

УДК 621.9.048.4

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-59-70

## Кинетика осаждения, структура и свойства электроискровых покрытий Cr–Al–Si–B на жаропрочном никелевом сплаве

© 2015 г. **А.Е. Кудряшов, Д.Н. Лебедев, А.Ю. Потанин, Н.В. Швындина, И.В. Сухорукова, Д.В. Штанский, Е.А. Левашов**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 28.08.15 г., подписана в печать 19.10.15 г.

Исследована кинетика осаждения электроискровых покрытий на жаропрочном никелевом сплаве ЭП718-ИД при использовании трех составов СВС-электродов системы Cr–Al–Si–B. Установлен оптимальный частотно-энергетический режим нанесения ( $E = 0,048$  Дж,  $I = 120$  А,  $f = 3200$  Гц,  $\tau = 20$  мкс), характеризующийся минимальной величиной эрозии электрода при удовлетворительной скорости осаждения покрытий. Проведены комплексные исследования структуры, фазового состава и свойств покрытий. Показано, что электроискровые покрытия, сформированные электродами Cr–Al–Si–B, заметно повышают твердость, жаростойкость и износостойкость никелевого сплава ЭП718-ИД и могут быть рекомендованы для защиты поверхности ответственных деталей и узлов из никелевых сплавов.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование (ЭИЛ), частота и энергия разряда, электрод, покрытие, подложка, состав, окисление, износостойкость, коэффициент трения.

**Кудряшов А.Е.** – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Научно-учебного центра (НУЦ) СВС МИСиС–ИСМАН (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). Тел./факс: (495) 955-00-26. E-mail: aekudr@rambler.ru.

**Лебедев Д.Н.** – аспирант НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел./факс: (495) 955-00-26. E-mail: nikolovich92@bk.ru.

**Потанин А.Ю.** – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (499) 237-53-36. E-mail: a.potantin@inbox.ru.

**Швындина Н.В.** – вед. инженер НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (495) 638-44-42. E-mail: natali19-03@list.ru.

**Сухорукова И.В.** – инженер науч.-иссл. лаборатории неорганических наноматериалов МИСиС. Тел.: (495) 638-44-47. E-mail: irina\_bttn@mail.ru.

**Штанский Д.В.** – докт. физ.-мат. наук., проф. кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий МИСиС, гл. науч. сотр. НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (499) 236-66-29. E-mail: shtansky@shs.misis.ru.

**Левашов Е.А.** – докт. техн. наук., проф., акад. РАЕН, зав. кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий МИСиС, директор НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (495) 638-45-00. E-mail: levashov@shs.misis.ru.

**Для цитирования:** Кудряшов А.Е., Лебедев Д.Н., Потанин А.Ю., Швындина Н.В., Сухорукова И.В., Штанский Д.В., Левашов Е.А. Кинетика осаждения, структура и свойства электроискровых покрытий Cr–Al–Si–B на жаропрочном никелевом сплаве // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2015. No. 4. С. 59–70. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-59-70.

*Kudryashov A.E., Lebedev D.N., Potanin A.Yu., Shvyndina N.V., Sukhorukova I.V., Shtansky D.V., Levashov E.A.*

### **Kinetics of deposition, structure, and properties of Cr–Al–Si–B electric-discharge coatings on refractory nickel alloy**

The deposition kinetics of electrospark coatings on EP718-ID heatproof nickel alloy is investigated using three compositions of SHS electrodes of the Cr–Al–Si–B system. The optimal frequency–energy deposition mode ( $E = 0,048$  J,  $I = 120$  A,  $f = 3200$  Hz, and  $\tau = 20$   $\mu$ s), which is characterized by a minimal electrode erosion with the satisfactory coating deposition rate, is established. Complex investigations into the structure, phase composition, and properties of coatings are performed. It is shown that electrospark coatings formed by Cr–Al–Si–B electrodes noticeably increase hardness, heat resistance, and wear resistance of EP718-ID nickel alloy and can be recommended to protect the surface of important parts and units made of nickel alloys.

**Keywords:** electrospark alloying (ESA), discharge frequency and energy, electrode, coating, substrate, composition, oxidation, wear resistance, friction coefficient.

**Kudryashov A.E.** – Ph. D., leading research scientist of Scientific-educational centre SHS MISIS–ISMAN (119049, Russia, Moscow, Leninsky prospect, 4). Tel./fax: (495) 955-00-26. E-mail: aekudr@rambler.ru.

**Lebedev D.N.** – postgraduate student of Scientific-educational centre SHS MISIS–ISMAN. Tel./fax: (495) 955-00-26. E-mail: nikolovich92@bk.ru.

**Potantin A.Yu.** – Ph. D., junior researcher of Scientific-educational centre SHS MISIS–ISMAN. Tel.: (499) 237-53-36. E-mail: a.potantin@inbox.ru.

**Shvyndina N.V.** – leading engineer of Scientific-educational centre SHS MISIS–ISMAN. Tel.: (495) 638-44-42. E-mail: natali19-03@list.ru.

**Sukhorukova I.V.** – engineer of Scientific-research laboratory of inorganic nanomaterials, MISIS (119049, Russia, Moscow, Leninsky prospect, 4). Tel.: (495) 638-44-47. E-mail: irina\_bttn@mail.ru.

**Shtansky D.V.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor of the Department of powder metallurgy and functional coatings MISIS, chief research scientist of Scientific-educational centre SHS MISIS–ISMAN. Tel.: (499) 236-66-29. E-mail: shtansky@shs.misis.ru

**Levashov E.A.** – Dr. Sci. (Tech.), prof., acad. of RANS, head of Department of powder metallurgy and functional coatings MISIS, head of Scientific-educational centre SHS MISIS–ISMAN. Tel.: (495) 638-45-00. E-mail: levashov@shs.misis.ru.

**Citation:** Kudryashov A.E., Lebedev D.N., Potanin A.Yu., Shvyndina N.V., Sukhorukova I.V., Shtansky D.V., Levashov E.A. Kinetika osazhdeniya, struktura i svoystva elektroiskrovyykh pokrytii Cr–Al–Si–B na zharoprochnom nikel'evom splave. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2015. No. 4. С. 59–70. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-59-70.

## Введение

Развитие авиационной промышленности во многом определяет формирование машиностроительного комплекса и оказывает существенное влияние на экономику. Двигателестроение является высокочрезвычайно затратной отраслью машиностроения по применяемым материалам и комплектующим изделиям, энергоёмкости и трудоёмкости технологических операций [1].

Для повышения сроков службы ответственных деталей из никелевых сплавов широко используются защитные покрытия, которые наносят различными методами инженерии поверхности [2]. Наиболее эффективным способом защиты от окисления при высоких температурах является введение в состав сплава элементов, образующих термодинамически прочные оксидные соединения. Основные элементы, способствующие созданию защитного слоя на железоуглеродистых, никелевых и других сплавах, — это хром, алюминий и кремний. Они окисляются при высоких температурах на воздухе легче, чем легируемый металл, и образуют сплошную защитную оксидную пленку [2].

Одним из перспективных методов осаждения покрытий является электроискровое легирование (ЭИЛ) [3–13], которое находит применение для защиты от окисления никелевых сплавов [14, 15]. К достоинствам ЭИЛ-покрытий относятся высокая адгезия, возможность локальной обработки поверхности, в том числе крупногабаритных изделий, относительная простота реализации, отсутствие жестких требований к подготовке поверхности перед нанесением, высокая надежность оборудования [3, 16, 17]. Технологический процесс нанесения покрытий является экологически чистым, характеризуется низким энергопотреблением, высокой рентабельностью и быстрой самоокупаемостью инвестиций.

В качестве электродных материалов применяют металлы, графит, твердые сплавы на основе карбида вольфрама марок ВК и ТК. Однако покрытия из этих электродных материалов не обеспечивают высокий уровень жаростойкости никелевых сплавов, работающих в экстремальных условиях. Поэтому разработка новых составов электродов, содержащих оксидообразующие элементы и позволяющих получать жаростойкие и износостойкие покрытия с высокими эксплуатационными свойствами, является важной и актуальной задачей.

