

Научная статья

УДК 621.793

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-94-102

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОДЛОЖКИ НА СОСТАВ И СТРУКТУРУ ОСАЖДАЕМОГО КОНДЕНСАТА В ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ NiCrAl

С.А. Будиновский¹, А.С. Бенклян¹, Е.Н. Азаровский¹, С.В. Татарников¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния электрического потенциала подложки в диапазоне от 0 до 150 В на структуру и состав покрытий системы NiCrAl, легированных тугоплавкими металлами (Ta, Hf и Re). Показано, что скорость нанесения всех трех выбранных сплавов покрытий линейно снижается с ростом отрицательного потенциала подложки вплоть до нулевого значения при потенциале ~200 В, что связано с присутствием в плазме вакуумного дугового разряда высокоэнергетичных многозарядных ионов металлов. С ростом отрицательного электрического потенциала подложки элементный состав конденсата также изменяется.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, ионно-плазменные покрытия, вакуумный дуговой процесс

Для цитирования: Будиновский С.А., Бенклян А.С., Азаровский Е.Н., Татарников С.В. Влияние электрического потенциала подложки на состав и структуру осаждаемого конденсата в ионно-плазменном технологическом процессе нанесения покрытий системы NiCrAl // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 94–102. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-94-102.

Scientific article

THE EFFECT OF SUBSTRATE ELECTRICAL POTENTIAL ON THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF DEPOSITED CONDENSATE IN THE ION-PLASMA PROCESS OF NiCrAl COATING

S.A. Budinovskiy¹, A.S. Benklyan¹, E.N. Azarovskiy¹, S.V. Tatarnikov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The results of a study examining the effect of substrate electrical potential in the range from 0 to 150 V on the structure and composition of NiCrAl coatings alloyed with refractory metals (Ta, Hf, and Re) are presented. It is shown that the deposition rate of all three selected coating alloys decreases linearly with increasing substrate electrical potential, reaching zero at approximately 200 V. This is due to the presence of high-energy, multiply charged metal ions in the vacuum arc discharge plasma. The elemental composition of the condensate also changes with increasing substrate electrical potential.

Keywords: heat-resistant nickel alloys, ion-plasma coatings, vacuum arc process

For citation: Budinovskiy S.A., Benklyan A.S., Azarovskiy E.N., Tatarnikov S.V. The effect of substrate electrical potential on the composition and structure of deposited condensate in the ion-plasma process of NiCrAl coating. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 94–102. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-94-102.

Введение

Современные газотурбинные двигатели, применяемые как в авиации, энергетике, так и в промышленности, работают при чрезвычайно высоких температурах и нагрузках. Повышение термической эффективности и тяговых характеристик двигателя напрямую связано с ростом температуры газа перед турбиной, что требует применения жаростойких и коррозионностойких материалов и, соответственно, специальных технологий защиты поверхностей ответственных деталей турбины. Однако даже самые совершенные сплавы на основе никеля или кобальта не способны длительно выдерживать температуры, превышающие 1000–1100 °С, без потери механических свойств. Именно поэтому использование защитных покрытий на деталях горячего тракта газотурбинного двигателя является одним из ключевых направлений для повышения рабочих характеристик, ресурса и надежности газотурбинных установок в целом.

Горячий тракт двигателя включает камеру сгорания, направляющие и рабочие лопатки турбины, жаровые трубы, сопловые аппараты и другие элементы, непосредственно контактирующие с продуктами сгорания. Эти детали испытывают не только воздействие высоких температур, но и агрессивное влияние окислительной и коррозионной среды, термоциклических нагрузок и т. д. Без применения технологии защитных покрытий даже самые жаростойкие сплавы достаточно быстро деградируют.

Существенное значение имеет устойчивость покрытия к термоциклическим нагрузкам: в процессе запуска или остановки двигателя, при наборе или снижении мощности происходит быстрое изменение температуры, вызывающее термическое расширение различных слоев. Температура поверхностных слоев резко изменяется во временном интервале, исчисляемом в секундах, в то время как во внутренних частях деталей двигателя температура изменяется существенно медленнее, что вызывает неравномерное тепловое расширение всей конструкции в целом и создает внутренние напряжения на границе системы «подложка–покрытие», а это в свою очередь приводит к необходимости согласования температурных коэффициентов линейного расширения подложки и покрытия.

