. Effect of solute silicon on the lattice parameter of ferrite in ductile irons. *ISIJ International*. 2014;54:248–250.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.248>
28. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3 т. Т. 2. Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. 1024 с.
29. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3 т. Т. 3. Кн. 1. Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2001. 872 с.
30. Ozden M.G., Morley N.A. Laser additive manufacturing of Fe-based magnetic amorphous alloys. *Magnetochemistry*. 2021;7:20.
<https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7020020>
31. Fakoori Hasanabadi M., Malek Ghaini F., Ebrahimnia M., Shahverdi H.R. Production of amorphous and nanocrystalline iron based coatings by electro-spark deposition process. *Surface and Coatings Technology*. 2015;270:95–101.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.016>
32. Hamaguchi T., Nakamura R., Asano K., Wada T., Suzuki T. Diffusion of boron in an amorphous iron-boron alloy. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023; 601:122070.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.122070>

Информация об авторах

Аманкельды Ахметов – инженер научного проекта кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий (ПМиФП) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (НИТУ МИСИС).

<https://orcid.org/0000-0002-1606-838X>
 E-mail: amanlaotero@gmail.com

Жанна Владимировна Еремеева – д.т.н., профессор кафедры ПМиФП, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-1790-5004>
 E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Александр Евгеньевич Кудряшов – к.т.н., вед. науч. сотрудник лаборатории «In situ диагностика структурных превращений» Научно-учебного центра (НУЦ) СВС МИСИС–ИСМАН.

<https://orcid.org/0000-0001-6222-4497>
 E-mail: aekudr@yandex.ru

Павел Александрович Логинов – к.т.н., ст. преподаватель кафедры ПМиФП 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

Information about the authors

Amankeldy Akhmetov – Engineer of Scientific Project of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings (PM&FC), National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS).

<https://orcid.org/0000-0002-1606-838X>
 E-mail: amanlaotero@gmail.com

Zhanna V. Ereemeeva – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of PM&FC, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0002-1790-5004>
 E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Alexander E. Kudryashov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory “In Situ Diagnostics of Structural Transformations” of Scientific-Educational Center of SHS (SHS-Center) of MISIS–ISMAN.

<https://orcid.org/0000-0001-6222-4497>
 E-mail: aekudr@yandex.ru

Pavel A. Loginov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of PM&FC 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

Сергей Дмитриевич Шляпин – д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение и технология обработки материалов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета); ведущий эксперт по проектам НИТУ МИСИС.
<https://orcid.org/0000-0002-1323-2623>
 E-mail: sshliapin@yandex.ru

Марина Евгеньевна Самошина – к.т.н., начальник отдела ученых степеней, ученый секретарь диссертационного совета НИТУ МИСИС.
<https://orcid.org/0009-0000-2773-3122>
 E-mail: samoshina@list.ru

Евгений Александрович Левашов – д.т.н., акад. РАЕН, профессор, зав. кафедрой ПМиФП НИТУ МИСИС; директор НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН.
<https://orcid.org/0000-0002-0623-0013>
 E-mail: levashov@shs.misis.ru

Sergey D. Shlyapin – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Materials Science and Materials Processing Technology, Moscow Aviation Institute (National Research University); Lead Project Expert of NUST MISIS.
<https://orcid.org/0000-0002-1323-2623>
 E-mail: sshliapin@yandex.ru

Marina E. Samoshina – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Division of Academic Degrees, Academic Secretary of NUST MISIS Dissertation Board.
<https://orcid.org/0009-0000-2773-3122>
 E-mail: samoshina@list.ru

Evgeny A. Levashov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academic of the Russian Academy of Natural Science, Head of the Department of PM&FC of NUST MISIS, Head of SHS-Center of MISIS–ISMAN.
<https://orcid.org/0000-0002-0623-0013>
 E-mail: levashov@shs.misis.ru

Вклад авторов

А. Ахметов – проведение экспериментов, подготовка текста статьи.

Ж.В. Еремеева – исследование особенностей консолидации порошковых смесей, анализ микроструктуры электродных материалов, участие в обсуждении результатов.

А.Е. Кудряшов – исследование особенностей процесса электроискровой обработки рассматриваемыми электродами, анализ микроструктуры сформированных покрытий, участие в обсуждении результатов.

П.А. Логинов – исследование методом просвечивающей электронной микроскопии.

С.Д. Шляпин – составление и редактирование текста статьи, участие в обсуждении результатов.

М.Е. Самошина – редактирование текста статьи, участие в обсуждении результатов.

Е.А. Левашов – концептуализация проводимых исследований, составление и редактирование текста статьи, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the authors

A. Akhmetov – conducting experiments, manuscript writing.

Zh.V. Ereemeeva – investigating consolidation features of powder mixtures, analyzing the microstructure of electrode materials, participating in result discussions.

A.E. Kudryashov – exploring electrospark deposition characteristics using the specified electrodes and analyzing the microstructure of the resulting coatings; participating in result discussions.

P.A. Loginov – conducting research using transmission electron microscopy.

S.D. Shlyapin – drafting and editing the manuscript, participating in the discussion of the results.

M.E. Samoshina – editing the manuscript, participating in result discussions.

E.A. Levashov – conceptualizing the research, contributed to the drafting and editing of the manuscript, and participated in the discussion of the findings.

Статья поступила в редакцию 01.12.2023, доработана 22.01.2024, подписана в печать 24.01.2024

The article was submitted 01.12.2023, revised 22.01.2024, accepted for publication 24.01.2024