



УДК 621.793

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-67-78>

Научная статья

Research article



Покрyтия на основе карбида тантала, полученные методами магнетронного распыления и электроискрового легирования, для повышения износостойкости деталей запорной арматуры

А. Д. Сытченко¹✉, М. Н. Фатыхова¹, В. П. Кузнецов², К. А. Купцов¹,
М. И. Петржик¹, А. Е. Кудряшов¹, Ф. В. Кирюханцев-Корнеев¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4 стр. 1

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

✉ alina-sytchenko@yandex.ru

Аннотация. Покрyтия Ta–Zr–Si–B–C осаждались методом магнетронного распыления (МР) многокомпонентной мишени TaSi₂–Ta₃B₄–(Ta, Zr)B₂ в среде Ar + C₂H₄. Покрyтия на основе TaC–Fe–Cr–Mo–Ni были получены путем электроискрового легирования (ЭИЛ) с использованием электрода TaC–Cr–Mo–Ni. Состав и структура покрyтий исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда и рентгенофазового анализа. Механические характеристики определялись методом наноиндентирования. Трибологические свойства исследовались на машине трения в режиме возвратно-поступательного движения. Выявлено, что покрyтия обладают однородной бездефектной структурой и основной структурной составляющей является ГЦК-фаза TaC. Ее концентрация в МР-покрyтии на 30 % выше, чем в ЭИЛ- покрyтии. Размеры кристаллитов TaC для МР- и ЭИЛ-покрyтий составляли 3 и 30 нм соответственно. Высокая доля карбидной фазы и малый размер кристаллитов обеспечили более высокую твердость МР-покрyтия ($H = 28$ ГПа) по сравнению с ЭИЛ-образцом ($H = 10$ ГПа). Покрyтия характеризовались близкими значениями коэффициента трения (около 0,15) и приведенного износа ($<10^{-7}$ мм³/(Н·м)). Осаждение на стальную подложку привело к снижению коэффициента трения в 5 раз и приведенного износа на 4 порядка. Проведены опытно-промышленные испытания покрyтий, осажженных на клиновые задвижки запорной арматуры для перекачки жидкости, используемые в нефтегазовой промышленности. Результаты испытаний показали, что ресурс работы стальной клиновой задвижки возрос на 25 и 70 % при осаждении МР- и ЭИЛ-покрyтий соответственно.

Ключевые слова: магнетронное распыление (МР), электроискровое легирование (ЭИЛ), покрyтия, TaC, коэффициент трения, износостойкость

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-49-00141).

Для цитирования: Сытченко А.Д., Фатыхова М.Н., Кузнецов В.П., Купцов К.А., Петржик М.И., Кудряшов А.Е., Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Покрyтия на основе карбида тантала, полученные методами магнетронного распыления и электроискрового легирования, для повышения износостойкости деталей запорной арматуры. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрyтия*. 2023;17(3):67–78. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-67-78>

TaC-based wear-resistant coatings obtained by magnetron sputtering and electro-spark deposition for wedge gate valve protection

A. D. Sytchenko¹✉, M. N. Fatykhova¹, V. P. Kuznetsov², K. A. Kuptsov¹,
M. I. Petrzhik¹, A. E. Kudryashov¹, Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS”

4 bld. 1 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russia

✉ alina-sytchenko@yandex.ru

Abstract. Ta–Zr–Si–B–C coatings were deposited by magnetron sputtering (MS) of a TaSi₂–Ta₃B₄–(Ta, Zr)B₂ multi-component target in an Ar + C₂H₄ gas mixture. TaC–Cr–Mo–Ni based coatings were obtained by electro-spark deposition (ESD) using TaC–Cr–Mo–Ni electrode. The composition and structure of the coatings were studied using scanning electron microscopy, energy-dispersive spectroscopy, glow discharge optical emission spectroscopy and X-ray diffraction. Mechanical and tribological properties of coatings were determined using nanoindentation and pin-on-disk tests. The study showed that the coatings have a homogeneous and defect-free structure, with the main structural component being the fcc-TaC phase. The MS coating exhibited a 30 % higher concentration of the TaC phase compared to the ESD coating. The TaC crystallite sizes for the MS and ESD coatings were 3 and 30 nm, respectively. The presence of a high fraction of the carbide phase and small crystallite size for the MS coating resulted in superior hardness ($H = 28$ GPa) compared to the ESD sample ($H = 10$ GPa). Both coatings exhibited similar values of the friction coefficient (about 0.15) and demonstrated reduced wear rates ($<10^{-7}$ mm³/(N·m)). The deposition of coatings on a steel substrate led to a decrease in the friction coefficient by five times and the wear rate by four orders of magnitude. Pilot tests were conducted on coatings applied to wedge gate valve of shut-off devices used in the oil and gas industry for pumping liquids. The results indicated that the service life of the steel wedge gate valve increased by 25 and 70 % with deposited MS and ESD coatings, respectively.

Keywords: magnetron sputtering, electro-spark deposition, coatings, TaC, friction coefficient, wear resistance

Acknowledgements: This work was performed with financial support by Russian Science Foundation (project no. 23-49-00141).

For citation: Sytchenko A.D., Fatykhova M.N., Kuznetsov V.P., Kuptsov K.A., Petrzhik M.I., Kudryashov A.E., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V. TaC-based wear-resistant coatings obtained by magnetron sputtering and electro-spark deposition for wedge gate valve protection. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(3):67–78. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-67-78>

Введение

Одной из основных проблем современного производства является износ деталей и металлических конструкций в процессе эксплуатации. Для увеличения износостойкости и срока службы достаточно модифицировать только поверхность изделий путем нанесения защитных покрытий. Перспективными технологиями осаждения таких покрытий, востребованными в промышленности, являются электроискровое легирование (ЭИЛ) [1] и магнетронное распыление (МР) [2].

Метод электроискрового легирования, основанный на явлении электрической эрозии материалов при искровом разряде и переносе продуктов эрозии с поверхности электрода на подложку, обладает такими преимуществами, как высокая адгезия, возможность локальной обработки поверхности, низкое термическое воздействие на подложку, отсутствие жестких требований к подготовке поверхности перед

нанесением [3–5]. В свою очередь, технология магнетронного напыления, в которой образование покрытия происходит из атомарных потоков при вакуумном распылении материала-катода вследствие протекания аномального тлеющего разряда, характеризуется универсальностью по отношению к используемым подложкам, а наносимые покрытия имеют низкую концентрацию дефектов и плотную однородную структуру с равномерным распределением элементов по толщине покрытия [6–8].

До недавнего времени объекты применения ЭИЛ и МР были ограничены преимущественно металлообрабатывающим (режущим, штамповым или прокатным) инструментом. Можно отметить эффективность метода ЭИЛ при упрочнении прокатных валков [9], сверл [10] и штампов [11]. Положительные результаты применения МР-покрытий отмечены при упрочнении пуансонов [12], роликов холодной прокатки [13], режущих токарных пластин, концевых фрез [14–16] и штампов [17].

