

Научная статья

УДК 620.193.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-138-145

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ДЕТАЛИ ГТД НА УСТАНОВКЕ ВИАМ-МЭШ-50

С.А. Будиновский¹, А.С. Бенклян¹, 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 ключевые особенности технологического процесса нанесения защитных ионно-плазменных покрытий на имитаторы крупногабаритных деталей газотурбинного двигателя с помощью опытно-промышленной ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50. Описаны взаимосвязанные характеристики вакуумно-дуговых испарителей с протяженной зоной в многоэлектродной системе. Приведены металлографические исследования осажденного защитного покрытия системы NiAlCrY на имитаторах деталей. Исследовано распределение толщины осажденного покрытия по поверхности имитаторов деталей.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, ионно-плазменные покрытия, вакуумный дуговой процесс, газотурбинный двигатель, газотурбинная установка, крупногабаритные детали

Для цитирования: Будиновский С.А., Бенклян А.С., Татарников С.В. Особенности технологического процесса нанесения ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали ГТД на установке ВИАМ-МЭШ-50 // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 138–145. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-138-145.

Scientific article

FEATURES OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS FOR APPLYING ION-PLASMA COATINGS TO LARGE GAS TURBINE ENGINE PARTS USING THE VIAM-MESH-50 UNIT

S.A. Budinovskiy¹, A.S. Benklyan¹, 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. This paper presents the key features of the technological process for applying protective ion-plasma coatings to dummy large-size gas turbine engine parts using the VIAM-MESH-50 pilot ion-plasma unit. The interaction factors between extended-zone vacuum arc evaporators in a multi-electrode system are described. Metallographic studies of the deposited NiAlCrY protective coating on the dummy parts are presented. The distribution of the deposited coating thickness over the surface of the dummy parts is studied.

Keywords: heat-resistant nickel alloys, ion-plasma coatings, vacuum arc process, gas turbine engine, gas turbine unit, large parts

For citation: Budinovskiy S.A., Benklyan A.S., Tatarnikov S.V. Features of the technological process for applying ion-plasma coatings to large gas turbine engine parts using the VIAM-MESh-50 unit. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 138–145. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-138-145.

Введение

Серийная ионно-плазменная установка типа МАП-1 и ее дальнейшие модификации (МАП-1М, МАП-2, МАП-3) представляют собой высокотехнологичный комплекс, предназначенный для нанесения функциональных и защитных покрытий на различные материалы (стали, титановые, никелевые и кобальтовые сплавы и т. д.). В основе работы ионно-плазменной установки типа МАП-1 лежит высокоэнергетическое осаждение защитных покрытий вакуумно-дуговым методом [1–7]. Данная технология активно применяется в машиностроении, авиационной и космической промышленности, медицине, инструментальном производстве и других отраслях, где требуется повышение долговечности, коррозионной, изнoso- и жаростойкости изделий различного назначения [8–11].

Принцип работы установки МАП-1 [12–15] основан на формировании плотной металлической плазмы в вакуумной камере с использованием вакуумно-дуговых источников. В процессе создается поток ионов, атомов, капель и паровой фазы испаряемого материала, который направляется на поверхность обрабатываемого изделия. Вакуумная среда позволяет исключить влияние внешних загрязнений и обеспечить высокую чистоту покрытия, а также контролировать параметры процесса с высокой точностью.

Одним из ключевых элементов установки является трубный катод, изготовленный из материала, который необходимо нанести на изделие. Под действием электрического разряда происходит испарение материала катода, образующаяся плазма содержит ионы металла. Для формирования покрытий на основе нитридов, карбидов и карбонитридов в рабочую камеру подают азот и/или ацетилен для последующей плазмохимической реакции на поверхности обрабатываемой детали.

Существенными преимуществами ионно-плазменной технологии осаждения с использованием вакуумно-дугового метода являются высокая плотность и однородность получаемых защитных покрытий. Процесс осаждения характеризуется высокой воспроизводимостью (как по скорости осаждения, так и по химическому составу получаемого конденсата).