Цель данной работы состояла в изучении особенностей формирования, состава, структуры и свойств электроискровых покрытий на подложках из жаропрочного сплава ЭП718-ИД при использовании электродных материалов системы Cr–Al–Si–B.

## Материалы и методы исследований

В качестве электродов (анодов) были использованы сплавы Cr–Al–Si–B, полученные по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [18]. Химический и фазовый составы отобранных электродных материалов приведены в табл. 1.

Подложкой (катодом) служил распространенный жаропрочный никелевый сплав ЭП718-ИД (ХН45МВТЮБР-ИД), широко применяемый в двигателестроении. Состав сплава соответствует ТУ14-1-3905-85 (C ≤ 0,1 %; Cr ~ 14,0÷16,0; Ni ~ 43,0÷47,0; Fe ~ 22,0÷33,0; Mo ~ 4,0÷5,2; W ~ 2,5÷3,2; Nb ~ 0,8÷1,5; Ti ~ 1,9÷2,4; Al ~ 0,9÷1,4; Mn ~ 0,60; Si ~ 0,30; Zr ~ 0,02; Ce ~ 0,10; B ~ 0,008; S ~ 0,010; P ~ 0,015).

Размер образцов для исследований составлял 10×10×5 мм, площадь обрабатываемой поверхности — 1 см<sup>2</sup>. Размер образцов для трибологических испытаний — 21×21 мм.

Таблица 1. Химический и фазовый составы и свойства электродных материалов

Электродный материал	Содержание, %				Фазовый состав, %	ρ, г/см <sup>3</sup>	П, %
	Cr	Al	Si	B			
Состав 1	69,4	8,1	12,0	10,5	65CrB + 27Cr(Si,Al) <sub>2</sub> + 8Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> B <sub>x</sub>	5,3	13,2
Состав 2	65,8	16,2	12,0	6,0	35CrB + 26Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> + 39Cr <sub>4</sub> Al <sub>11</sub>	4,9	8,2
Состав 3	63,4	21,6	12,0	3,0	15CrB + 24Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> + 57Cr <sub>4</sub> Al <sub>11</sub> + 4Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> B <sub>x</sub>	4,7	2,1

Таблица 2. Энергетические режимы ЭИЛ-обработки

Режим	Напряжение $U$ , В	Амплитудное значение тока $I$ , А	Длительность импульса $\tau$ , мкс	Энергия единичного импульсного разряда $E$ , Дж	Частота $f$ , Гц	Суммарная энергия импульсных разрядов за 1 мин, $\Sigma E^*$ , кДж·мин <sup>-1</sup>
1	20	120	20	0,048	3200	9,2
2	20	120	40	0,096	1600	9,2
3	20	120	80	0,192	800	9,2

\* $\Sigma E = Ef60$  с.

Для нанесения покрытий использовали серийно выпускаемую электроискровую установку «Alier-Metal 303», имеющую микропроцессорное управление и выполненную по схеме независимого генератора (отсутствие синхронизации импульсов тока с частотой касания электрода с деталью). Частота вибрации электрода-анода составляла 600 Гц. Применяемые частотно-энергетические режимы электроискровой обработки приведены в табл. 2.

Данные режимы ЭИЛ характеризуются одинаковыми силой тока (120 А) и величиной суммарной энергии импульсных разрядов (за промежуток времени), но различаются по частоте и длительности импульсных разрядов. Осаждение покрытий проводили на воздухе поочередным локальным воздействием импульсного разряда на все участки обрабатываемой поверхности путем многократного прохождения анода над одним и тем же участком катода.

Кинетику массопереноса (удельную эрозию анода  $\Delta A$  и удельный привес катода  $\Delta K$ ) снимали гравиметрическим методом на аналитических весах марки KERN 770 с точностью  $10^{-5}$  г через каждую минуту легирования.

Суммарный привес катода  $\Sigma \Delta K$  [3, 16] определяли по формуле

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

где  $\Delta K_i$  — привес катода за  $i$ -ю минуту легирования, г;  $i = 1, 2, \dots, 10$ , мин;  $\rho$  — плотность электродного материала, г/см<sup>3</sup>.

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

Шлифы готовили на полировальной машине «Roto Pol-21» фирмы «Struers» (Дания) в автоматическом режиме. Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе «Neophot-32» (Герма-

ния) и сканирующем электронном микроскопе «Hitachi S-3400N» (Япония), оснащенном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром NORAN. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М при нагрузке 20 г по ГОСТ 9450-76. Рентгеноструктурный фазовый анализ (РФА) покрытий проводили на дифрактометре ДРОН-4 с использованием монохроматического  $\text{CuK}\alpha$ -излучения (длина волны 1,54178 Å). Съемка велась в режиме шагового сканирования в интервале углов  $2\theta = 10 \div 110^\circ$ , шаг съемки составлял  $0,1^\circ$ , экспозиция —  $2 \div 5$  с.

Испытания на жаростойкость выполнены в электропечи марки SNOL 7,2/1200 (Литва) при температуре 700 °С и выдержке 40 ч. Показатель окисления ( $\Delta m_S$ ) (изменение массы образца в результате окисления, отнесенное к единице поверхности) определяли по формуле

$$\Delta m_S = (m_1 - m_0)/S_0, \quad (2)$$

где  $m_0$  — начальная масса образца, г;  $m_1$  — масса образца с продуктами окисления, г;  $S_0$  — площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Трибологические свойства покрытий оценивали в соответствии с международными стандартами ASTM G 99-959 и DIN 50324 на высокотемпературной машине трения «High-temperature Tribometer» («CSM Instruments», Швейцария) по схеме pin-on-disk. В качестве контртела брали шарик из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диаметром 6 мм. Линейная скорость скольжения образцов с покрытием выбрана равной 10 см/с, нагрузка — 1 Н. Температура эксперимента составляла 500 °С. Зависимость коэффициента трения трущейся пары от длины пробега контртела (300 м) строилась на компьютере с помощью программного обеспечения «InstrumX».

Профиль дорожки износа и шероховатость покрытий (среднее арифметическое отклонение

профиля —  $R_a$ ) исследовали на оптическом профилометре «Veeco WYKONT NT 1100» (США).

Скорость износа рассчитывали по формуле

$$W = sL/(Hl), \quad (3)$$

где  $W$  — скорость износа,  $\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $L$  — длина окружности, мм;  $s$  — площадь сечения износа канавки,  $\text{мм}^2$ ;  $H$  — нагрузка, Н;  $l$  — путь трения, м.

Состав продуктов износа анализировали с помощью ИК-спектроскопии на вакуумном инфракрасном Фурье-спектрометре «Bruker Vertex 70v» (Германия) с приставкой НПВО (неполного внутреннего отражения). В качестве фона использовался вакуум. Для всех спектров применялась коррекция базовой линии. Измерение спектров проводилось в спектральном диапазоне 400—4000  $\text{см}^{-1}$ . Разрешение составляло 4  $\text{см}^{-1}$ .