В последние годы области использования упрочняющих защитных ЭИЛ- и МР-покрытий существенно расширились. Можно отметить работы по нанесению МР-покрытий на трубы тепловыделяющих элементов [18; 19], элементы котлов для сжигания биотоплива [20]. ЭИЛ-покрытия демонстрируют высокие характеристики при нанесении на лопатки как горячей зоны газотурбинного двигателя [21], так и газовых турбин тепловых и атомных станций [22], а также на подшипники [23], компоненты двигателя внутреннего сгорания [24], детали силовых гидроцилиндров [25], насосов в гидросистемах тракторов, сельскохозяйственных машин [26] и объектов морской инфраструктуры [27], штоки гидроцилиндров буровых насосов [28] и др.

Одними из объектов, в которых может быть эффективно реализован потенциал методов МР и ЭИЛ, являются детали запорной арматуры для перекачки жидкости, используемые в нефтегазовой промышленности, подверженные значительному износу вследствие истирания и воздействия абразивных частиц. Износ запорной арматуры является распространенной причиной отказов оборудования и аварий [29]. Вопрос интенсивного износа и выхода из строя данных компонентов обсуждается в работах [30; 31]. Решением указанной проблемы является нанесение покрытий на компоненты запорной арматуры. В данном направлении были опробованы лакокрасочные металлические покрытия (Zn, Cu, Al–Cr), нанесенные гальваническим и ионно-плазменным методами, а также путем плазменного напыления и лазерной наплавки, и показана перспективность применения покрытий, обладающих повышенными плотностью и коррозионной стойкостью [32]. Ряд решений по увеличению срока службы элементов запорной арматуры с использованием ионно-плазменных технологий, в частности МР, описан в [33].

Перспективным электродным материалом для использования в технологиях магнетронного напыления и электроискрового легирования является карбид тантала. Он используется в качестве защитных покрытий благодаря высоким показателям твердости (от 25 до 45 ГПа), модуля упругости (300–450 ГПа), износостойкости в условиях истирания, стойкости к химическому воздействию и окислению, термической стабильности (до 2000 °C) [34; 35]. Во избежание хрупкого поведения TaC при нагружении и разрушения вследствие образования трещин бинарные покрытия легируют:

– элементами, обладающими растворимостью в основной фазе (Cr, Mo, V, Ni, Zr и др.), что способствует существенному улучшению свойств базовых покрытий за счет деформации решетки в результате образования новых твердых растворов [36];

– аморфизующими элементами, такими как Si и B, которые способствуют модификации структуры покрытий с образованием нанокompозита, характеризующегося рекордными механическими характеристиками, износо- и коррозионной стойкостью [37–39].

Целью данной работы являлось получение износостойких покрытий на основе карбида тантала методами магнетронного распыления и электроискрового легирования для защиты элементов запорной арматуры.

Материалы и методы исследований

Покрытия Ta–Zr–Si–B–C были получены магнетронным распылением керамической мишени $\text{TaSi}_2\text{–Ta}_3\text{B}_4\text{–(Ta, Zr)B}_2$ (состава, мас. %: 70,8 Ta, 18,6 Si, 7,4 Zr и 2,9 B) диаметром 120 мм и толщиной 6 мм, синтезированной методом горячего прессования измельченных продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [40]. Для осаждения покрытий использовалась вакуумная установка типа УВН-2М (АО «Кварц», Россия) [41]. Электропитание магнетрона осуществлялось с использованием блока 5×5 Pinnacle+ («Advanced Energy», США). Мощность, напряжение и ток составляли 1 кВт, 500 В и 2 А соответственно. Покрытия наносились в реакционной среде $\text{Ar} + \text{C}_2\text{H}_4$ с использованием газов Ar (99,9995 %) и C_2H_4 (99,95 %). Расход 15 мл/мин Ar и 10 мл/мин C_2H_4 контролировался системой газонапуска («Элточприбор», Россия). Остаточное давление и давление рабочего газа составляли $\sim 10^{-3}$ Па и 0,1–0,2 Па соответственно. Покрытия осаждались в течение 40 мин.

Методом электроискрового легирования в вакууме [36; 42] с помощью электрода TaC–Cr–Mo–Ni было нанесено покрытие TaC–Fe–Cr–Mo–Ni. Электроды были получены методом холодного прессования с использованием порошков: Cr (марки ПХ-1С, фракцией <60 мкм), Ni (ПНК-0Т2, <20 мкм), Mo (ПМ99.95, <5 мкм) и TaC (МРТУ 9-09-03443-77, <5 мкм), которые смешивались в планетарной мельнице Активатор-4М (Россия) в соотношениях, ат. %: 67,5TaC–12,5Mo–7,5Ni–12,5Cr. Нанесение покрытий осуществлялось в следующих технологических условиях:

- скорость вращения электрода 1000 об/мин;
- скорость движения электрода 500 мм/мин;
- шаг сканирования поверхности 0,5 мм;
- частота электрических импульсов 100 Гц;
- напряжение импульсов 100 В и их длительность 50 мкс;
- рабочее давление в вакуумной камере 0,5 Па;
- среда нанесения – Ar.

В качестве модельных подложек для осаждения покрытий использовались диски из стали РН1 (мас. % 77,2Fe–14,6Cr–3,8Ni–3,6Cu–0,8Si) диамет-

ром 45 мм. Покрытия также наносились на клин и седла запорного органа клиновой задвижки из стали РН1. Подложки перед нанесением покрытия подвергались очистке в изопропиловом спирте на установке УЗДН-2Т (Россия) с рабочей частотой 22 кГц в течение 5 мин. Перед нанесением покрытий методом МР также производилась очистка подложек в вакууме с помощью ионного источника (ионы Ar^+ , 2 кэВ) в течение 20 мин.

Структура и состав покрытий исследовались с помощью следующих методов анализа:

- сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа S-3400 («Hitachi», Япония), оснащенного приставкой Noran-7 Thermo для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС);

- оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда (ОЭСТР) на приборе Profiler 2 («Hori-ba JY», Франция);

- рентгенофазового анализа (РФА) с использованием дифрактометра D2 Phaser («Bruker», Германия).

Механические свойства покрытий были определены методом наноиндентирования на прецизионном нанотвердомере Nano-hardness tester («CSM Instruments», Швейцария), оснащенный индентором Берковича, при нагрузке 8 мН.

Трибологические испытания покрытий и стальной подложки проводились на автоматизированной машине трения Tribometer («CSM Instruments», Швейцария) с использованием возвратно-поступательного модуля. В случае стального контртела происходит его интенсивное натирание на поверхность более твердого покрытия, что затрудняет оценку коэффициента трения и износостойкости [43]. По этой причине при трибологических испытаниях использовался шарик из Al_2O_3 диаметром 3 мм. Нагрузка составляла 2 Н, линейная скорость – 0,3 см/с, количество циклов – 300. Дорожки износа покрытий исследовались методом оптической профилометрии с помощью прибора «WYKO NT1100» («Veeco», США). Анализ участков износа контртела проводился на оптическом микроскопе Axiovert 25 («Carl Zeiss», Германия). Значения приведенного износа покрытий и контртела рассчитывались по методике, описанной в работе [44].