Применение данной технологии позволяет достичь высокого уровня адгезии покрытия к подложке и межслойной когезии. Наряду с вакуумно-дуговым разрядом на обрабатываемые детали подается напряжение смещения, в результате чего из металлической плазмы «вытягивается» ионная компонента. Управляя напряжением смещения возможно проводить ионную бомбардировку поверхности обрабатываемой детали, что в свою очередь (в зависимости от энергии ионов) приводит к очистке поверхности деталей от загрязнений, термоактивации поверхности и уплотнению осаждаемого конденсата. Такое покрытие надежно сцепляется с основой и не отслаивается даже при интенсивной эксплуатации.

Технология разработана в первую очередь для авиационной отрасли – для нанесения защитных покрытий на детали газотурбинного двигателя (ГТД). Конструктив установки и организация процесса осаждения защитного покрытия нацелены на обработку деталей с характерным размером до 200 мм. Обработка деталей большой высоты ограничена как размерами камеры напыления, так и высотой эффективной зоны напыления – равномерность толщины покрытия значительно ухудшается для деталей высотой >200 мм.

Для обработки крупногабаритных деталей современных ГТД технология нанесения защитных ионно-плазменных покрытий вакуумно-дуговым методом масштабирована, разработана новая модернизация установки МАП-1 – опытно-промышленная ионно-плазменная установка типа ВИАМ-МЭШ-50.

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

Материалы и методы

Опытно-промышленная ионно-плазменная установка типа ВИАМ-МЭШ-50 является четырехкатодным вариантом производственной ионно-плазменной установки типа МАП-1 (МАП-1М, МАП-2, МАП-3), предназначенной для нанесения защитных жаро-, коррозионно-, эрозионно- и износостойких покрытий вакуумно-дуговым осаждением. Внешний вид и принципиальная схема ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50 представлены на рис. 1.

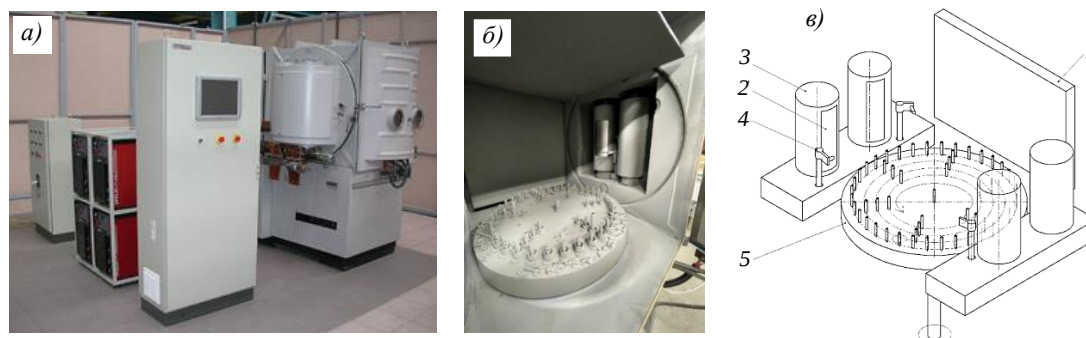


Рис. 1. Внешний вид (а), внутренний рабочий объем (б) и принципиальная схема (в) ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50: 1 – анод; 2 – катод; 3 – электростатический экран; 4 – устройство зажигания дугового разряда; 5 – планетарный механизм вращения покрываемых изделий

Принципиальным различием ионно-плазменных установок типа ВИАМ-МЭШ-50 и МАП-1В в организации рабочего процесса распыления осаждаемого материала (металлического трубного катода диаметром 180 мм и высотой 340 мм из сплавов на основе никеля, кобальта, хрома, титана, алюминия и т. д.) является измененная траектория движения катодных пятен по поверхности испаряемого дугой катода. Это позволяет не только существенно увеличить высоту зоны эффективного напыления, но и улучшить профиль выработки трубного катода, что в свою очередь напрямую влияет на ресурс работы катода и коэффициент использования материала. Ионно-плазменная установка типа ВИАМ-МЭШ-50 позволяет наносить защитные покрытия на крупногабаритные детали высотой до 550 мм, располагаемые в рабочей зоне привода вращения деталей диаметром 750 мм и высотой 650 мм. Привод вращения деталей имеет 36 позиций на оси вращения на диаметре 670 мм, по шесть позиций – на диаметрах 573, 477 и 381 мм, а также одну позицию – в центре планетарного механизма (рис. 1, в).