## Результаты исследований и их обсуждение

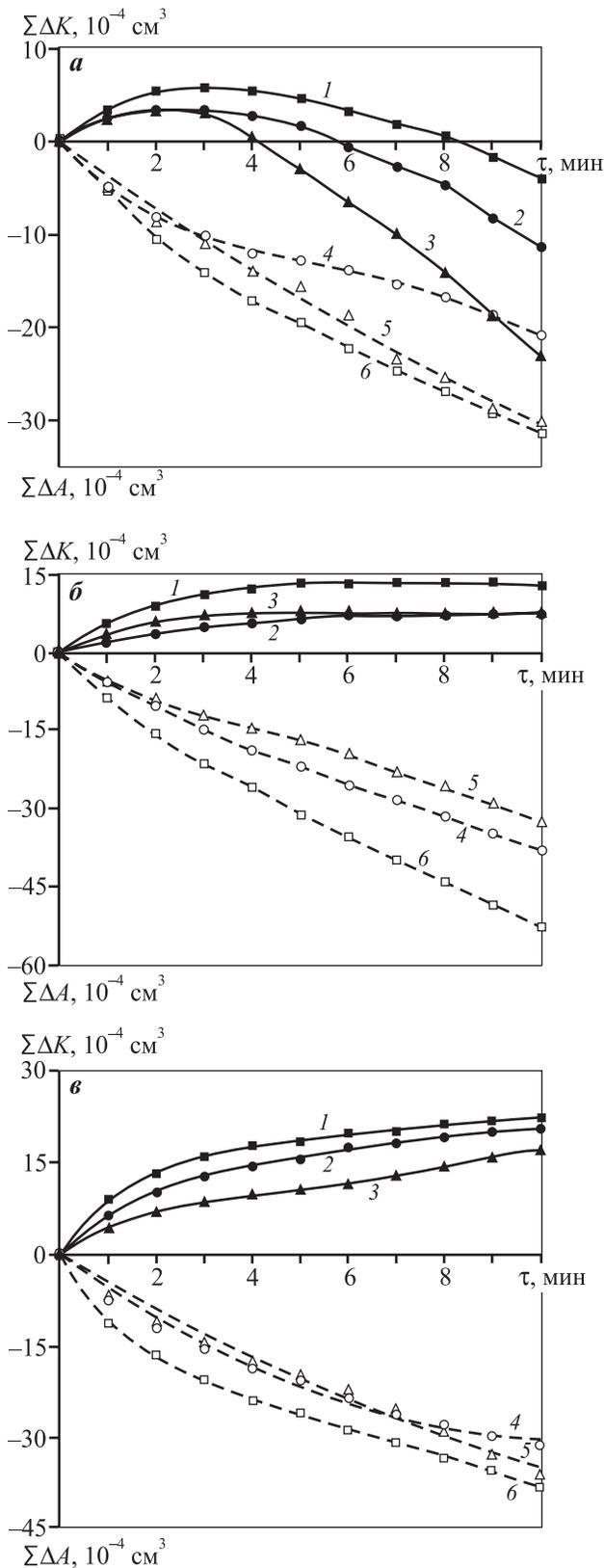
В практике ЭИЛ для получения информации об электродном материале снимают зависимости суммарной эрозии анода  $\Sigma\Delta A$  и суммарного привеса катода  $\Sigma\Delta K$  от времени обработки. Такие зависимости позволяют определить интенсивность переноса электродного материала на деталь и толщину формируемого покрытия, а косвенно — дают представление о динамике роста покрытия. На основе этих зависимостей задают частотно-энергетические параметры процесса ЭИЛ. На рис. 1, а показана зависимость суммарного привеса катода и суммарной эрозии анода от времени ЭИЛ электродным материалом  $65\% \text{CrV} + 27\% \text{Cr}(\text{Si}, \text{Al})_2 + 8\% \text{Cr}_3\text{Si}_3\text{B}_x$  (состав 1) при варьировании энергии единичных импульсных разрядов. Видно, что с увеличением времени ЭИЛ растет суммарная эрозия анода. Максимальная эрозия наблюдается на высокоэнергетическом режиме при  $E = 0,192$  Дж.

Зависимости суммарного привеса катода от времени ЭИЛ более сложные, они имеют характерный максимум. В начальный период (2—3 мин) прирост  $\Sigma\Delta K$  достигает своего максимума, а дальнейшая обработка приводит к убыли массы подложки. После 10-минутного ЭИЛ масса катода-подложки с покрытием оказывается меньше массы исходных образцов, что связано с образованием на электроде-аноде вторичной структуры

и более интенсивной эрозией подложки. Минимальная величина  $\Sigma\Delta K$  установлена при использовании высокочастотного режима обработки 1 (см. табл. 2 и рис. 1, а).

На рис. 1, б и в приведены зависимости суммарного привеса катода и суммарной эрозии анода от времени ЭИЛ для электродов соответственно составов 2 и 3. По сравнению с электродом состава 1 характер временных зависимостей  $\Sigma\Delta A$  для электродов составов 2 и 3 качественно не изменился, в отличие от суммарного привеса катода. При обработке составом 2, в зависимости от энергии импульсного разряда, прирост массы катода наблюдался до 5—7 мин. При дальнейшей обработке скорость формирования покрытий снижается. Прибавка массы на катоде происходила на протяжении всех 10 мин ЭИЛ в случае состава 3, характеризующегося меньшим содержанием тугоплавкой фазы бориды хрома и большим количеством алюминиды и силициды хрома. Максимальная величина  $\Sigma\Delta K$  отмечена на высокоэнергетическом режиме 1 (см. табл. 2).

Результаты измерений топографии поверхности образцов представлены в табл. 3. Видно, что электроискровая обработка приводит к росту шероховатости поверхностного слоя от  $R_a = 0,38$  мкм (образец без покрытия) до  $R_a = 8,49$  мкм. С увеличением энергии единичных импульсных разрядов параметр  $R_a$  уменьшается только в случае электрода состава 1. Это связано с особенностями формирования электроискровых покрытий. На торце электрода состава 1, имеющего большое содержание тугоплавкого бориды хрома, после определенного времени ЭИЛ на воздухе формируется, как показано ниже из данных РФА покрытий, эрозионно стойкая вторичная структура с высокой (до 70 %) долей бориды хрома и оксида алюминия. Такая структура сохраняется в процессе ЭИЛ при  $E = 0,048$  Дж вплоть до  $t = 5$  мин, после чего, наряду с эрозией электрода, усиливается эрозия подложки. Образующаяся на торце электрода тугоплавкая оксидно-боридная керамика разрушает покрытие и подложку, масса подложки оказывается меньше массы исходного образца, шероховатость поверхности снижается. Аналогичные особенности кинетики формирования ЭИЛ-покрытий отмечались и на других составах электродов в работах [19, 20].



**Рис. 1.** Зависимости суммарного привеса катода ( $\Sigma\Delta K$ ) (1–3) и суммарной эрозии анода ( $\Sigma\Delta A$ ) (4–6) от времени ЭИЛ для электродов составов 1 (а), 2 (б) и 3 (в)  $E$ , Дж: 0,192 (1, б); 0,096 (2, 4); 0,048 (3, 5)

Для электродов составов 2 и 3 со значительно меньшим содержанием боридной фазы привес на катоде (подложке) наблюдался при всех рассмотренных временах и энергиях ЭИЛ. Причем с ростом доли легкоплавких фаз  $\text{Cr}(\text{Si},\text{Al})_2$ ,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Cr}_4\text{Al}_{11}$  (состав 3) покрытие формируется более интенсивно из-за увеличения количества расплава в дуге разряда (см. рис. 1, в).

Одним из путей снижения шероховатости покрытий является высокочастотное электроискровое легирование, в результате которого увеличиваются толщина и сплошность покрытий, сглаживается шероховатость, повышается коэффициент переноса материалов [21]. Так, применение высокочастотного режима ( $E = 0,048$  Дж,  $I = 120$  А,  $f = 3200$  Гц,  $\tau = 20$  мкс) и электродных материалов составов 2 и 3 позволили получить покрытия с меньшей шероховатостью (хотя в случае состава 1 величина  $R_a$  значительно выше). Данный режим характеризуется устойчивым массопереносом и определен как оптимальный.

В результате электроискровой обработки сплава ЭП718-ИД на выбранном оптимальном режиме формируются покрытия толщиной 15–25 мкм, сплошностью до 100 % и твердостью 3,0–4,9 ГПа (табл. 4), что в 2,1–3,5 раза выше твердости никелевого сплава. Наибольшую твердость (4,9 ГПа) имеет композитное покрытие, полученное из электрода состава 1.

Микроструктура электроискрового покрытия на сплаве ЭП718-ИД представлена на рис. 2. По-

**Таблица 3. Результаты измерений топографии поверхности образцов ( $t = 10$  мин)**

Электродный материал	$E$ , Дж	$R_a$ , мкм
Состав 1	0,048	8,49
	0,096	6,96
	0,192	5,90
Состав 2	0,048	2,89
	0,096	4,35
	0,192	7,54
Состав 3	0,048	3,45
	0,096	3,46
	0,192	5,19

Примечание. Шероховатость образца без покрытия  $R_a = 0,38$  мкм.