Опытно-промышленные испытания на герметичность затвора стальной задвижки с выдвижным

шпинделем с покрытием, осажденным на клине и седлах запорного органа, проводились в соответствии с ГОСТ 33257 и ТУ 3741-001-22986183-2009. Испытания осуществлялись на аттестованном стенде с использованием контрольно-измерительных средств. Испытательной средой была вода с температурой 20 ± 5 °С; ее давление составляло 18,0 МПа. Испытания проводились непрерывно до достижения максимального количества циклов открыто–закрыто по критерию начала протечки затвора (потери герметичности).

Результаты и их обсуждение

Элементный состав и толщина покрытий представлены в табл. 1. Содержание ТаС в МР-покрытии (45 ат. %) на 30 % выше содержания карбидной фазы в ЭИЛ-покрытии (32 ат. %).

На рис. 1, а, б представлены СЭМ-изображения поперечных шлифов и рентгенограммы МР- и ЭИЛ-покрытий, на которых видна однородная бездефектная микроструктура. Толщина МР- и ЭИЛ-покрытий составляла 7 и 54 мкм соответственно. Для ЭИЛ-покрытия наблюдались равномерно распределенные по всему объему частицы карбида тантала размером до 0,2 мкм, расположенные в металлической матрице на основе железа с растворенными в нем Cr, Ni и Mo. В локальных областях присутствуют крупные зерна ТаС размером до 5 мкм. Исходная шероховатость ЭИЛ-покрытия составила $R_a = 2,2$ мкм, а МР-покрытия – 15 нм.

На рентгенограммах покрытий МР и ЭИЛ присутствуют пики при $2\theta = 34,9^\circ$, $40,5^\circ$ и $58,6^\circ$, соответствующие плоскостям (111), (200) и (220) ГЦК-фазы ТаС (JCPDS 89–3831) (см. рис. 1, в).

Уширенные пики для МР-покрытия свидетельствуют о наличии аморфной матрицы на основе $TaSi_2$ с растворенными в ней цирконием и бором [38]. На рентгенограмме ЭИЛ-покрытия дополнительные пики в положениях $44,5^\circ$ и $64,8^\circ$ соответствуют твердому раствору на основе альфа-железа $\alpha\text{-Fe}(\text{Cr}, \text{Ni}, \text{Mo})$. Размер кристаллитов фазы ТаС, оцененный по самой интенсивной линии (111), составлял ~3 и ~30 нм для покрытий МР и ЭИЛ соответственно. Параметр решетки (a) был равен 0,447 нм для покрытия МР и 0,441 нм для покрытия ЭИЛ, что несколько

Таблица 1. Элементный состав и толщина покрытий

Table 1. Elemental composition and thickness of coating

Образец	Элементный состав, ат. %									Толщина, мкм
	Ta	C	Si	B	Zr	Mo	Ni	Fe	Cr	
МР	22	31	21	18	8	–	–	–	–	7
ЭИЛ	16	18	–	–	–	3	2	50	11	54

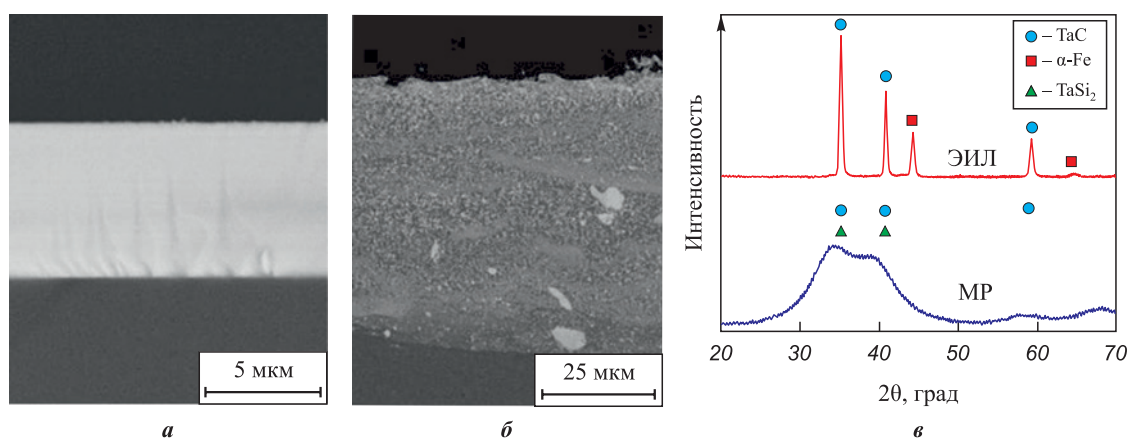


Рис. 1. СЭМ-микрофотографии поперечных шлифов покрытий, полученных МР (а) и ЭИЛ (б), и их рентгенограммы (в)

Fig. 1. Cross-section SEM images of MS (a) and ESD (b) coatings and XRD patterns of coatings (c)

отличается от значения $a = 0,445$ нм для порошкового стандарта TaC (карточка JCPDS 89-3831). Такое отклонение может быть связано с наличием сжимающих (для МР-покрытия) [45] и растягивающих (для ЭИЛ) [46] напряжений или отклонением состава фазы TaC от стехиометрического [47].

Механические характеристики покрытий и подложки: твердость (H), модуль Юнга (E) и упругое восстановление (W), приведены в табл. 2.

Более высокие механические свойства МР-покрытия могут быть связаны с высокой долей твердой карбидной фазы TaC [49; 50] и его мелкокристаллической структурой [38; 51; 52].

ЭИЛ- и МР-покрытия характеризовались стабильно низкими значениями коэффициента трения $\mu = 0,15$ (рис. 2, а, табл. 2). У стальной подложки во время первых 120 циклов значение μ плавно возрастало с 0,17 до 0,65. После этапа приработки коэф-

Таблица 2. Механические и трибологические характеристики покрытий и подложки

Table 2. Mechanical and tribological characteristics of coatings and substrate

Образец	H , ГПа	E , ГПа	W , %	μ	V_w , мм ³ /(Н·м)	
					Покрытие	Контртело
МР	28±1	288±5	76±2	0,15	<10 ⁻⁷	Налипание
ЭИЛ	10±1	278±4	33±1	0,15	<10 ⁻⁷	4,7·10 ⁻⁷
Сталь РН1	4*	200*	—	0,73	1,2·10 ⁻³	Налипание

* Справочные данные [48].

