

Опытно-промышленные ионно-плазменные установки МЭШ-50 и МАП-Р для нанесения защитных покрытий на детали транспортных и энергетических газотурбинных установок

© С.А. Будиновский¹, А.А. Ляпин², А.С. Бенклян¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, Москва, 105005, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены некоторые особенности процесса нанесения защитных ионно-плазменных покрытий вакуумно-дуговым методом на крупногабаритные детали газотурбинных установок на опытно-промышленных установках МЭШ-50 и МАП-Р. Эти установки разработаны с учетом многолетнего опыта эксплуатации в условиях серийного производства установок МАП-1 (МАП-1М), широко применяемых российскими и рядом зарубежных авиастроительных комплексов. В условиях серийного производства на установках МЭШ-50 и МАП-Р можно реализовать все базовые ионно-плазменные технологические процессы с использованием стандартных катодов из никелевых, кобальтовых, алюминиевых сплавов и чистых металлов (Cu, Ti, Cr, Zr и др.). Увеличенные размеры камеры напыления установок и одновременное применение нескольких испарителей с трубными катодами диаметром 180 мм и высотой 340 мм позволяют наносить покрытия на крупногабаритные детали газотурбинных двигателей и установок, в том числе на сложные изделия типа «блиск» и «блинк».

Ключевые слова: защитные ионно-плазменные покрытия, жаростойкие покрытия, коррозионностойкие покрытия, газотурбинные двигатели, газотурбинные установки, вакуумно-дуговое осаждение, установка МАП-1М

Введение. Метод вакуумно-дугового осаждения защитных жаростойких и коррозионностойких покрытий широко применяется на российских и зарубежных авиастроительных комплексах. Основными промышленными установками для нанесения покрытия этим методом являются установки типа МАП-1М (и ее модернизации МАП-2 и МАП-3), а также ее аналог — установка АПН-250. Установка МАП-1М, изначально спроектированная для нанесения покрытий на детали горячего тракта газотурбинного двигателя (ГТД) с характерными размерами 50...70 мм (перо лопатки турбины), нашла свое применение также в производстве транспортных турбин и приводов газоперекачивающих агрегатов. Составы покрытий, применяемые в авиационной промышленности, были в этом случае адаптированы для работы газотурбинных установок (ГТУ) на топливе, содержащем агрессивные примеси [1–15].

Дальнейшее совершенствование конструкции ГТД связано не только с повышением рабочих температур, но и со снижением массы

двигателя. Для достижения нового уровня технических и эксплуатационных характеристик рассматривается возможность применения в конструкции турбины и компрессора крупногабаритных деталей типа «блиск» (blade + disk) (рис. 1) или «блинк» (blade + ring).



Рис. 1. Внешний вид изделия типа «блиск»

В зависимости от условий эксплуатации (морская или прибрежная зона, пустынный климат и т. д.) поверхностям лопаток турбин требуется защита от воздействия внешней среды для обеспечения назначенного ресурса работы турбин, что достигается нанесением защитных покрытий различных типов. При нанесении покрытий разными методами возникают проблемы, связанные со сложной геометрией детали типа «блиск» и «блинк», а также с экранированием поверхности пера лопаток друг другом.

Для преодоления отмеченных выше проблем в НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ проводят работы по созданию нового оборудования для нанесения защитных покрытий на крупногабаритные детали ГТД и ГТУ с использованием серийно выпускаемых катодов для промышленных установок типа МАП из никелевых, кобальтовых и алюминиевых сплавов [16–18].

Цель данной работы — провести обзор опытно-промышленного ионно-плазменного оборудования, которое может быть применено для нанесения защитных покрытий на изделия наземных и космических ГТУ, чтобы повысить надежность и ресурс работы таких изделий.

Методы и материалы. Серийные промышленные установки типа МАП-1 (МАП-1М, МАП-2 и МАП-3) представляют собой высокотехнологичные автоматизированные устройства, позволяющие наносить защитные как металлические, так и неметаллические покрытия (нитриды, карбиды металлов) на поверхность деталей габаритными

размерами до $\varnothing 125 \times 200$ мм. Внешний вид и принципиальная схема установки МАП-2 представлены на рис. 2 [19, 20].