Таблица 4. Свойства электроискровых покрытий (подложка ЭП718-ИД,  $E = 0,048$  Дж,  $t = 10$  мин)

Электродный материал	Сплошность, %	Толщина, мкм	Твердость, ГПа	$Y$	$V, 10^{-6} \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
Состав 1	100	15	4,9	3,5	1,43
Состав 2	100	20	3,0	2,1	1,61
Состав 3	100	25	3,0	2,1	2,68

Примечание. Твердость никелевого сплава ЭП718-ИД – 1,4 ГПа.  
 $Y$  – коэффициент упрочнения, равный отношению микротвердости покрытия к микротвердости подложки [10].  
 Скорость окисления никелевого сплава ЭП718-ИД составляет  $V = 2,59 \cdot 10^{-6} \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

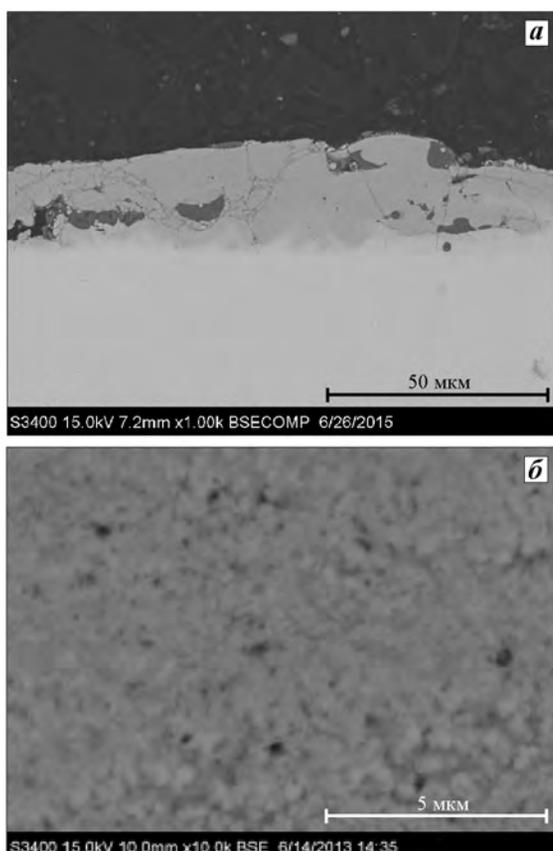


Рис. 2. Микроструктура электроискрового покрытия, полученного с помощью электрода состава 1 при  $E = 0,048$  Дж

$a$  – увеличение  $200\times$ ,  $b$  –  $10000\times$

крытие имеет толщину  $\sim 25$  мкм и состоит из зерен размером менее 300 нм (см. рис. 2, б). Трещин между покрытием и подложкой не выявлено.

В покрытии, полученном с помощью электрода состава 1, наблюдаются две характерные области (рис. 3): в первой (светлого цвета) – содержатся элементы, входящие в состав электрода-анода (Cr–Al–Si), во второй (темного цвета) – преимущественно алюминий и кислород. Можно предположить, что структурная составляющая об-

ласти 2 – это фаза оксида алюминия. В процессе ЭИЛ соединение  $\text{Cr}(\text{Si}, \text{Al})_2$  взаимодействует с кислородом воздуха с образованием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Карта распределения элементов в данном покрытии представлена на рис. 4. Наличие в поверхностном слое никеля, железа и молибдена свидетельствует о перемешивании элементов материала катода с продуктами эрозии в процессе обработки, что, очевидно, способствует высокой адгезии сформированного покрытия.

Динамику фазо- и структурообразования покрытий изучали на примере электрода состава 1 при  $E = 0,048$  Дж. После ЭИЛ в течение 3, 5 и 10 мин проводили РФА покрытий. После 3-минутной обработки в покрытии обнаружены твердые растворы на основе никеля и хрома, бориды хрома ( $\text{CrB}$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}$ ) и железа ( $\text{Fe}_3\text{B}$ ), а также оксид алюминия  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (табл. 5). При этом борид хрома  $\text{CrB}$  содержится в электроде, твердый раствор на ос-

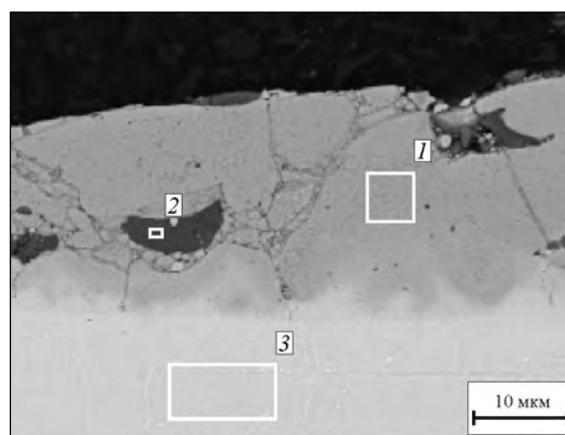
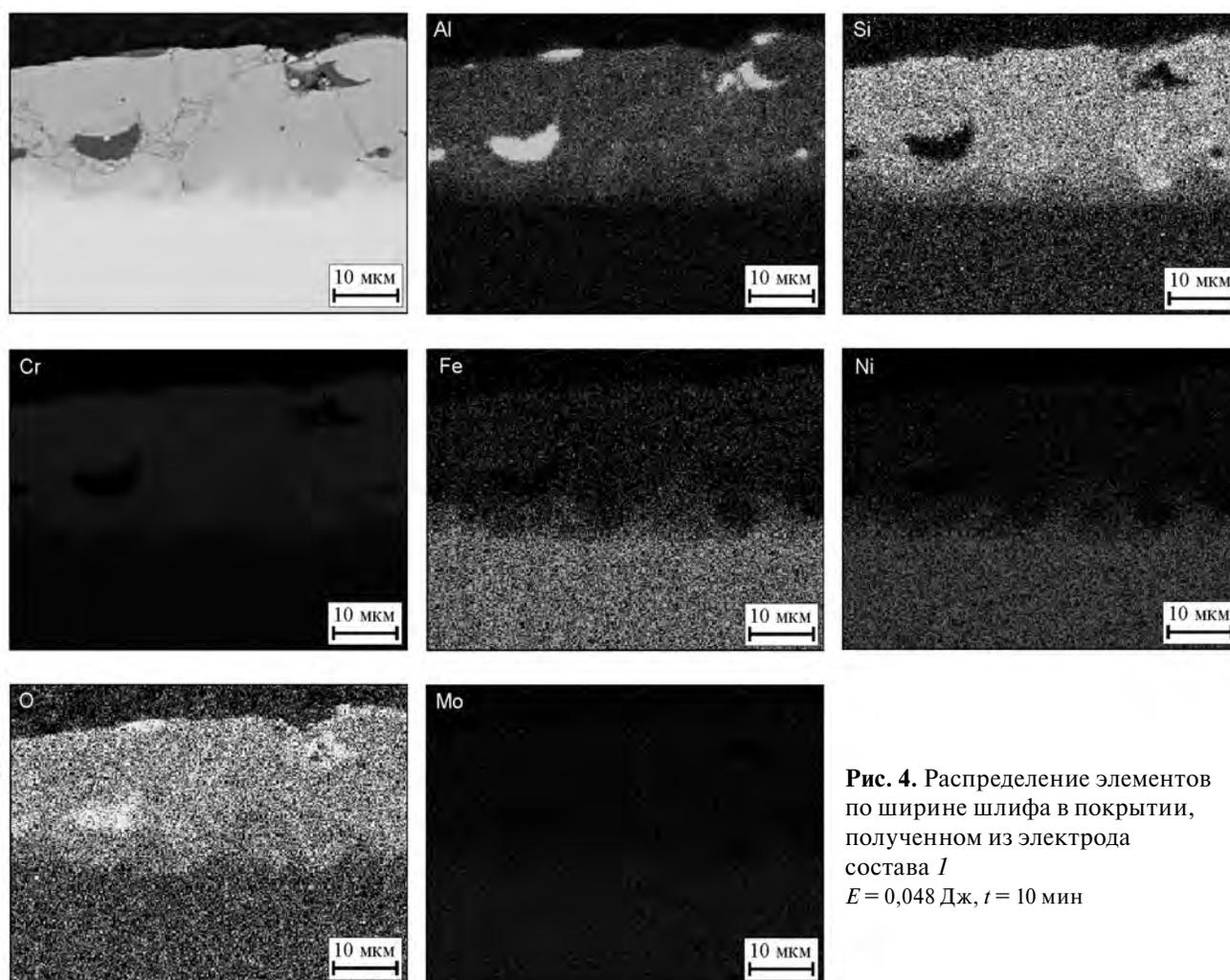