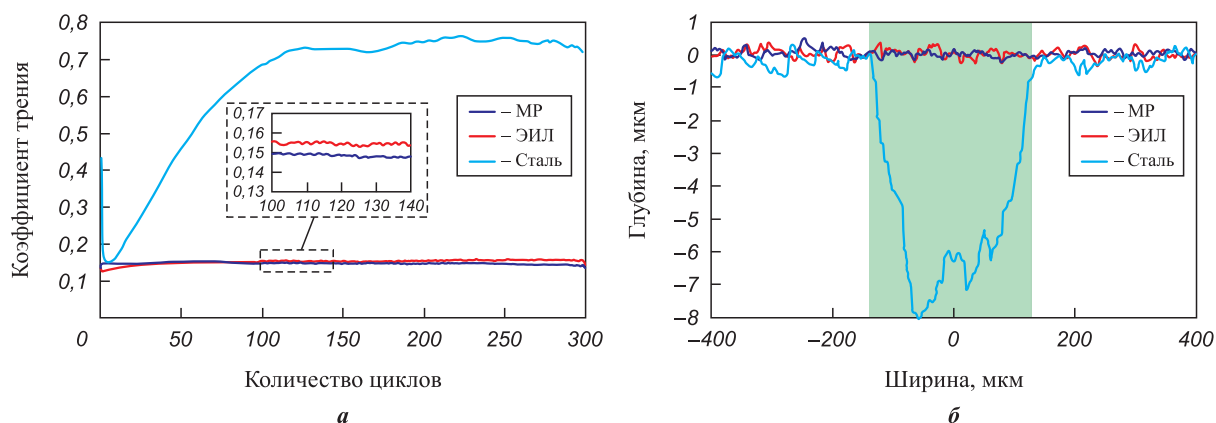


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от количества циклов (а) и двухмерные профили дорожек износа (б) покрытий и стальной подложки

Fig. 2. Friction coefficient depending on the number of cycles (a) and 2D profiles of wear tracks (b) for coatings and steel substrate

коэффициент трения стабилизировался на уровне 0,73. Таким образом, осаждение МР- и ЭИЛ-покрытий снижает этот показатель у стальной подложки в 5 раз. Пониженный коэффициент трения покрытий по сравнению с подложкой может быть связан с положительной ролью свободного углерода, который в ряде случаев может выделяться при пересыщении кристаллической карбидной фазы и играть при трении роль твердой смазки [53].

Двухмерные профили дорожек износа представлены на рис. 2, б. Глубина дорожки для МР- и ЭИЛ-покрытий находилась в пределах шероховатости и не превышала 150 нм, в то время для стальной подложки она составила 8 мкм. Приведенный износ (V_w), рассчитанный по двухмерным профилям, для покрытий МР и ЭИЛ не превышал 10^{-7} мм³/(Н·м), а для стальной подложки – $1,2 \cdot 10^{-3}$ мм³/(Н·м) (см. табл. 2). Отметим, что осаждение МР- и ЭИЛ-покрытий приводит к многократному увеличению износостойкости стальной подложки.

Микрофотографии зон трибологического контакта на поверхности шарика Al_2O_3 представлены на рис. 3. В случае МР-покрытия и стальной подложки выявлено незначительное налипание продуктов износа, в результате чего определение значений V_w контртела было затруднено. Для ЭИЛ-покрытия в зоне контакта наблюдались царапины, что свидетельствует об абразивном характере износа. При этом приведенный износ шарика Al_2O_3 составил $4,7 \cdot 10^{-7}$ мм³/(Н·м).

Испытания стальной клиновой задвижки показали, что количество рабочих циклов до протечки затвора в случае деталей с МР- и ЭИЛ-покрытиями составили 3750 и 5100 соответственно, в то время как для стальных деталей данные значения не превышают 3000 циклов. Таким образом, осаждение покрытий МР и ЭИЛ приводит к росту ресурса работы стальной клиновой задвижки на 25 и 70 %.

Внешний вид деталей с МР-покрытием, а также СЭМ-микрофотографии участков трибоконтакта после опытно-промышленных испытаний представлены на рис. 4, а. На поверхности детали в зоне трибологического контакта наблюдались царапины, что свидетельствует об абразивном характере износа. Согласно данным СЭМ и ЭДС по внутренним краям участков трибоконтакта можно выделить 3 зоны:

- 1 – отвечает исходному МР-покрытию с высоким содержанием углерода на поверхности;
- 2 – соответствует покрытию и окисленным продуктам износа подложки;
- 3 – относится к материалу подложки.

На рис. 4, б представлена поверхность стальной клиновой задвижки с ЭИЛ-покрытием, а также СЭМ-изображения участков в области трибоконтакта после опытно-промышленных испытаний. Перед их проведением ЭИЛ-покрытия подвергались

притирке на притирочной плите с использованием алмазного порошка дисперсностью 6 мкм до шероховатости 500 нм. На СЭМ-изображении поверхности детали с ЭИЛ-покрытием выделены две характерные области, отличающиеся по контрасту:

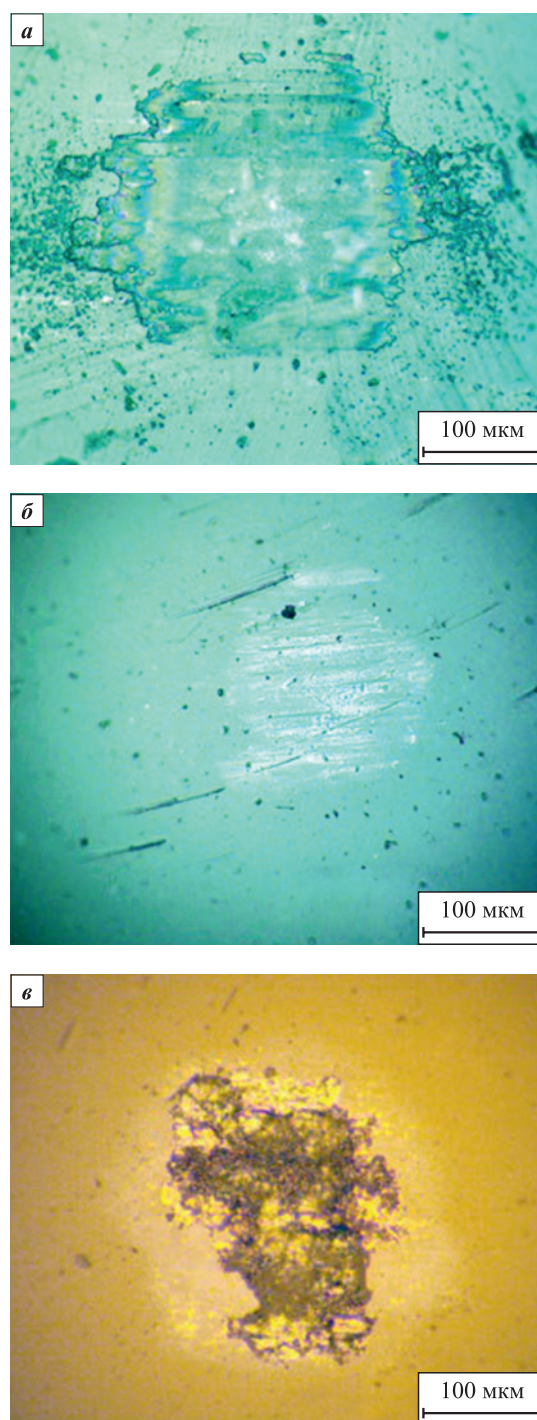


Рис. 3. Микрофотографии участков износа контртела после испытания покрытий МР (а), ЭИЛ (б) и стальной подложки (в)

Fig. 3. Micrographs of wear areas of the counterbody after tribological testing of the MS (a), ESD coatings (б) and the steel substrate (в)