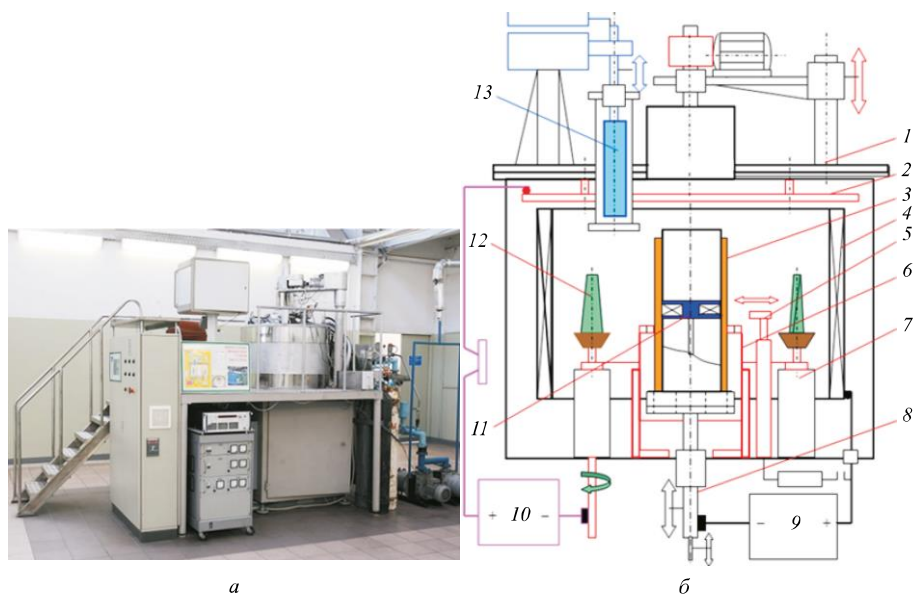


Рис. 2. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) установки типа МАП:

1 — вакуумная камера с механизмом подъема крышки; 2 — кольцевой экран; 3 — трубный катод на охлаждаемой оправке; 4 — анод; 5 — поджигающий электрод; 6 — экран для электростатической стабилизации траекторий движения катодных пятен вакуумной дуги; 7 — привод вращения покрываемых деталей; 8 — механизм для возвратно-поступательного перемещения катода; 9 — источник электропитания вакуумного дугового разряда; 10 — источник для создания отрицательного электрического потенциала на покрываемых деталях; 11 — фиксатор (электромагнитная катушка) для стабилизации траекторий движения катодных пятен вакуумной дуги; 12 — покрываемые детали; 13 — источник газовых ионов на базе ускорителя холловского типа

Все установки оснащены трехканальной автоматической системой подачи газов. Модификация установки МАП-3 укомплектована ионным ускорителем для проведения ионного ассистированного осаждения покрытий.

Все технологические процессы на установках МАП-2 и МАП-3 проводятся в автоматическом режиме после введения выбранной последовательности работы (откачка вакуума, очистка поверхности деталей травлением ионами аргона, очистка поверхности и нагрев деталей в металлической плазме материала покрытия, подача реактивного газа, нанесение покрытия, охлаждение деталей, выключение вакуумной системы) и параметров операций.

На основе многолетнего опыта эксплуатации установок типа МАП было разработано два варианта опытно-промышленных установок ВИАМ МЭШ-50 и МАП-Р (МАП-5), предназначенных для нанесения покрытия на крупногабаритные детали ГТД и ГТУ.

Установка МЭШ-50 (рис. 3) является четырехкатодным вариантом установки типа МАП, на которой возможно воспроизводить все базовые процессы, проводимые на установке типа МАП-1М. Основное отличие в организации рабочего процесса установки ВИАМ МЭШ-50 от МАП заключается в измененной геометрии траекторий движения катодных пятен по поверхности испаряемого дугой катода из материала покрытия. Схема расположения испарителей по отношению к приводу вращения покрываемых деталей показана на рис. 4.

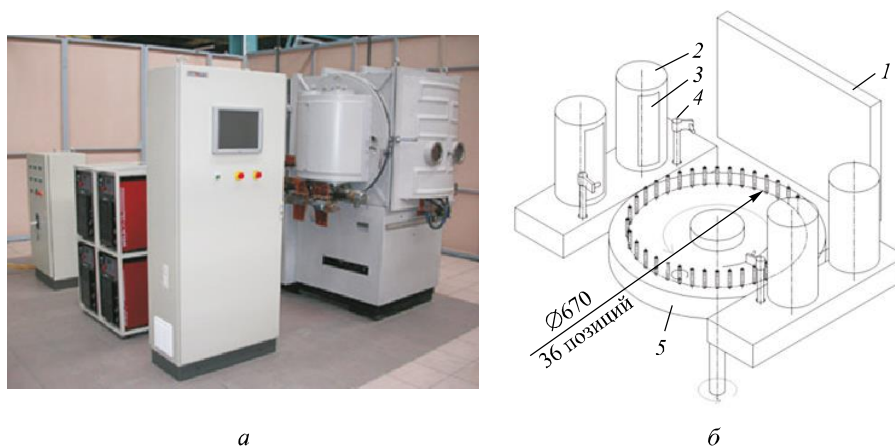


Рис. 3. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) установки ВИАМ МЭШ-50 [21]: 1 — анод; 2 — электростатический экран; 3 — катод; 4 — устройство зажигания дугового разряда; 5 — планетарный механизм вращения покрываемых изделий