Важной особенностью ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50 является наличие четырех независимых вакуумно-дуговых испарителей с протяженной зоной, имеющих общий составной анод. Такая многоэлектродная схема позволяет проводить в одном технологическом цикле нанесение многослойных покрытий без вскрытия рабочей камеры ионно-плазменной установки, что не только ускоряет процесс получения многослойного покрытия (существенно снижая трудоемкость процесса за счет отсутствия замены трубного катода), но и положительно сказывается на межслойной когезии. Возможна реализация схемы нанесения защитного покрытия, при которой в одном технологическом цикле работают поочередно две пары катодов на никелевой и алюминиевой основе (для получения двухслойных конденсационно-диффузионных покрытий за один цикл) или одновременно четыре катода (для повышения производительности технологического процесса при осаждении защитных покрытий на основе одного металлического компонента – как сплава, так и чистого металла).

Общий составной анод имеет повышенную оптическую видимость катодами вакуумно-дуговых испарителей с протяженной зоной, что позволяет повышать загрузку установки без критического увеличения напряжения горения вакуумно-дугового разряда, приводящего к его погасанию (напряжение горения вакуумно-дугового разряда ограничено техническими характеристиками источника питания разряда). У ионно-плазменных установок типа МАП-1 существует особенность, заключающаяся в «перекрытии» анода обрабатываемыми деталями и погасании разряда, что существенно ограничивает возможность полного заполнения вакуумного объема рабочей камеры. Влияние эффекта перекрытия анода обрабатываемыми деталями минимизировано в ионно-плазменной установке типа ВИАМ-МЭШ-50. Возможно повышение максимально допустимого напряжения горения вакуумно-дугового разряда путем увеличения общей мощности и номинального напряжения источника питания вакуумной дуги, что приведет к существенному возрастанию общего энергопотребления и увеличению его размеров.

Важно отметить, что вакуумно-дуговые испарители ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50 являются высокоточными источниками металлической плазмы, ток вакуумно-дугового разряда в данной системе достигает 700 А на один испаритель, что в свою очередь создает собственное магнитное поле разряда, существенно влияющее на траекторию движения катодных пятен по поверхности катода. Для обеспечения максимально возможной (для трубного катода высотой 340 мм) зоны испарения вакуумно-дуговые испарители с протяженной зоной оборудованы электромагнитными фиксаторами катодных пятен, представляющими собой двухконтурные электромагнитные системы эллиптической формы. При наложении силовых магнитных линий каждого контура друг на друга на поверхности испаряемого трубного катода образуется арочная конфигурация магнитного поля, вдоль которой движутся катодные пятна. Движение катодных пятен привязано к той части арки, где нормальная составляющая электромагнитных полей к поверхности катода минимальна. Направление движения (вращения) катодных пятен по эллиптической траектории (по часовой стрелке или против нее) задается направлением тока в электромагнитных фиксаторах катодных пятен вакуумно-дугового испарителя. Собственные магнитные поля вакуумно-дугового разряда влияют на траекторию движения катодных пятен, нарушая ее форму, что приводит к частичному «подрезанию» эллиптической траектории движения катодных пятен и/или их привязки к некоторым зонам на боковой поверхности трубного катода, а также к увеличению напряжения горения вакуумно-дугового разряда. Наблюдается эффект взаимного воздействия электромагнитных полей соседних вакуумно-дуговых испарителей, что также требует дополнительной корректировки величин тока в контурах электромагнитных фиксаторов катодных пятен каждого из испарителей.

Для стабильной работы многоэлектродной системы ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50 важно обеспечить минимальное напряжение горения вакуумно-дугового разряда, что достигается настройкой оптимальной конфигурации магнитных полей электромагнитных фиксаторов катодных пятен каждого вакуумно-дугового испарителя при их одиночном и/или совместном действии. Наблюдается эффект снижения напряжения вакуумно-дугового разряда в многокатодной высокоточной системе при изменении направления вращения катодных пятен по боковой поверхности трубного катода.