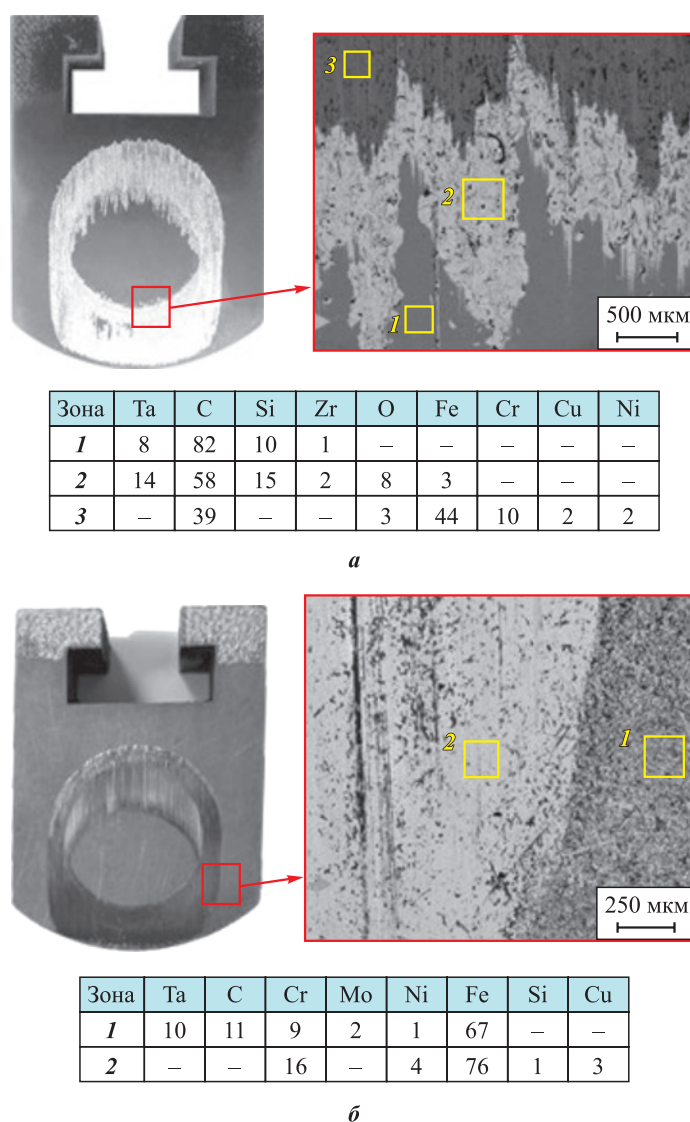


Рис. 4. Внешний вид деталей с покрытием после опытно-промышленных испытаний и СЭМ-микрофотографии с указанием состава (ат. %) участков трибоконтакта для покрытий МР (**a**) и ЭИЛ (**б**)

Fig. 4. Appearance of coated parts after pilot tests, SEM images and composition (at. %) of tribocontact areas for MS (**a**) and ESD (**b**) coatings

первая – светло-серого цвета отвечает изношенной поверхности образца до стали, а вторая – темно-серого цвета соответствует покрытию состава, ат. %: 10 Ta, 11 C, 67 Fe, 9 Cr, 2 Mo и 1 Ni. В области трибоконтакта происходило образование продуктов износа, которые состояли из смеси оксида железа и хрома. В процессе трения продукты износа затирались в царапины (см. рис. 4, б).

Таким образом, отличий в механизме износа покрытий МР и ЭИЛ не наблюдалось. Ключевым фактором, влияющим на износостойкость, является толщина покрытий. Лучшую износостойкость показало ЭИЛ-покрытие, обладающее большей толщиной. Преимущество МР-покрытий заключается в отсутствии необходимости дополнительной выглаживающей механической обработки.

Выводы

1. Методами магнетронного распыления и электроискрового легирования в вакууме были получены покрытия на основе карбида тантала составов Ta–Zr–Si–B–C и TaC–Fe–Cr–Mo–Ni соответственно. МР-покрытие толщиной 7 мкм состояло из аморфной матрицы на основе TaSi₂ с растворенными в ней цирконием и бором, а также кристаллитами TaC размером до 3 нм. ЭИЛ-покрытия толщиной 54 мкм состояли из матрицы на основе альфа-железа, в которой равномерно распределены кристаллиты TaC размером до 30 нм.

2. Концентрация TaC в МР-покрытии оказалась на 30 % выше, чем в ЭИЛ-покрытии, что обеспечило ему повышенную твердость ($H = 28$ ГПа против 10 ГПа).

3. Оба покрытия характеризовались низкими значениями коэффициента трения (0,15). Приведенный износ не превышал 10^{-7} мм³/(Н·м), в то время как у стальной подложки он составил $1,2 \cdot 10^{-3}$ мм³/(Н·м). Применение разработанных МР- и ЭИЛ-покрытий позволило снизить коэффициент трения в 5 раз и увеличить срок службы стальной клиновой задвижки запорной арматуры на 25 и 70 % соответственно.

Список литературы / References

- Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Renna G. Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: A short review. *Coatings*. 2022;12(10):1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>
- Kelly P.J., Arnell R.D. Magnetron sputtering: A review of recent developments and applications. *Vacuum*. 2000;56(3):159–172. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(99\)00189-X](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(99)00189-X)
- Kumar S., Singh R., Singh T.P., Sethi B.L. Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009; 209(8):3675–3687. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032>
- 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;201(3–4):1503–1510. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.015>
- Кудряшов А.Е., Замулаева Е.И., Левашов Е.А., Манакова О.С., Петржиж М.И. Применение технологии электроискрового легирования и модифицированных СВС-электродных материалов для повышения стойкости прокатных валков стана горячей прокатки. Ч. 1. Особенности формирования покрытий на подложках из белого чугуна СПХН-60. *Электронная обработка материалов*. 2018;54(5):43–55. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1464851>
Kudryashov A.E., Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Manakova O.S., Petrzhik M.I. Application of electrospark deposition process and modified SHS electrode materials to improve the endurance of hot mill rolls. Part 1. Features of coating formation on SPHN-60 white cast iron substrates. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2019;55(4):390–401. <https://doi.org/10.3103/S1068375519040057>
- Wang B., Wei S., Guo L., Wang Y., Liang Y., Xu B., Pan F., Tang A., Chen X. Effect of deposition parameters on properties of TiO₂ films deposited by reactive magnetron sputtering. *Ceramics International*. 2017;43(14):10991–10998. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.139>
- Wenbin F., Mingjiang D., Chunbei W., Mingchun Z., Liang H., Huijun H., Songsheng L. Magnetron sputtering preparation and properties of SiC/MoSi₂ oxidation protective coating for carbon/carbon composites prepared. *Rare Metallurgical and Materials Engineering*. 2016;45(10):2543–2548. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(17\)30031-0](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(17)30031-0)
- Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sheveyko A.N., Shvindina N.V., Levashov E.A., Shtansky D.V. Comparative study of Ti–C–Ni–Al, Ti–C–Ni–Fe, and Ti–C–Ni–Al/Ti–C–Ni–Fe coatings produced by magnetron sputtering, electro-spark deposition, and a combined two-step process. *Ceramics International*. 2018;44(7):7637–7646. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.187>
- Кудряшов А.Е., Замулаева Е.И., Левашов Е.А., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Шевейко А.Н., Швындина Н.В. Применение технологии электроискрового легирования и модифицированных СВС-электродных материалов для повышения стойкости прокатных валков стана горячей прокатки. Ч. 2. Структура и свойства сформированных покрытий. *Электронная обработка материалов*. 2019;55(2):10–22. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2629552>
Kudryashov A.E., Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sheveyko A.N., Shvindina N.V. Application of electrospark deposition and modified SHS electrode materials to improve the endurance of hot mill rolls. Part 2. Structure and properties of the formed coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2019;55(5):502–513. <https://doi.org/10.3103/S1068375519050089>
- Soma Raju K.R.C., Faisal N.H., Srinivasa Rao D., Joshi S.V., Sundararajan G. Electro-spark coatings for enhanced performance of twist drills. *Surface and Coatings Technology*. 2008;202(9):1636–1644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.07.084>
- Аксенов Л.Б., Петров В.М., Кудряшов А.Е., Галышев А.А. Сравнительная износостойкость покрытий электроискрового легирования с применением СВС-электродов с нанодисперсными модификаторами. *Металлообработка*. 2010;3(57):15–19.
Aksenov L.B., Petrov V.M., Kudryashov A.E., Galyshov A.A. Comparative wear resistance of electrospark alloying coatings using SHS electrodes with nanodispersed modifiers. *Metallobrabotka*. 2010;3(57):15–19. (In Russ.).
- Фомин А.А., Федосеев М.Е., Палканов П.А., Аман А., Кошуро В.А., Шумилин Х.И. Индукционно-термическая обработка стальных пуансонов с металлокерамическими покрытиями и диаграммы предельных деформаций для стали 45. *Вестник СГТУ*. 2020;1(84):87–92.
Fomin A.A., Fedoseev M.E., Palkanov P.A., Aman A., Koshuro V.A., Shumilin Kh.I. Induction-thermal treatment of steel punches with metal-ceramic coatings and limit strain diagrams for steel 45. *Vestnik SGTU*. 2020;1(84):87–92. (In Russ.).
- Yeldose B.C., Ramamoorthy B. An investigation into the high performance of TiN-coated rollers in burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;207(1–3):350–355. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.058>
- Kumar C.S., Urbikain G., López de Lacalle L.N., Gangopadhyay S., Fernandes F. Investigating the effect of novel self-lubricant TiSiVN films on topography, diffusion and oxidation phenomenon at the chip-tool interface during dry machining of Ti–6Al–4V alloy. *Tribology International*. 2023;186:108604. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108604>
- Schalk N., Tkadletz M., Mitterer C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. *Surface*