Применение защитных покрытий особенно важно для рабочих лопаток турбины, работающих в наиболее термически нагруженной зоне двигателя. Рабочая лопатка турбины высокого давления современного газотурбинного авиационного, энергетического или транспортного агрегата является наиболее ответственной деталью, ресурс работы которой зачастую определяет срок службы всего устройства в целом.

При эксплуатации покрытия могут повреждаться и/или терять свои защитные свойства. Важно отметить, что технология нанесения защитных покрытий позволяет полноценно реализовать комплексный ремонт деталей горячего тракта газотурбинного двигателя: после очистки поверхности деталей от нагара, продуктов газовой коррозии и отработанных покрытий, термической обработки (с целью восстановления структуры материала), дефектоскопического контроля, восстановления геометрической формы поврежденных участков поверхности и механической обработки возможно нанесение новых покрытий на поверхность ремонтируемой детали. Ремонтные технологии позволяют восстанавливать защитные свойства без полной замены дорогостоящих деталей, что существенно снижает стоимость жизненного цикла двигателя.

Применение защитных покрытий – один из ключевых факторов развития газотурбинных технологий. Они позволяют повысить рабочие температуры, увеличить ресурс деталей, снизить эксплуатационные расходы и улучшить экономические показатели двигателя. Без эффективных защитных покрытий дальнейшее совершенствование газотурбинных агрегатов было бы невозможно, так как именно защитные покрытия обеспечивают баланс между физическими пределами материалов и конструктивными требованиями к современным эффективным газовым турбинам различного назначения.

Для нанесения защитных покрытий различного назначения на поверхность деталей турбин в отечественном авиастроении применяют источники сильно ионизованной металлической плазмы вакуумного дугового разряда с расходуемым катодом из материала покрытия [1–7]. Высокая степень ионизации атомов металлов в плазме дугового разряда (90 % и более) позволяет эффективно управлять кинетической энергией ионов путем подачи отрицательного электрического потенциала на покрываемые детали относительно положительно заряженного «опорного» электрода в плазме разряда. В промышленности реализованы процессы нанесения покрытий из многокомпонентных сплавов металлов в условиях ионной бомбардировки конденсата, нанесения покрытий плазмохимическим способом в присутствии реакционноспособных газов, радиационно-стимулированной диффузии, каскадного перемешивания имплантируемых атомов и др. [8–11]. Наиболее подробно в научно-технической литературе представлены результаты исследований плазмохимических процессов нанесения в плазме вакуумной дуги твердых покрытий на основе карбидов и нитридов хрома, титана, алюминия и др. или их сплавов.

В данной статье представлены результаты исследований влияния отрицательного электрического потенциала подложки на состав и структуру конденсата в ионно-плазменном технологическом процессе нанесения защитных покрытий из многокомпонентных никелевых сплавов в диапазоне от 0 до 150 В. В научно-технической литературе отсутствует информация о влиянии отрицательного электрического потенциала подложки на свойства покрытий в этом диапазоне напряжений и соответствующих температур. Поэтому результаты исследований влияния электрического потенциала подложки на структуру и состав формирующихся в вакуумно-дуговом процессе конденсатов из сплавов для защиты лопаток турбин имеют практический интерес.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