Для оценки производительности процесса напыления защитных покрытий с помощью ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50 проведены тестовые запуски при различных режимах (одновременная работа одного, двух и четырех вакуумно-дуговых испарителей с протяженной зоной).

После выбора оптимальных значений тока в системе электромагнитных фиксаторов катодных пятен каждого вакуумно-дугового испарителя проведена оценка скорости нанесения покрытий, структуры и внешнего вида осаждаемого конденсата. Для этого на привод вращения обрабатываемых деталей ионно-плазменной установки типа

ВИАМ-МЭШ-50 установили имитаторы крупногабаритных деталей ГТД, образцы-свидетели (пластины из жаропрочного сплава ХН78Т размером 25×25 мм) (рис. 2) и четыре трубных катода из сплава системы NiAlCrY. Имитаторы крупногабаритных деталей ГТД представляли собой наборы из сопловых лопаток ГТД с различным взаиморазмещением в многоместных оснастках размерами (диаметр×высота) 200×260 и 250×260 мм. Наборы выполнены в двух исполнениях: 1 – по три сопловых лопатки, имитирующих сопловой блок, на двух ярусах; 2 – по два сопловых блока в три яруса с двумя вариантами направления входной и выходной кромок (вверх и вниз).

Для обеспечения оптимальной тепловой нагрузки на конструкцию вакуумной камеры ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50 запускали попарно по два вакуумно-дуговых испарителя (ток 350 А на каждый вакуумно-дуговой испаритель). Внешний вид имитаторов крупногабаритных деталей ГТД и образцов-свидетелей после нанесения покрытия представлен на рис. 3.



Рис. 2. Размещение имитаторов крупногабаритных деталей газотурбинного двигателя и образцов-свидетелей на приводе вращения обрабатываемых деталей ионно-плазменной установки типа ВИАМ-МЭШ-50

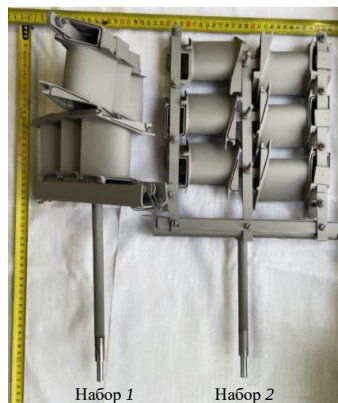


Рис. 3. Внешний вид имитаторов крупногабаритных деталей газотурбинного двигателя и образцов-свидетелей после нанесения покрытия

Полученное покрытие системы NiAlCrY имеет типичный для ионно-плазменных покрытий на основе никеля матовый цвет без следов пробоев, сколов, отслоений и/или вспучивания. Толщина покрытия на образцах-свидетелях при гравиметрическом расчете составила 75 мкм. Скорость нанесения покрытий на основе системы NiAlCrY при токе разряда вакуумно-дугового разряда 350 А составила 5 мкм/ч на один вакуумно-дуговой испаритель с протяженной зоной, до 20 мкм/ч – при одновременной работе всех вакуумно-дуговых испарителей. Скорости осаждения покрытия на ионно-плазменной установке типа ВИАМ-МЭШ-50 и серийной установке типа МАП-1 идентичны.

После проведения технологического процесса нанесения покрытия детали и образцы-свидетели термически обрабатывали по серийной технологии в вакууме.

Результаты и обсуждение

Для оценки структуры и распределения толщины осажденного ионно-плазменного покрытия проведены раскрой имитаторов (наборов сопловых лопаток 1 и 2 в многоместной оснастке) и образцов-свидетелей и их металлографическое исследование с использованием инвертированного микроскопа с цифровой системой обработки изображения при увеличении ×200. Погрешность измерений линейных размеров элементов топологии в диапазоне от 1 до 1000 мкм не превысила 0,5 %. Микроструктуры покрытий

на образцах-свидетелях и сопловой лопатке представлены на рис. 4. Покрытие имеет характерную бездефектную структуру и ровную границу раздела «подложка–покрытие».