- and Coatings Technology. 2022;429:127949.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127949>
16. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Швейко А.Н., Комаров В.А., Блантер М.С., Скрылёва Е.А., Ширманов Н.А., Левашов Е.А., Штанский Д.В. Наноструктурные покрытия Ti–Cr–B–N и Ti–Cr–Si–C–N для твердосплавного режущего инструмента. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2010;(2):39–47.
Kiryukhantsev-Korneev F.V., Sheveiko A.N., Komarov V.A., Blanter M.S., Skryleva E.A., Shirmanov N.A., Levashov E.A., Shtansky D.V. Nanostructured Ti–Cr–B–N and Ti–Cr–Si–C–N coatings for hard-alloy cutting tools. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011; 52(3):311–318.
<https://doi.org/10.3103/S1067821211030138>
 17. Zeng X.T., Zhang S., Muramatsu T. Comparison of three advanced hard coatings for stamping applications. *Surface and Coatings Technology*. 2000;127(1):38–42.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00668-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00668-4)
 18. Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Иванов А.В., Исаенкова М.Г., Клюкова К.Е., Столбов С.Д. Структура защитного хромового покрытия, полученного методом термического испарения в магнетронном разряде на оболочечных трубах из сплава Э110. *Цветные металлы*. 2019;(4):33–40. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.04.04>
Berlin E.V., Grigoriev V.Yu., Ivanov A.V., Isaenkov M.G., Klyukova K.E., Stolbov S.D. Structure of the protective chromium coating obtained by a thermal evaporation method in a magnetron discharge on the cladding tube from E110 alloy. *Tsvetnye Metally*. 2019;(4):33–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.04.04>
 19. Kratochvílová I., Celbová L., Ashcheulov P., Kopeček J., Klimša L., de Prado E., Dragounová K. A., Luštinec J., Macák J., Sajdl P., Škoda R., Bulíř J. Polycrystalline diamond and magnetron sputtered chromium as a double coating for accident-tolerant nuclear fuel tubes. *Journal of Nuclear Materials*. 2023;578:154333.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154333>
 20. Рыженков А.В., Медников А.Ф., Григорьев С.В., Тхабисимов А.Б., Качалин Г.В., Логинова Н.А., Милованов О.Ю. Применение ионно-плазменных технологий формирования покрытий для снижения коррозионного и абразивного износа трубных поверхностей нагрева биотопливного котла. *Теплоэнергетика*. 2023;(10): 34–44. <https://doi.org/10.56304/S0040363623100089>
Ryzhenkov A.V., Mednikov A.F., Grigoriev S.V., Tkhabisimov A.B., Kachalin G.V., Loginova N.A., Milovanov O.Yu. The use of ion-plasma technologies for the formation of coatings to reduce corrosion and abrasive wear of tubular heating surfaces of a biofuel boiler. *Teploenergetika*. 2023;(10):34–44. (In Russ.).
<https://doi.org/10.56304/S0040363623100089>
 21. Yang S., Gao S., Xue W., Wu B., Cheng H., Duan D. Epitaxial growth and oxidation behavior of the NiCoCrAl YTa/Y₂O₃ coating on a nickel-based single-crystal superalloy blade tips, produced by electro spark deposition. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;931:167600.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167600>
 22. Беляков А.В., Горбачев А.Н., Михайлов В.В., Реутов Б.Ф., Фокин А.А. Установки для формирования эрозионно- и абразивостойких электроискровых покрытий на лопатках паровых турбин тепловых и атомных электростанций. *Электронная обработка материалов*. 2016; 52(5):79–89.
Belyakov A.V., Gorbachev A.N., Mikhailov V.V., Reutov B.F., Fokin A.A. Installations for producing electrosark erosion- and abrasion-resistant coatings on the blades of steam turbines of thermal and nuclear power plants. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017;53(3):274–284.
<https://doi.org/10.3103/S1068375517030036>
 23. Тарельник В.Б., Паустовский А.В., Ткаченко Ю.Г., Марциновский В.С., Коноплянченко Е.В., Антошевский К. Электроискровые покрытия на стальной основе и контактной поверхности для оптимизации рабочих характеристик баббитовых подшипников скольжения. *Электронная обработка материалов*. 2017;53(1):37–46.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1048993>
Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G., Martinkovsky V.S., Konoplyanchenko E.V., Antoshevsky K. Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017;53(3):285–294.
<https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>
 24. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х. Об электроискровом способе нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности. *Электронная обработка материалов*. 2014;50(5):7–12.
Ivanov V.I., Burumkulov F.K. On electrodeposition of thick coatings of increased continuity. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014;50(5):377–383.
<https://doi.org/10.3103/S1068375514050056>
 25. Величко С.А., Сенин П.В., Иванов В.И., Чумаков П.В. Формирование толстослойных электроискровых покрытий для восстановления изношенных деталей силовых гидроцилиндров. *Электронная обработка материалов*. 2016;52(5):13–20.
Velichko S.A., Senin P.V., Ivanov V.I., Martynov A.V., Chumakov P.V. Formation of thick layer electro-spark coatings for restoring worn-out parts of power hydraulic cylinders. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017;53(2):116–123.
<https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>
 26. Бурумкулов Ф.Х., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А., Сульдин С.П. Повышение надежности гидронасосов типа НШ-У электроискровым легированием рабочих поверхностей пар трения. *Электронная обработка материалов*. 2005;6(41):13–18.
Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I., Velichko S.A., Ionov P.A., Suldin S.P. Increasing of reliability of hydraulic pumps NSh-U by electric spark alloying of the working surfaces of friction couples. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2005;6(41):13–18. (In Russ.).
 27. Куптсов К.А., Антонюк М.Н., Швейко А.Н., Бондарев А.В., Игнатов С.Г., Слукин П.В., Диведи П., Фраиле А., Полкар Т., Штанский Д.В. High-entropy Fe–Cr–Ni–Co–(Cu) coatings produced by vacuum electro-spark deposition for marine and coastal applications. *Surface and Coatings Technology*. 2023;453:129136.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129136>

28. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В. Совершенствование технологии электронно-дугового легирования стальных деталей буровых установок и горнодобывающего оборудования. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(1):88–97.
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-1-88-97>
 Korotaev D.N., Ivanova E.V. Improvement of electrospark deposition technology of steel units for drilling rigs and mining equipment. *Geologiya i razvedka*. 2022;64(1):88–97. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-1-88-97>
29. Плахотникова Е.В., Елисеєва Т.А. Анализ причин нарушения работоспособности электроприводной запорной арматуры. *Известия ТулГУ*. 2013;(11):352–361.
 Plakhotnikova E.V., Eliseeva T.A. Analysis of the causes of malfunction of electric shut-off valves. *Izvestiya TulGU*. 2013;(11):352–361. (In Russ.).
30. Васильев А.С., Суханов Ю.В., Шукин П.О., Галактионов О.Н. Совершенствование эксплуатационных показателей запорной трубопроводной арматуры. *Инженерный вестник Дона*. 2014;(3):11.
 Vasiliev A.S., Sukhanov Yu.V., Shchukin P.O., Galaktionov O.N. Improving the performance of shut-off pipeline valves. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2014;(3):11. (In Russ.).
31. Расулов В.А. К вопросу о надежности и долговечности трубопроводных клиновых задвижек. *Вестник арматуростроителя*. 2016;5(33):52–53.
 Rasulov V.A. To the question of the reliability and durability of pipeline wedge valves. *Vestnik armaturostroitel'ya*. 2016;5(33):52–53. (In Russ.).
32. Казанцев М.Н., Флегентов И.А., Петелин А.Н. Пути повышения надежности запорной арматуры для магистральных трубопроводов (на примере задвижек шибберных). *Нефтегазовое дело*. 2016;14(4):75–81.
 Kazantsev M. N., Flegentov I. A., Petelin A. N. Ways to improve the reliability of shut-off valves for main pipelines (on the example of slide gate valves). *Neftegazovoe delo*. 2016;14(4):75–81. (In Russ.).
33. Качалин Г.В., Рыженков А.В., Медников А.Ф. Современные ионно-плазменные технологии для упрочнения элементов арматуры оборудования ТЭК. *Neftegaz.RU*. 2015;(1-2):38–41.
 Kachalin G.V., Ryzhenkov A.V., Mednikov A.F. Modern ion-plasma technologies for hardening elements of fittings for fuel and energy complex equipment. *Neftegaz.RU*. 2015;(1-2):38–41. (In Russ.).
34. Luo H., Yazdi M. A., Chen S., Sun H., Gao F., Heintz O., Monteynard A., Sanchette F., Billard A. Structure, mechanical and tribological properties, and oxidation resistance of TaC/a-C:H films deposited by high power impulse magnetron sputtering. *Ceramics International*. 2022;46(16, Part A):24986–25000.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.284>
35. Lasfargues H., Glechner T., Koller C.M., Paneta V., Primetzhofner D., Kolozsvári S., Holec D., Riedl H., Mayrhofer P.H. Non-reactively sputtered ultra-high temperature Hf–C and Ta–C coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2017;309:436–444.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.073>
36. Kuptsov K.A., Antonyuk M.N., Bondarev A.V., Sheveyko A.N., Shtansky D.V. Electrospark deposition of wear and corrosion resistant Ta(Zr)C–(Fe,Mo,Ni) coatings to protect stainless steel from tribocorrosion in seawater. *Wear*. 2021;486–487:204094.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204094>
37. Du S., Wen M., Yang L., Ren P., Meng Q., Zhang K., Zheng W. Structural, hardness and toughness evolution in Si-incorporated TaC films. *Ceramics International*. 2018;44(8):9318–9325.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.144>
38. Kiryukhantsev-Korneev P.V., Sytchenko A.D., Vorotilo S.A., Klechkovskaya V.V., Lopatin V.Y., Levashov E.A. Structure, oxidation resistance, mechanical, and tribological properties of N- and C-Doped Ta–Zr–Si–B hard protective coatings obtained by reactive D.C. magnetron sputtering of TaZrSiB ceramic cathode. *Coatings*. 2020;10(10):946.
<https://doi.org/10.3390/coatings10100946>
39. Veprek S., Veprek-Heijman G.J., Karvankova P., Prochazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites. *Thin Solid Films*. 2005;476(1):1–29.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.10.053>
40. Vorotilo S., Levashov E.A., Kurbatkina V. V., Patsera E.I., Loginov P.A., Lopatin V.Y., Orekhov A.S. Theoretical and experimental study of combustion synthesis of microgradient ULTRA high-temperature ceramics in Zr–Ta–Si–B system. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021;41(9):4728–4746.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.008>
41. Kiryukhantsev-Korneev P. V., Sytchenko A.D., Sviridova T.A., Sidorenko D.A., Andreev N. V., Klechkovskaya V.V., Polčák J., Levashov E.A. Effects of doping with Zr and Hf on the structure and properties of Mo–Si–B coatings obtained by magnetron sputtering of composite targets. *Surface and Coatings Technology*. 2022;442:128141.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128141>
42. Kiryukhantsev-Korneev P.V., Sytchenko A.D., Gorshkov V.A., Loginov P.A., Sheveyko A.N., Nozhkina A.V., Levashov E.A. Complex study of protective Cr₃C₂–NiAl coatings deposited by vacuum electro-spark alloying, pulsed cathodic arc evaporation, magnetron sputtering, and hybrid technology. *Ceramics International*. 2022;48(8):10921–10931.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.311>
43. Kiryukhantsev-Korneev P.V., Pierson J.F., Bychkova M.Y., Manakova O.S., Levashov E.A., Shtansky D.V. Comparative study of sliding, scratching, and impact-loading behavior of hard CrB₂ and Cr–B–N Films. *Tribology Letters*. 2016;63(3):44.
<https://doi.org/10.1007/s11249-016-0729-0>
44. Levashov E.A., Shtansky D.V., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Petrzhik M.I., Tyurina M.Y., Sheveyko A.N. Multifunctional nanostructured coatings: Formation, structure, and the uniformity of measuring their mechanical and tribological properties. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010(10):917–935.
<https://doi.org/10.1134/S0036029510100113>
45. Abadias G., Chason E., Keckes J., Sebastiani M., Thompson G.B., Barthel E., Doll G.L., Murray C.E., Stoessel C.H., Martinu L. Stress in thin films and coatings: Current status, challenges, and prospects. *Journal of Vacuum*