В работе исследовано влияние отрицательного электрического потенциала подложки в диапазоне от 0 до 150 В с шагом 50 В на структуру и состав трех никелевых сплавов для нанесения защитных покрытий на промышленных ионно-плазменных установках типа МАП с расходуемым катодом из материала покрытия, в том числе сплавов П1 (NiCrAlY), П2 (NiCrAlReHfY) и П3 (NiCrAlTaReHfY). Покрытия толщиной 60–80 мкм наносили на плоские образцы из жаропрочного никелевого сплава типа ЖС32 по серийной технологии, предусматривающей промывку образцов в органических растворителях, обдувку поверхности мелким корундом и травление поверхности образцов в плазме вакуумного дугового разряда в промышленной ионно-плазменной установке типа МАП перед нанесением покрытия [12–15]. После нанесения покрытий половину образцов каждого вида отжигали в вакууме в течение 3 ч при температуре 1050 °С и давлении 10^{-1} Па. Из образцов изготовлены шлифы для проведения металлографических исследований микроструктуры конденсата в исходном состоянии и после вакуумной термической обработки на оптическом (при увеличении $\times 500$) и электронном микроскопах.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости скорости нанесения покрытий из трех сплавов П1, П2 и П3 от величины электрического отрицательного потенциала подложки и результаты аппроксимации этих зависимостей линиями тренда. На рис. 1 также представлены уравнения линий тренда и коэффициенты детерминации R^2 . Для всех трех уравнений коэффициент детерминации составил от 0,95 до 0,99, что свидетельствует о достаточно высокой достоверности аппроксимации полученных данных. Видно, что скорость нанесения покрытий практически одинакова для всех трех

сплавов П1, П2 и П3 независимо от их элементного состава. С ростом величины отрицательного потенциала на подложке скорость напыления снижается и в диапазоне 150–200 В имеет нулевое значение для всех трех сплавов. В этом диапазоне значений электрического потенциала подложки количество конденсирующегося на подложке из металлической плазмы вакуумно-дугового разряда распыляемого материала покрытия равно количеству удаляемого под действием ионной бомбардировки многозарядными ионами материала конденсата. Аналогичные результаты получены для покрытия из сплава П3. Для дальнейших исследований влияния потенциала подложки на состав и структуру конденсатов выбран диапазон напряжений от 0 до 150 В с шагом 50 В.

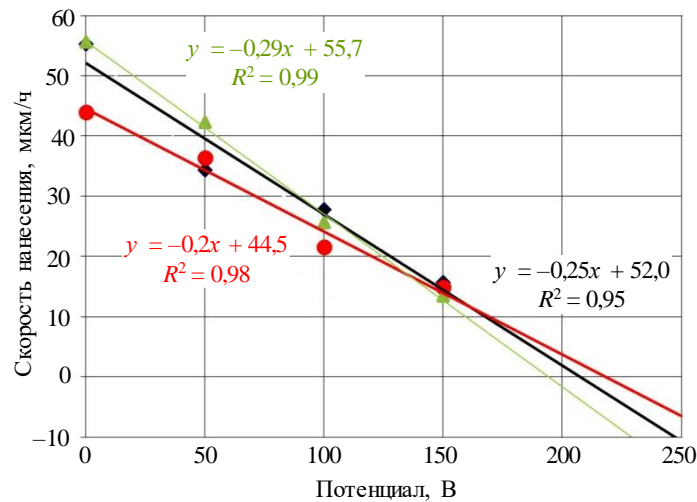


Рис. 1. Зависимости скорости нанесения покрытий из сплавов П1 (◆), П2 (●) и П3 (▲) от величины электрического потенциала подложки

Микроструктуры покрытий, полученных из сплава П1 и нанесенных при разных потенциалах подложки (0, 50, 100 и 150 В), в исходном состоянии и после термической обработки в вакууме представлены на рис. 2 и 3.

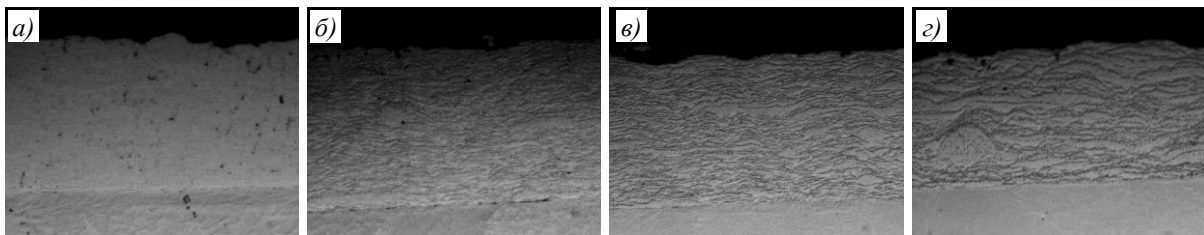


Рис. 2. Микроструктуры покрытий, полученных из сплава П1, при электрических потенциалах подложки 0 (а), 50 (б), 100 (в) и 150 В (г) без проведения вакуумной термообработки