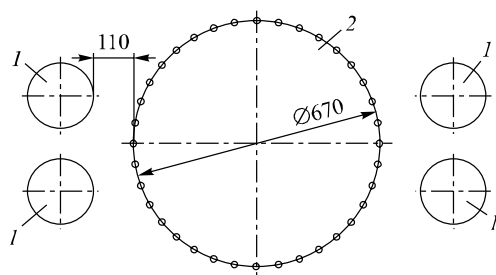


Рис. 4. Схема расположения испарителей по отношению к приводу вращения покрываемых деталей в установке ВИАМ МЭШ-50: 1 — катод; 2 — планетарный механизм вращения покрываемых изделий

В установках типа МАП катодные пятна движутся по кольцевой линии, неподвижной в пространстве и сосной оси симметрии катода, который совершает возвратно-поступательное движение по вертикали относительно покрываемых деталей и магнитного фиксатора. В установке ВИАМ МЭШ-50 катодные пятна движутся по эллиптической траектории (высотой около 300 мм), расположенной на боковой поверхности трубного катода, который вращается вокруг собственной оси и относительно магнитного фиксатора специальной конструкции. Подобная траектория движения катодных пятен получается посредством применения электромагнитной катушки,

создающей магнитное поле эллиптической конфигурации, и экрана (нейтральной вставки) с эллиптическим окном. В науке хорошо известно, что катодные пятна движутся и в сторону острого угла, образованного между силовыми линиями магнитного поля и поверхностью катода, и в сторону нейтральной вставки. Комбинация этих двух принципов позволяет создать эллиптическую зону испарения на боковой поверхности цилиндрического катода, высота которой будет определяться линейными размерами как катушки, так и эллиптического окна в экране, что позволяет равномерно распылять катод практически по всей его высоте. Такой подход позволил существенно увеличить высоту покрываемых деталей: высота покрываемых изделий на установках типа МАП-2 составляет 200 мм, на установке МЭШ-50 — не менее 300 мм. При этом значительно повысился коэффициент использования массы катода — не менее чем на 15 %. Измененная конструкция рабочей камеры напыления установки позволяет размещать на приводе вращения детали диаметром 670 мм и высотой до 550 мм.

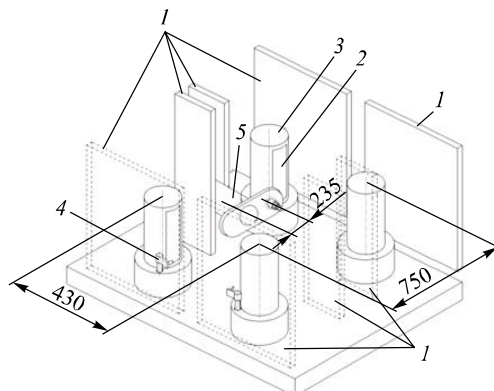
Важной особенностью установки ВИАМ МЭШ-50 является наличие четырех независимых испарителей с общим анодом. Такая схема позволяет не только повысить производительность процесса, но и проводить в одном технологическом цикле нанесение многослойных покрытий без вскрытия вакуума, что обеспечивает ускорение этого процесса получения многослойного покрытия и положительно влияет на межслойную когезию.

Установка роторного типа МАП-Р, представленная на рис. 5 [16], также оборудована четырьмя вакуумно-дуговыми испарителями с эллиптической траекторией движения катодных пятен. На такой установке можно обрабатывать изделия во встречных потоках металлической плазмы. Испарители работают попарно для нанесения покрытия на обе поверхности вращающейся вокруг своей оси детали. Следует отметить, что на установке МАП-Р (как и на МЭШ-50) применяются те же крупногабаритные трубные катоды массой до 25...30 кг, что и на установках типа МАП-1М, МАП-2 и МАП-3. Это позволяет иметь большой запас распыляемого материала и дает возможность наносить защитные покрытия толщиной порядка 100 мкм за один технологический цикл.