Рис. 3. Структура и состав (%) покрытия, полученного из электрода состава 1 при  $E = 0,048$  Дж ( $t = 10$  мин)

Область	B	C	N	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo	W
1	1,3	6,4	–	–	10,5	11,0	0,3	61,1	3,8	5,6	–	–
2	–	4,5	6,7	35,8	50,3	0,4	–	2,3	–	–	–	–
3	–	–	–	–	1,2	–	2,3	15,8	29,2	44,1	4,0	3,4



**Рис. 4.** Распределение элементов по ширине шлифа в покрытии, полученном из электрода состава 1  
 $E = 0,048$  Дж,  $t = 10$  мин

нове никеля соответствует материалу подложки, а другие фазы образуются в процессе ЭИЛ. Относительно высокое содержание  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  связано с окислением фазы  $\text{Cr}(\text{Si},\text{Al})_2$ . Кремний, вероятно, переходит в твердый раствор никеля.

В случае  $t = 5$  мин фазовый состав качественно не меняется. Так, после ЭИЛ-обработки в течение 3 мин содержание боридов ( $\text{Cr}_2\text{B}$ ,  $\text{Cr}_3\text{B}$ ,  $\text{Fe}_3\text{B}$ ) составляет 51 %, а после 5 мин — 49 %. При увеличении времени обработки до 10 мин фазовый состав меняется кардинально: повышается содержание твердого раствора на основе никеля (67 %) и борида хрома  $\text{Cr}_2\text{B}$  (23 %), а также снижается доля  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10 %). Высокое содержание твердого раствора на основе никеля свидетельствует о преимущественной эрозии материала подложки и уменьшении толщины покрытия.

В покрытии из электрода состава 2 (после 10-минутной обработки) обнаружены силициды и

бориды хрома и железа ( $\text{Cr}_3\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$  и  $\text{Cr}_3\text{B}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{B}$ ), свободный хром и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

При использовании электрода состава 3 в покрытии обнаружены оксид алюминия (46 %), силициды хрома  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  (30 %),  $\text{Cr}_3\text{Si}$  (8 %), алюминид хрома  $\text{Cr}_5\text{Al}_8$  (6 %), а также следы (<5 %) хрома, нитрида хрома, силицида железа.

Методом МРСА изучен элементный состав покрытия. В поверхности, обработанной в течение 10 мин электродом состава 1 ( $E = 0,048$  Дж), наблюдаются кислород (20,9 %), алюминий (10,6 %), кремний (4,6 %), титан (3,3 %), хром (27,2 %), железо (12,0 %), никель (19,9 %) и молибден (1,5 %) (обл. 1 на рис. 5). В поверхности обнаружены две характерные области — светлая (обл. 2) и темная (обл. 3). В обл. 2 преимущественно содержатся хром, железо и никель. Можно предположить, что в данной области находится твердый раствор на основе никеля, а также борид хрома.

Таблица 5. Фазовый состав покрытий, полученных при  $E = 0,048$  Дж

Электродный материал	Фаза	Символ Пирсона	Содержание		Период, Å
			об.%	мас.%	
Образец без покрытия	Тв. раствор на основе Ni	cF4	100	100	$a = 3,611$
Состав 1 ( $t = 3$ мин)	Тв. раствор на основе Cr	cI2	8	10	$a = 2,944$
	Тв. раствор на основе Ni	cF4	12	17	$a = 3,582$
	CrB	oC8	26	27	$a = 2,990$ $b = 7,916$ $c = 2,931$
	Cr <sub>2</sub> B	tI12	6	7	$a = 5,206$ $c = 4,290$
	Fe <sub>3</sub> B	oP16	13	17	$a = 5,138$ $b = 6,783$ $c = 4,605$
	γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cF120	35	22	$a = 7,930$
Состав 1 ( $t = 5$ мин)	Тв. раствор на основе Cr	cI2	9	12	$a = 2,936$
	Тв. раствор на основе Ni	cF4	9	13	$a = 3,573$
	CrB	oC8	22	23	$a = 2,984$ $b = 7,909$ $c = 2,930$
	Cr <sub>2</sub> B	tI12	9	10	$a = 5,197$ $c = 4,286$
	Fe <sub>3</sub> B	oP16	12	16	$a = 5,130$ $b = 6,800$ $c = 4,585$
γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cF120	39	26	$a = 7,928$	
Состав 1 ( $t = 10$ мин)	Тв. раствор на основе Ni	cF4	56	67	$a = 3,582$
	γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cF56	20	10	$a = 7,938$
	Cr <sub>2</sub> B	tI12	24	23	$a = 5,099$ $c = 4,289$
Состав 2 ( $t = 10$ мин)	Cr <sub>3</sub> Si	cP8	31	38	$a = 4,562$
	Cr	cI2	6	9	$a = 2,877$
	Fe <sub>3</sub> Si	cF16	6	8	$a = 5,594$
	Cr <sub>3</sub> B <sub>4</sub>	oI14	7	8	–
	γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cF56	46	32	$a = 7,920$
	Fe <sub>3</sub> B	oP16	4	5	–
Состав 3 ( $t = 10$ мин)	Cr <sub>3</sub> Si	cP8	6	8	$a = 4,572$
	Cr	cI2	1	2	$a = 2,885$
	Fe <sub>3</sub> Si	cF16	3	4	$a = 5,599$
	γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cF56	57	46	$a = 7,949$
	Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	tI32	23	30	$a = 9,170$ $c = 4,615$
	Cr <sub>2</sub> N	hP4	3	4	$a = 2,755$ $c = 4,441$
	Cr <sub>5</sub> Al <sub>8</sub>	cI52	7	6	$a = 9,013$

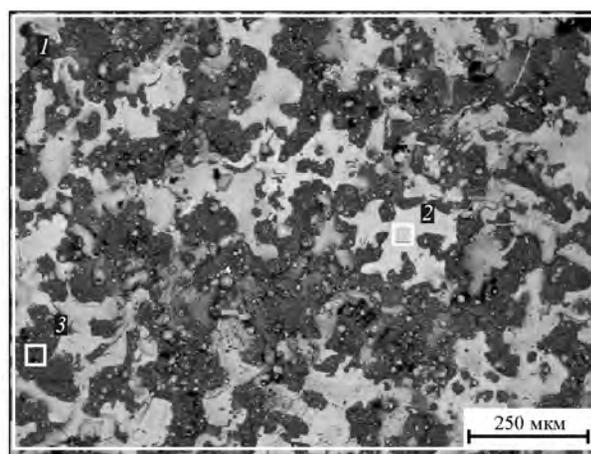


Рис. 5. Структура и элементный состав (%) поверхностного слоя, полученного из электрода состава 1 при  $E = 0,048$  Дж ( $t = 10$  мин)

Область	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo	Фазы
1	20,9	10,6	4,6	3,3	27,2	12,0	19,9	1,5	Тв. раствор на основе Ni, Cr <sub>2</sub> B, γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
2	–	1,1	3,7	0,9	36,2	19,6	35,5	3,0	Тв. раствор на основе Ni, Cr <sub>2</sub> B
3	35,5	12,0	7,9	3,0	22,3	7,5	11,0	0,7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , тв. раствор на основе Ni

В обл. 3 наблюдаются кислород (35,5 %), алюминий (12,0 %), а также хром (22,3 %), никель (11,0 %), кремний (7,9 %) и железо (7,5 %). Состав данной области представлен оксидом алюминия, а также, возможно, имеется твердый раствор никеля. Методом РФА установлены твердый раствор на основе никеля, борид хрома и оксид алюминия.