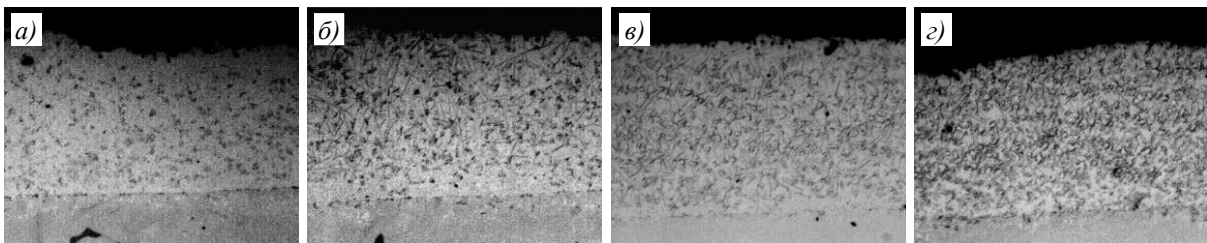


Рис. 3. Микроструктуры покрытий, полученных из сплава П1, при электрических потенциалах подложки 0 (а), 50 (б), 100 (в) и 150 В (г) после вакуумной термической обработки при температуре 1050 °С в течение 3 ч

Покрытие, нанесенное при нулевом электрическом потенциале подложки, имеет однородную гомогенную структуру (рис. 2, *a*). С ростом отрицательного электрического потенциала подложки в диапазоне от 50 до 150 В происходит ее дополнительный разогрев ускоренными ионами металлической плазмы вакуумно-дугового разряда, сопровождающийся однотипными фазовыми превращениями структуры (рис. 2, *b–z*). Структура осаждаемого конденсата трансформируется и становится двухфазной, состоящей из серой матрицы, по-видимому, на основе γ -фазы (NiCr) и более светлых плоских включений, представляющих собой застывшие металлические капли материала катода из сплава П1, которые всегда присутствуют в больших количествах в плазме вакуумного дугового разряда с горячим металлическим катодом. С ростом температуры конденсата происходит растворение мелких капель, а количество более крупных – увеличивается (рис. 2, *b–z*).

В конденсате покрытия, полученного из сплава П1, прошедшем вакуумную термическую обработку после нанесения покрытий при разных потенциалах подложки в диапазоне от 0 до 150 В, микроструктура покрытий изначально имеет хаотический смешанный характер и состоит из γ -фазы (NiCr) и α -Cr (рис. 3). Видно, что различия микроструктуры покрытий, полученных при потенциале 0 В до и после вакуумной термической обработки, минимальны (рис. 3, *a, б*).

Дальнейшие исследования проводили с использованием катодов из сплавов системы NiCrAl (сплавы П1 и П2), дополнительно легированных тугоплавкими элементами (рений, гафний, тантал), улучшающими защитные свойства жаростойких покрытий в области температур >1100 °С.

В таблице представлены составы осажденных конденсатов, полученных с использованием катодов из сплавов П1, П2 и П3 при разных значениях потенциала подложки (0, 50, 100 и 150 В).