- Science & Technology A. Vacuum Surfaces and Films.* 2018;36(2):020801. <https://doi.org/10.1116/1.5011790>
46. Paustovskii A.V., Gubin Y.V. Stresses in coatings obtained by electro-spark alloying and laser processing (review). *Journal of Materials Science.* 1997;33(6):770–776. <https://doi.org/10.1007/BF02355555>
 47. Chen Z., Zhou N. Surface modification of resistance welding electrodes by electro-spark deposited coatings. Part I. Coating characterization. *Surface and Coatings Technology.* 2006;201(3–4):1503–1510. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.015>
 48. StainlessSteel PH1: нержавеющей сталь. <https://candtouch.ru/3d-printing-stainlesssteel-ph1/> (Дата обращения 07.05.2023).
 49. Hu J., Li H., Li J., Huang J., Kong J., Zhu H., Xiong D. Structure, mechanical and tribological properties of TaC_x composite films with different graphite powers. *Journal of Alloys and Compounds.* 2020;832:153769. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153769>
 50. Du S., Zhang K., Wen M., Qin Y., Li R., Jin H., Bao X., Ren P., Zheng W. Optimizing the tribological behavior of tantalum carbide coating for the bearing in total hip joint replacement. *Vacuum.* 2018;150:222–231. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.01.050>
 51. Pogrebnjak A.D., Beresnev V.M. Hard nanocomposite coatings, their structure and properties. *Nanocomposites – New Trends Dev.* 2012;517:1–38. <https://doi.org/10.5772/50567>
 52. Musil J., Zeman P., Baroch P. Hard Nanocomposite Coatings. *Comprehensive Materials Processing.* 2014;4:325–353. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00416-7>
 53. Sánchez-López J.C., Martínez-Martínez D., López-Carres C., Fernández A. Tribological behaviour of titanium carbide/amorphous carbon nanocomposite coatings: From macro to the micro-scale. *Surface and Coatings Technology.* 2008;202(16):4011–4018. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.02.012>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Алина Дмитриевна Сытченко – мл. науч. сотрудник лаборатории «In situ диагностика структурных превращений» научно-учебного центра (НУЦ) СВС, МИСИС–ИСМАН, Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСИС».

 **ORCID:** 0000-0002-8668-5877

 **E-mail:** alina-sytchenko@yandex.ru

Мария Николаевна Фатыхова – мл. науч. сотрудник лаборатории «In situ диагностика структурных превращений» НУЦ СВС, МИСИС–ИСМАН.

 **ORCID:** 0000-0001-6817-5999

 **E-mail:** mariya.antonyuck@ya.ru

Виктор Павлович Кузнецов – д.т.н., профессор кафедры термобработки и физики металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

 **ORCID:** 0000-0001-8949-6345

 **E-mail:** wpkuzn@mail.ru

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

 **ORCID:** 0000-0003-2585-0733

 **E-mail:** kuptsov.k@gmail.com

Михаил Иванович Петржик – д.т.н., профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ МИСИС; вед. науч. сотрудник лаборатории «In situ диагностика структурных превращений» НУЦ СВС, МИСИС–ИСМАН.

 **ORCID:** 0000-0002-1736-8050

 **E-mail:** mi_p@mail.ru

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

 **ORCID:** 0000-0001-6222-4497

 **E-mail:** aekudr@yandex.ru

Филипп Владимирович Кирюханцев-Корнеев – д.т.н., доцент кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ МИСИС; зав. лабораторией «In situ диагностика структурных превращений» НУЦ СВС, МИСИС–ИСМАН.

 **ORCID:** 0000-0003-1635-4746

 **E-mail:** kiruhancev-korneev@yandex.ru

Alina D. Sytychenko – Junior Research Scientist of the Laboratory “In situ Diagnostics of Structural Transformations” of Scientific-Educational Center of Self-Propagating High-Temperature Synthesis (SHS-Center), MISIS–ISMAN, National University of Science and Technology (NUST) MISIS.

 **ORCID:** 0000-0002-8668-5877

 **E-mail:** alina-sytchenko@yandex.ru

Maria N. Fatykhova – Junior Research Scientist of the Laboratory “In situ Diagnostics of Structural Transformations” of SHS-Center, MISIS–ISMAN.

 **ORCID:** 0000-0001-6817-5999

 **E-mail:** mariya.antonyuck@ya.ru

Victor P. Kuznetsov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Heat Treatment and Physics of Metals, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin.

 **ORCID:** 0000-0001-8949-6345

 **E-mail:** wpkuzn@mail.ru

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

 **ORCID:** 0000-0003-2585-0733

 **E-mail:** kuptsov.k@gmail.com

Mikhail I. Petrzhik – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, NUST MISIS; Leading Researcher of the Laboratory “In situ diagnostics of structural transformations” of SHS-Center, MISIS–ISMAN.

 **ORCID:** 0000-0002-1736-8050

 **E-mail:** mi_p@mail.ru

Alexander E. Kudryashov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory “In situ diagnostics of structural transformations” of SHS-Center, MISIS–ISMAN.

 **ORCID:** 0000-0001-6222-4497

 **E-mail:** aekudr@yandex.ru

Philipp V. Kiryukhantsev-Korneev – Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof., Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, NUST MISIS; Head of the Laboratory “In situ diagnostics of structural transformations” of SHS-Center, MISIS–ISMAN.

 **ORCID:** 0000-0003-1635-4746

 **E-mail:** kiruhancev-korneev@yandex.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

А. Д. Сытченко – проведение структурных исследований, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулировка выводов.

М. Н. Фатыхова – проведение трибологических исследований, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулировка выводов.

В. П. Кузнецов – организация опытно-промышленных испытаний изделий с покрытиями.

К. А. Купцов – нанесение покрытий методом электроискрового осаждения в вакууме, корректировка текста.

М. И. Петржик – определение механических характеристик покрытий.

А. Е. Кудряшов – отработка энергетических режимов электроискрового осаждения.

Ф. В. Кирюханцев-Корнеев – нанесение покрытий методом магнетронного распыления, научное руководство, корректировка текста статьи.

A. D. Sytchenko – conducted structural studies, analyzed the research results, authored the manuscript, and formulated conclusions.

M. N. Fatykhova – conducted tribological studies, analyzed the research results, authored the manuscript, and formulated conclusions.

V. P. Kuznetsov – organized pilot tests of products with coatings.

K. A. Kuptsov – deposition of coatings by electrospark deposition in a vacuum, manuscript revision.

M. I. Petrzhik – determined mechanical characteristics of the coatings.

A. E. Kudryashov – adjusted energy modes of electrospark deposition

Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev – applied coatings by magnetron sputtering, provided scientific guidance, and revised the manuscript.

Статья поступила 19.05.2023 г.
Доработана 20.06.2023 г.
Принята к публикации 26.06.2023 г.

Received 19.05.2023
Revised 20.06.2023
Accepted 26.06.2023