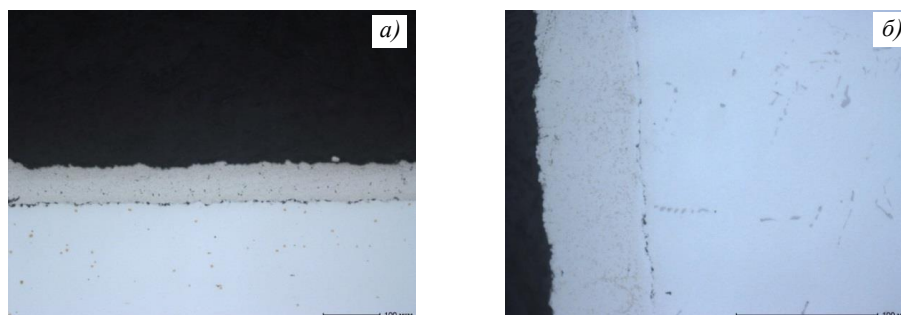


Рис. 4. Микроструктуры осажденного покрытия системы NiAlCrY на образцах-свидетелях (а) и сопловой лопатке (б)

Для сопловых лопаток из наборов 1 и 2 распределение толщины по поверхности пера составило $\sim(20\text{--}70)$ и $\sim(25\text{--}75)$ мкм соответственно. Толщина покрытия уменьшается в зонах «затенения» деталей (оптически непрозрачные зоны). Для уменьшения разброса толщины по поверхности пера сопловых лопаток следует провести доработку технологической оснастки: возможны изменение угла расположения детали относительно потока испаряемого материала и/или создание искусственного затенения в зонах с повышенной скоростью осаждения защитного покрытия.

Заключения

Опытно-промышленная ионно-плазменная установка типа ВИАМ-МЭШ-50 является модификацией серийной установки типа МАП-1, разработана для масштабирования технологии нанесения защитных покрытий на крупногабаритные детали ГТД.

Для реализации процесса нанесения защитных ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали ГТД изменена траектория движения катодных пятен вакуумно-дугового разряда по поверхности трубного катода с целью увеличения зоны эффективного напыления.

Применение многоэлектродной системы в ионно-плазменной установке типа ВИАМ-МЭШ-50 позволило обрабатывать детали существенно большего размера, чем в серийной установке типа МАП-1, но повлекло за собой ряд важных особенностей в организации процесса горения вакуумно-дугового разряда, в том числе необходимость в подборе оптимального тока электромагнитных фиксаторов вакуумно-дуговых испарителей.

Эксперимент по нанесению защитного ионно-плазменного покрытия системы NiAlCrY с помощью установки типа ВИАМ-МЭШ-50 на имитаторы крупногабаритных деталей ГТД и образцы-свидетели из жаропрочного сплава ХН78Т подтвердил принципиальную возможность обработки крупногабаритных деталей без потери качества и скорости осаждения покрытий.

Для уменьшения разброса толщины защитного ионно-плазменного покрытия по поверхности обрабатываемой крупногабаритной детали возможна доработка технологической оснастки.

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. Ч. 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: 27.03.2026). 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: 27.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
7. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. 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: 27.03.2026). 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: 27.03.2026). 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: 27.03.2026). 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 modification of the surface 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 scientific and technical conf. «Modern achievements in the field of creation of 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: March 27, 2026). 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: March 27, 2026). 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: March 27, 2026). 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: March 27, 2026). 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: March 27, 2026). 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 of protecting gas turbine blades*: pat. 2404286 Rus. Federation; appl. 22.10.09; publ. 20.11.10.
12. *Method of applying protective coatings and a 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 path of gas turbine engines. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2011, no. 3, pp. 26–30.
15. Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A. Industrial installation MAP-1 for applying protective coatings for various purposes. *Aviationnaya 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

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

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

Статья поступила в редакцию 24.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.04.2026.

The article was submitted 24.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 29.04.2026.