**Элементный состав покрытий (конденсатов)
в зависимости от электрического потенциала подложки**

Покрытие	Потенциал подложки U , В	Элементы конденсата				
		Cr	Al	Ta	Re	Hf
П1	0	31,1/31,9	2,15/1,34	0	0	0
	50	33,2/32,6	1,76/2,96	0	0	0
	100	35,2/37,2	2,10/2,10	0	0	0
	150	36,9/34,75	1,70/1,99	0	0	0
П2	0	22,7/22,0	10,1/9,47	0	0,95/0,99	1,17/1,11
	50	26,9/26,0	6,1/5,99	0	0,75/0,99	1,36/1,09
	100	29,8/27,9	5,52/6,27	0	1,34/1,52	1,47/1,03
	150	29,2/27,6	6,51/5,33	0	1,68/1,53	1,77/1,07
П3	0	12,4/11,9	10,0/9,15	3,25/3,71	0,62/0,83	1,21/1,17
	50	14,7/14,19	5,74/6,27	4,16/4,37	0,78/0,88	1,44/1,05
	100	13,1/11,5	7,28/7,94	5,67/5,6	0,79/1,09	1,25/1,09
	150	7,69/5,95	7,94/9,59	6,51/6,82	1,85/1,25	1,97/1,3

Примечание. В числителе приведено содержание элемента в покрытии до вакуумной термической обработки, а в знаменателе – после такой обработки.

Из представленных в таблице данных видно, что в условиях бомбардировки поверхности осаждаемого конденсата ионами атомов металлов, входящих в состав покрытия, возникает селективное (выборочное) катодное распыление алюминия. Эффект

имеет место как для осажденного конденсата в исходном состоянии, так и после проведения его вакуумной термической обработки.

В таблице представлен состав осажденного конденсата из сплава П2 для разных значений потенциала подложки. Несмотря на значительное увеличение в составе катода из сплава П2 алюминия (по сравнению с катодом из сплава П1) при приблизительно том же содержании хрома, доля алюминия – основного элемента, обеспечивающего жаростойкость покрытия, снижается в 2 раза в осажденном конденсате. В состав покрытия, полученного из сплава П3, для повышения циклической жаростойкости при температурах 1150 °С и более введены тантал, рений и гафний. По результатам анализа элементного состава покрытий, полученных из сплавов П2 и П3, представленных в таблице, рост потенциала подложки и вакуумная термическая обработка незначительно влияют на исходное содержание тантала, рения и гафния в исследуемых покрытиях.

На рис. 4 представлены микроструктуры покрытия из сплава П3, нанесенного при разных потенциалах подложки (0, 50, 100 и 150 В), в исходном состоянии. Микроструктура покрытий из сплава П3 без вакуумной термической обработки идентична двухфазной структуре покрытий, полученных из сплавов П1 и П2 при разных потенциалах подложки (рис. 4).

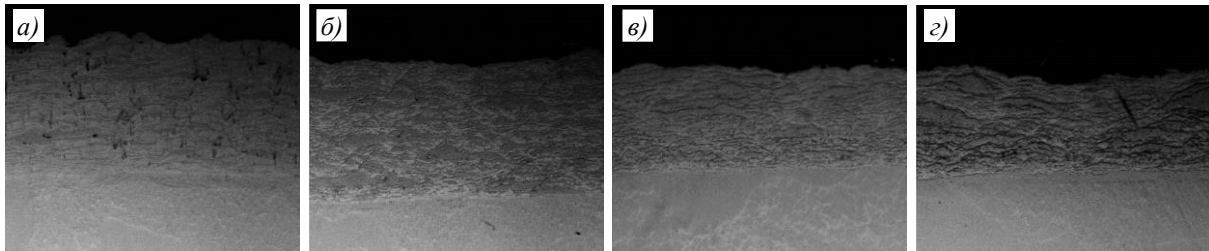


Рис. 4. Микроструктуры покрытий, полученных из сплава П3, при электрических потенциалах подложки 0 (а), 50 (б), 100 (в) и 150 В (г) без проведения вакуумной термической обработки

Несмотря на различия в элементных составах сплавов П1 и П2, осажденный конденсат из сплава П3 после вакуумной термической обработки имеет структуру, аналогичную покрытиям, полученным из сплавов П1 и П2 и характерную для сплавов системы NiCrAlY (рис. 5). Исследования эволюции микроструктуры покрытий, полученных из сплавов П1, П2 и П3, в зависимости от величины отрицательного электрического потенциала подложки показали их полную идентичность.