Кинетические зависимости процесса окисления образцов приведены на рис. 6. Температура испытаний выбрана равной 700 °С, так как это максимальная рабочая температура сплава ЭП718-ИД. Установлено, что окисление протекает по параболическому закону, а рост оксидного слоя лимитируется диффузией кислорода через образовавшийся оксидный слой.

Минимальным показателем окисления 0,20 г/м<sup>2</sup> (лучшей жаростойкостью) обладает покрытие, осажденное из электрода состава 1. Максимальный показатель окисления имеет покрытие из электрода состава 3 и образец без покрытия (соответственно 0,38 и 0,37 г/м<sup>2</sup>). Следует отметить, что при расчетах данного параметра не учитывалась большая геометрическая площадь поверхности

образца с покрытием по сравнению с исходной подложкой по причине шероховатости.

В работе [22] изучали скорость окисления СВС-сплавов Cr–Al–В–Si при высокотемпературном окислении (температура эксперимента — 1000 °С). Наименьшей скоростью окисления характеризовался состав 1. Увеличение концентрации алюминия и снижение содержания бора способствовали росту скорости окисления СВС-сплавов. По данным [23, 24], фазы CrB и Cr(Si,Al)<sub>2</sub> обладают повышенной стойкостью к высокотемпературному окислению.

Таким образом, покрытия электродами Cr–Al–Si–В позволяют снизить скорость окисления сплава ЭП718-ИД в 1,6–1,8 раза (см. табл. 4).

Фазовый состав образцов после испытаний на жаростойкость приведен в табл. 6. После окисления образца без покрытия на поверхности, помимо твердого раствора на основе никеля, также наблюдаются оксиды NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит).

В окисленном покрытии из электрода состава 1 обнаружен твердый раствор на основе никеля, а также силициды и бориды хрома и железа (Cr<sub>3</sub>Si, Fe<sub>3</sub>Si и Cr<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>B) при наличии следов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4%). В покрытии из электрода состава 2 после окисления идентифицированы хром (15%), оксид алюминия (19%, что выше, чем в покрытии из состава 1), твердый раствор на основе никеля (8%), силициды и бориды хрома и железа (соответственно Cr<sub>3</sub>Si, Fe<sub>3</sub>Si и Cr<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>B). В составе покрытия из электрода состава 3 отмечены твердый раствор на

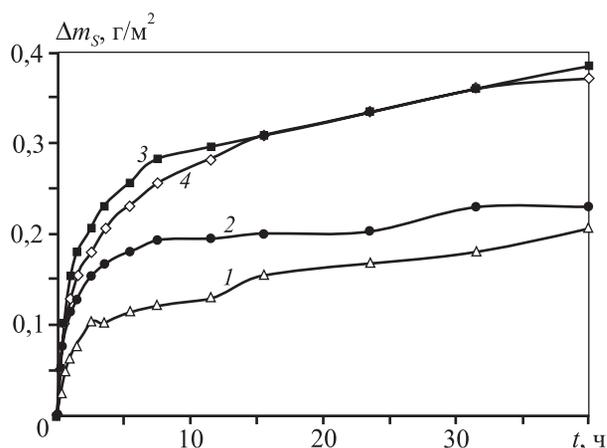


Рис. 6. Зависимость показателя окисления покрытий, полученных электродами составов 1, 2 и 3, от времени ЭИЛ (T = 700 °С)  
4 – образец без покрытия

Таблица 6. Фазовый состав покрытий после высокотемпературного окисления (E = 0,048 Дж, t = 3 мин, T = 700 °С)

Электродный материал	Фаза	Символ Пирсона	Содержание		Период, Å
			об. %	мас. %	
Образец без покрытия	Тв. раствор на основе Ni	cF4	60	70	a = 3,596
	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	cF56	21	16	a = 8,332
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (гематит)	hR10	19	14	a = 5,027 c = 13,696
Состав 1	Тв. раствор на основе Ni	cF4	26	32	a = 3,587
	Cr <sub>3</sub> Si	cP8	12	11	a = 4,563
	Fe <sub>3</sub> Si	cF16	6	6	a = 5,588
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cF56	9	4	a = 7,935
	Fe <sub>3</sub> B	oP16	18	19	a = 5,345 b = 6,755 c = 4,357
Cr <sub>2</sub> B	tI12	29	28	a = 5,179 c = 4,281	
Состав 2	Тв. раствор на основе Ni	cF4	6	8	a = 3,588
	Cr <sub>3</sub> Si	cP8	25	28	a = 4,563
	Cr	cI2	13	15	a = 2,876
	Fe <sub>3</sub> Si	cF16	5	7	a = 5,606
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cF56	31	19	a = 7,962
	Fe <sub>3</sub> B	oP16	11	14	a = 5,303 b = 6,693 c = 4,469
Cr <sub>2</sub> B	tI12	9	9	a = 5,186 c = 4,287	
Состав 3	Тв. раствор на основе Ni	cF4	5	7	a = 3,589
	Cr <sub>3</sub> Si	cP8	38	41	a = 4,563
	Cr	cI2	11	14	a = 2,879
	Fe <sub>3</sub> Si	cF16	5	6	a = 5,626
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cF56	18	11	a = 7,957
	Cr <sub>2</sub> B	tI12	2	3	–
	NiAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	cF56	14	10	a = 8,125
	Fe <sub>5</sub> Si <sub>2</sub> B	tI32	7	8	a = 8,844 c = 4,319

основе никеля (7%), хром (14%), силициды хрома и железа (Cr<sub>3</sub>Si, Fe<sub>3</sub>Si), борид железа и кремния (Fe<sub>5</sub>Si<sub>2</sub>B), борид хрома Cr<sub>2</sub>B (следы), оксиды NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Более низкое содержание оксидных фаз в покрытиях из электродов состава 1 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 4%),

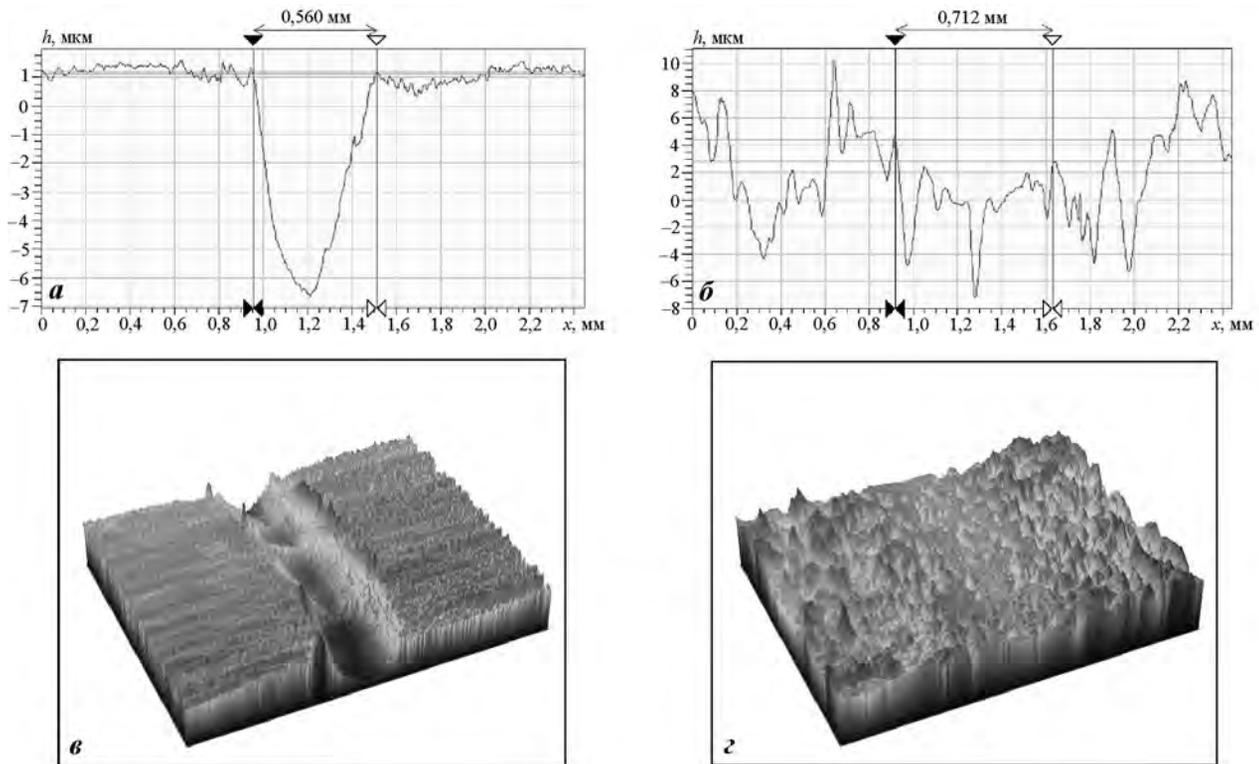


Рис. 7. Профиль дорожки износа образцов (а, б) и ее 3D-изображение (в, г)

а, в – образец без покрытия; б, г – образец с покрытием, полученным электродом состава 1 ( $P = 1 \text{ Н}$ ,  $l = 300 \text{ м}$ ,  $T = 500 \text{ °C}$ )

состава 2 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 19 %) и состава 3 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 11 %,  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$  – 10 %) указывает на способность покрытий противостоять высокотемпературному окислению по сравнению с никелевым сплавом ЭП718-ИД ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  – 16 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 14 %).

Наряду с испытаниями по окислению были проведены высокотемпературные трибологические исследования покрытий (рис. 7). Из табл. 7 видно, что ЭИЛ-покрытие увеличивает коэффициент трения ( $K_{\text{тр}}$ ) в паре с контртелом, но при этом снижает скорость износа. Так, в случае покрытия из электродного материала состава 1 скорость износа снижается в 1,9 раза.

При проведении трибологических исследований в дорожке износа образуются продукты износа, которые под действием нагрузки подпрессовываются (рис. 8, а, в). Частицы продуктов износа имеют округло-осколочную форму конгломератов размером меньше 300 нм (см. рис. 8, б). Исследован элементный состав в трех различных областях дорожки износа покрытия из электрода состава 1. В темных областях 1 и 2 (см. рис. 8, а) отмечено повышенное содержание кислорода как в результате натирания контртела из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , так и

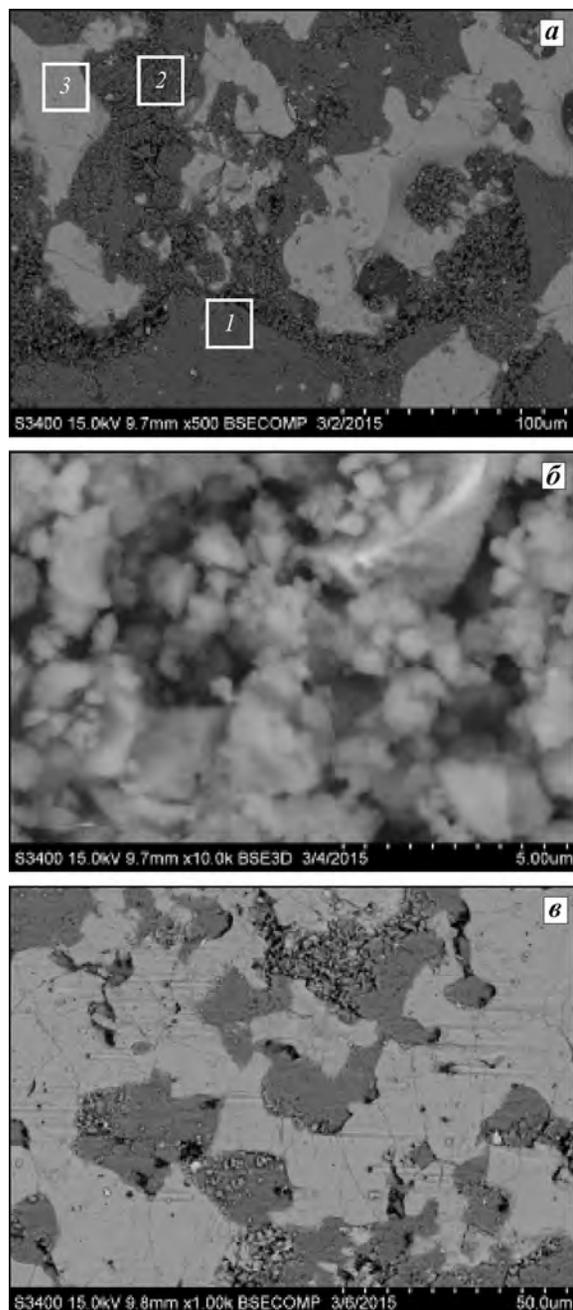
Таблица 7. Результаты трибологических испытаний ( $P = 1 \text{ Н}$ ,  $l = 300 \text{ м}$ ,  $T = 500 \text{ °C}$ ,  $t = 3 \text{ мин}$ )

Электродный материал	$K_{\text{тр}}$	$W$ , $10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{м} \cdot \text{Н})$
Образец без покрытия	0,68	260,10
Состав 1	0,79	133,97
Состав 2	0,96	222,33
Состав 3	0,87	225,48

из-за окисления поверхностного слоя при трении. Высокое содержание хрома (48,2 %) и кремния (6,8 %) и отсутствие кислорода в светлой области 3 свидетельствуют о неполном истирании покрытия.

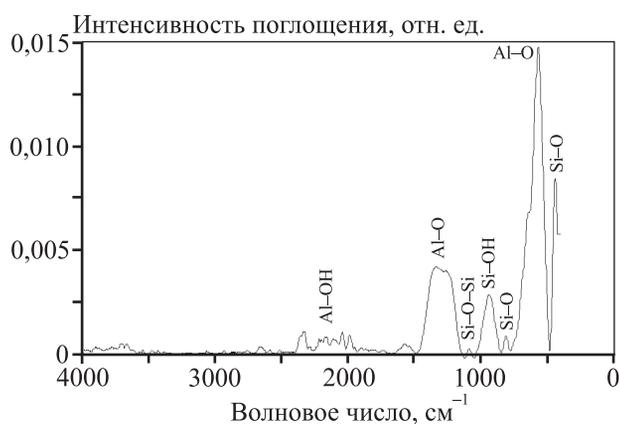
На дорожке износа покрытия из электрода состава 3 видна сетка мелких трещин, которые возникли под действием контртела. При силовом воздействии более твердого материала контртела ( $P = 1 \text{ Н}$ ; 15 ГПа) происходит хрупкое разрушение покрытия, а трещины способствуют выкрашиванию материала, что приводит к увеличению скорости износа (см. табл. 7).

Дополнительно были проведены исследования скорости износа покрытия из электродного материала состава 1 при нагрузке 5 Н ( $l = 250$  м,



**Рис. 8.** Микроструктура дорожек износа и состав (%) продуктов износа покрытий  
*a* – дорожка износа покрытия из электрода состава 1  
*б* – внешний вид продуктов износа в покрытии из электрода 2  
*в* – дорожка износа покрытия из электрода состава 3

Область на рис. 8, <i>a</i>	B	C	O	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	Ti
1	0,0	1,9	41,8	17,3	3,0	19,6	5,5	9,2	1,1	0,6
2	0,0	2,1	38,1	16,8	2,9	22,5	6,0	9,8	0,9	0,9
3	2,1	2,7	0,0	0,9	6,8	48,2	12,8	23,0	2,6	0,9



**Рис. 9.** ИК-спектр продуктов износа покрытия состава 1

$T = 500$  °С). Покрытие характеризуется меньшей скоростью износа, чем образец без покрытия.

Методом ИК-спектроскопии изучен состав продуктов износа покрытия из электрода 1. ИК-спектр представлен на рис. 9. Наличие функциональных групп Al и Si, связанных с кислородом, свидетельствует о присутствии оксидов алюминия и кремния в дорожке износа, что и приводит к высоким значениям  $K_{тр}$ .