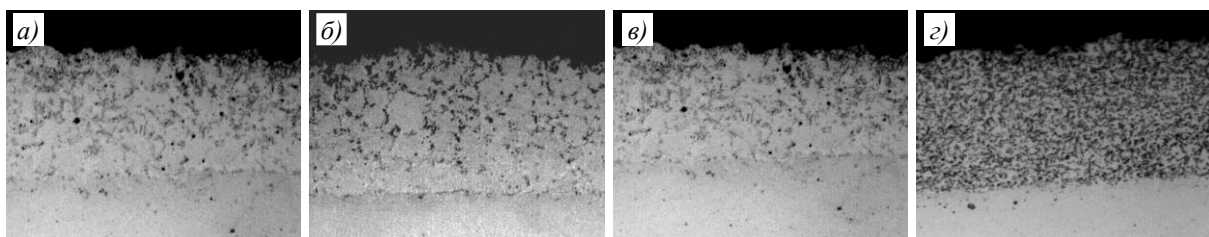


Рис. 5. Микроструктуры покрытий, полученных из сплава П3, при электрических потенциалах подложки 0 (а), 50 (б), 100 (в) и 150 В (г) после вакуумной термической обработки при температуре 1050 °С в течение 3 ч в вакууме

Результаты исследования элементного состава покрытий из сплава П3, дополнительно легированного танталом, показали, что наиболее заметное изменение в составе осаждаемого конденсата, как и в предыдущих случаях, в покрытиях претерпевает доля алюминия и хрома. Следует также отметить изменения состава покрытия, полученного

из сплава ПЗ, в сторону роста доли алюминия при потенциале 100–150 В. Очевидно, что при этом потенциале подложки ее температура достигает уровня, обеспечивающего повышение диффузионной подвижности алюминия и прирост доли алюминия в осажденном конденсате.

Заключения

По результатам совокупного анализа влияния отрицательного электрического потенциала подложки в диапазоне от 0 до 150 В на структуру и состав жаростойких покрытий из сплавов П1 (NiCrAlY), П2 (NiCrAlReHfY) и П3 (NiCrAlTaReHfY), полученных вакуумно-дуговым методом с расходуемым катодом, можно сделать следующие выводы:

– снижение содержания алюминия в жаростойких покрытиях системы NiCrAlY (по сравнению с долей алюминия в испаряемом сплаве катода), наносимых вакуумно-дуговым способом, связано с эффектом селективного катодного распыления алюминия (масса 27 а.е.м.) многозарядными ионами тугоплавких металлов (тантала, рения и гафния) из плазмы вакуумно-дугового разряда. В результате над поверхностью распыляемого катода присутствуют нейтральные атомы алюминия, перемещающиеся на периферию зоны распыления катода;

– наличие градиента концентрации нейтральных атомов алюминия вдоль поверхности катода вакуумно-дугового разряда необходимо учитывать при нанесении покрытий на крупногабаритные детали, соизмеримые с размером зоны испарения на катоде материала покрытия для получения конденсата требуемого состава.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // Наука и жизнь. 2009. № 10. С. 6–10.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 149–163.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия с керамическим слоем пониженной теплопроводности на основе оксида циркония для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Материалы науч.-техн. конф. «Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники»: в 2 ч. М.: ВИАМ, 2015. Часть 2. Ст. 3.
5. Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследования эрозионной стойкости и остаточных напряжений в слоистых ионно-плазменных покрытиях // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). С. 87–95. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-87-95.
6. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ и $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 108–119. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
7. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В. и др. Износостойкие детонационные покрытия на основе карбида вольфрама для авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 92–109. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.