Таким образом, электроискровые покрытия из электродного материала состава 1 в наибольшей степени повышают износо- и жаростойкость никелевого сплава ЭП718-ИД. Это позволяет рекомендовать технологию ЭИЛ для защиты деталей из сплава ЭП718-ИД с целью увеличения ресурса работы и надежности эксплуатации.

## Выводы

1. Изучены особенности формирования, состав, структура и свойства электроискровых покрытий на никелевом сплаве ЭП718-ИД при использовании электродов системы Cr–Al–Si–B. В случае электрода  $65\%CrB + 27\% Cr(Si,Al)_2 + 8\%Cr_5Si_3B_x$  наблюдается убыль массы катода (подложки) после 5-минутного ЭИЛ, а в случае электрода  $15\%CrB + 4\%Cr_5Si_3B_x + 24\%Cr_5Si_3 + 57\%Cr_4Al_{11}$  привес катода происходит на протяжении всего цикла осаждения покрытия.

2. Установлен оптимальный высокочастотный режим ЭИЛ:  $E = 0,048$  Дж,  $I = 120$  А,  $f = 3200$  Гц,  $\tau = 20$  мкс, характеризующийся минимальной эрозией электрода при удовлетворительной ско-

рости осаждения покрытий и относительно низкой шероховатостью.

3. Электроискровая обработка электродами Cr—Al—Si—B способствует увеличению твердости, жаростойкости и износостойкости сплава ЭП718-ИД.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственных работ в сфере научной деятельности базовой части государственного задания № 2014/113, НИР 28.58. в части изучения эрозионной способности керамических электродных материалов на основе боридов, а также в рамках проекта РНФ № 15-19-00203 в части исследования состава, структуры и свойств покрытий, а также механизма высокотемпературного окисления и износа.*

## Литература/References

1. Soboyejo W.O., Srivatsan T.S. Advanced structural materials: Properties, design optimization and applications. USA: CRC Press, 2006.
2. Podchernyaeva I.A., Panasyuk A.D., Teplenko M.A., Podol'skii V.I. Protective coatings on heat-resistant nickel alloys: Review. *Powder Metall. and Metal Ceram.* 2000. Vol. 39. No. 9—10. P. 434—444.
3. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Sviridova T.A., Shvyndina N.V., Petrzhhik M.I. Pulsed electrospark deposition of MAX phase Cr<sub>2</sub>AlC based coatings on titanium alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2013. Vol. 235. P. 454—460.
4. Johnson R.N., Sheldon G.L. Advances in the electrospark deposition coating process. *J. Vacuum Sci. Technol. Vacuum Surf. Films.* 1986. Vol. 4. No. 6. P. 2740—2746.
5. Cadney S., Brochu M. Formation of amorphous Zr<sub>41,2</sub>Ti<sub>13,8</sub>Ni<sub>10</sub>Cu<sub>12,5</sub>Be<sub>22,5</sub> coatings via the electrospark deposition process. *Intermetallics.* 2008. Vol. 16. No. 4. P. 518—523.
6. Reynolds J.L., Holdren R.L., Brown L.E. Electro-spark deposition. *Adv. Mater. Process.* 2003. Vol. 161. P. 35—37.
7. Hua Yu, Hong-xin Shi, Yao-li Wang, Ke-ke Zhang, Wen-yan Wang, Li-juan Han, Qing-hua Pang. NiCr alloy coating deposited on the surface of 35CrMo steel by the electrospark process. *Mater. Sci. Forum.* 2008. Vol. 575—578. P. 827—832.
8. Wang Ruijun, Qian Yiyu, Liu Jun. Interface behavior study of WC<sub>92</sub>—Co<sub>8</sub> coating produced by electrospark deposition. *Appl. Surf. Sci.* 2005. Vol. 240. No. 1—4. P. 42—47.
9. Luo Cheng, Dong Shijie, Xiong Xiang. Microstructure and properties of tic coating by vibrating electrospark deposition. *Key Eng. Mater.* 2008. Vol. 373—374. P. 180—183.
10. Wang P.-Z., Pan G.-S., Zhou Y., Qu J.-X., Shao H.-S. Accelerated electrospark deposition and the wear behavior of coatings. *J. Mater. Eng. Perform.* 1997. Vol. 6. No. 6. P. 780—784.
11. Frangini S., Masci A. A study on the effect of a dynamic contact force control for improving electrospark coating properties. *Surf. Coat. Technol.* 2010. Vol. 204. No. 16—17. P. 2613—2623.
12. Ribalko A.V., Sahin O. The use of bipolar current pulses in electrospark alloying of metal surfaces. *Surf. Coat. Technol.* 2003. Vol. 168. No. 2—3. P. 129—135.
13. Ribalko A.V., Sahin O., Korkmaz K. A modified electrospark alloying method for low surface roughness. *Surf. Coat. Technol.* 2009. Vol. 203. No. 23. P. 3509—3515.
14. Yu-jiang Xie, Mao-cai Wang. Isothermal oxidation behavior of electrospark deposited MCrAlX-type coatings on a Ni-based superalloy. *J. Alloys Compd.* 2009. Vol. 480. No. 2. P. 454—461.
15. Yu-jiang Xie, Mao-cai Wang. Microstructural morphology of electrospark deposition layer of a high gamma prime superalloy. *Surf. Coat. Technol.* 2006. Vol. 201. No. 3—4. P. 691—698.
16. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kudryashov A.E., Vakayev P.V., Petrzhhik M.I. Electrospark coatings deposited onto an Armco iron substrate with nano- and microstructured WC—Co electrodes: Deposition process, structure, and properties. *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. No. 15. P. 3715—3722.
17. Akihiro Goto, Masao Akiyoshi, Hiroyuki Ochiai, Mitsutoshi Watanabe. Development of micro spark coating: *Proc. 24-th Intern. Congress of the Aeronautical Science (ICAS 2004)* (Yokohama, Japan, Sept. 2004). 2004. P. 1—7.
18. Pogozhev Yu.S., Potanin A.Yu., Levashov E.A., Kovalev D.Yu. The features of combustion and structure formation of ceramic materials in the Cr—Al—Si—B system. *Ceram. Intern.* 2014. Vol. 40. No. 10. P. 16299—16308.
19. Levashov E.A., Malochkin O.Y., Kudryashov A.E., Glukhov S.A., Sviridova T.A., Gammel F., Zuhentrun R. Influence of nano-sized powders on combustion processes and formation of composition, structure, and properties of alloys of the system Ti—Al—B. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2003. No. 1. P. 54—59.
20. Levashov E.A., Kudryashov A.E., Pogozhev Yu.S., Vakayev P.V., Sviridova T.A., Zamulaeva E.I., Milonich S., Todorovich M. An investigation of the influence of the parameters of pulse discharges on mass transfer, structure, composition, and properties of TiC—NiAl-based electrical spark coatings modified by nanodispersed components. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2004. Vol. 45. No. 11. P. 32—40.
21. Lešnjak A., Tušek J. Processes and properties of deposits in electrospark deposition. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2002. Vol. 7. No. 6. P. 391—396.
22. Pogozhev Yu.S., Levashov E.A., Zamulaeva E.I., Potanin A.Yu., Vlasova A.Yu., Novikov A.V., Kochetov N.A. Combustion synthesis of multicomponent targets based on ceramics in the Cr—Al—Si—B system for PVD of heat-resistant thin films. In: *Book of Jahrbuch Oberflächen technik.* Bd. 69. Ed. R. Suchentrunck. Bad Saulgau, Germany: Eugen G. Leuze Verlag KG, 2013. P. 126—132.
23. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Pierson J.F., Bauer J.Ph., Levashov E.A., Shtansky D.V. Strengthening Cr—Al—Si—B—(N) coatings with heat resistance to 1200 °C. *Glass Phys. Chem.* 2011. Vol. 37. No. 4. P. 411—417.
24. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Pierson J.F., Kuptsov K.A., Shtansky D.V. Hard Cr—Al—Si—B—(N) coatings deposited by reactive and non-reactive magnetron sputtering of CrAlSiB target. *Appl. Surf. Sci.* 2014. Vol. 314. P. 104—111.