8. Александров Д.А., Артеменко Н.И. Износостойкие покрытия для защиты деталей трения современных ГТД // Труды ВИАМ. 2016. № 10 (46). С. 65–72. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-6-6.
9. Гончаров Б.Э., Сипатов А.М., Черкашнев Н.Н., Плескань А.Ю., Самохвалов Н.Ю., Ваганова М.Л., Сорокин О.Ю., Солнцев Ст.С., Евдокимов С.А. Исследование высокотемпературной термостойкости антиокислительного покрытия для керамического композиционного материала с многослойной структурой // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 51–58. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-51-58.
10. Будиновский С.А., Бенклян А.С., Татарников С.В. Особенности рабочего процесса ионно-плазменной установки для нанесения защитных покрытий в сильноточном вакуумном дуговом разряде с бинарным расходуемым катодом и секционированным анодом // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3 (80). С. 110–120. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-110-120.
11. Способ защиты лопаток газовых турбин: пат. 2404286 Рос. Федерация; заявл. 22.10.09; опубл. 20.11.10.
12. Способ нанесения защитных покрытий и устройство для его осуществления: пат. 2625698 Рос. Федерация; заявл. 29.08.16; опубл. 18.07.17.
13. Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий // Энциклопедия инженера-химика. 2012. № 5. С. 34–41.
14. Мубояджян С.А. Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. № 3. С. 26–30.
15. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленная установка МАП–1 для нанесения защитных покрытий различного назначения // Авиационная промышленность. 1995. № 7–8. С. 44–48.

References

1. Kablov E.N. Science as a branch of the economy. *Nauka i zhizn*, 2009, no. 10, pp. 6–10.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Ion etching and surface modification of critical machine parts in vacuum-arc plasma. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroenie*, 2011, no. SP2, pp. 149–163.
4. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-protective coatings with a ceramic layer of low thermal conductivity based on zirconium oxide for high-pressure turbine blades of advanced gas turbine engines. *Proceedings of the sc. and tech. conf. «Modern achievements in the field of creating advanced non-metallic composite materials and coatings for aviation and space technology»*: in 2 parts. Moscow: VIAM, 2015, part 2, art. 3.
5. Alexandrov D.A., Gorlov D.S. The Research of erosion resistance and residual stresses in layered ion-plasma coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), pp. 87–95. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-87-95.
6. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ and $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 108–119. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
7. Batraev I.S., Rybin D.K., Ivanyuk K.V., Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A. Wear resistant detonation coatings based on tungsten carbide for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 92–109. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.

8. Aleksandrov D.A., Artemenko N.I. Wear-resistant coatings to protect friction parts of modern gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2016, no. 10, pp. 65–72. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577//2307-6046-2016-0-10-6-6.
9. Goncharov B.E., Sipatov A.M., Cherkashneva N.N., Pleskan A.Yu., Samokhvalov N.Yu., Vaganova M.L., Sorokin O.Yu., Solntsev St.S., Evdokimov S.A. Studies of thermal shock resistance of an anti-oxidation coating for a multi-layered ceramic composite. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 51–58. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-51-58.
10. Budinovskiy S.A., Benklyan A.S., Tatarnikov S.V. Working process features of an ion-plasma installation for applying protective coatings in a high-current vacuum arc discharge with a binary consumable cathode and a partitioned anode. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 110–120. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-110-120.
11. *Method for protecting gas turbine blades*: pat. 2404286 Rus. Federation; appl. 22.10.09; publ. 20.11.10.
12. *Method of applying protective coatings and device for its implementation*: pat. 2625698 Rus. Federation; appl. 29.08.16; publ. 18.07.17.
13. Muboyadzhyan S.A. Industrial ion-plasma equipment for applying protective coatings. *Entsiklopediya inzhenera-khimika*, 2012, no. 5, pp. 34–41.
14. Muboyadzhyan S.A. Protective coatings for parts of the hot gas turbine tract. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2011, no. 3, pp. 26–30.
15. Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A. MAP-1 industrial installation for applying protective coatings for various purposes. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1995, no. 7–8, pp. 44–48.

Информация об авторах

Будиновский Сергей Александрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бенклян Артем Сергеевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Азаровский Евгений Николаевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Татарников Сергей Владимирович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey A. Budinovskiy, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem S. Benklyan, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniy N. Azarovskiy, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Tatarnikov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.11.2025.
The article was submitted 19.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 26.11.2025.