Особенностью установки МАП-Р является то, что закрепление деталей на роторе может быть выполнено двумя способами (рис. 6): либо на консоли (малый ротор) для дисковидных деталей диаметром до 300 мм, либо на оси вращения между парами катодов (большой ротор) для деталей размером до 600 мм. В первом случае в одном технологическом процессе без вскрытия камеры установки можно наносить двухслойные жаростойкие или коррозионностойкие покрытия



а



б

Рис. 5. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) установки МАИ-Р:
 1 — анод; 2 — катод; 3 — электростатический экран; 4 — устройство зажигания
 дугового разряда; 5 — ротор

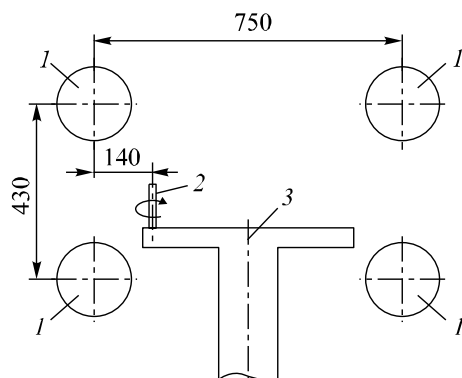


Рис. 6. Схема расположения испарителей по отношению к приводу вращения покрываемых деталей в установке МАИ-Р:

1 — катод; 2 — ось малого ротора;
 3 — ось большого ротора

с использованием катодов из никелевых и алюминиевых сплавов, которые в основном наносятся на установках типа МАИ, но в последних требуется прерывание процесса с вскрытием рабочей камеры для замены никелевого катода алюминиевым. Более того, на установках МАИ-Р возможен и процесс нанесения многослойных покрытий, что обеспечивается независимым вращением малого и большого роторов и отсутствием прямой видимости между парами катодов-антиподов.

При закреплении изделия на оси большого ротора испарение катодов одного состава возможно на обеих парах катодов-антиподов в целях повышения производительности процесса, которая выше, чем у установки МАИ-1М, при тех же суммарных токах горения вакуумно-дугового разряда.

Обсуждение и результаты. В настоящее время в отечественной промышленности чрезвычайно актуальными являются поиски решения проблем конверсии технологий двойного назначения и импортозамещения, особенно в некоторых отраслях, связанных с эксплуатацией и ремонтом газотурбинного оборудования, поставленного в Россию зарубежными фирмами. Это относится к ГТУ, применяемым в приводах

газоперекачивающих агрегатов в трубопроводных газотранспортных системах, мобильных электростанциях мощностью до 50 мВт и корабельных силовых установках.

Разработанные ВИАМ ионно-плазменные технологии и установки типа МАП предназначались для нанесения защитных покрытий на рабочие лопатки ГТД военной авиации, но затем нашли применение в производстве гражданской авиационной и вертолетной техники. Сегодня имеется положительный опыт применения установок МАП и в других отраслях.

Внешний вид соплового аппарата турбины, который работает на жидком топливе, содержащем серу, приведен на рис. 7. Деталь изготовлена по технологии «блиск». Двухслойное коррозионностойкое покрытие СДП-1Т + ВСДП-13 наносят на установке МАП-Р при расположении «блиска» на оси малого ротора. Металлографический анализ полученного покрытия показал, что даже в зонах перекрытия лопаток соплового аппарата отмечается покрытие с характерной двухслойной структурой. Разница между минимальной (теневая зона перекрытия) и максимальной (кромка пера лопатки) толщиной составила примерно 75 %.

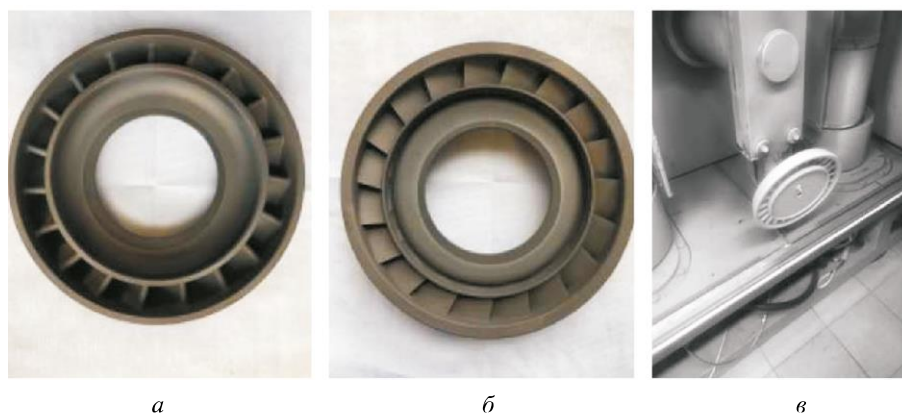


Рис. 7. Внешний вид соплового аппарата со стороны входной (а) и выходной (б) кромки; расположение соплового аппарата на оси малого ротора (в)

На рис. 8 показано распределение толщины покрытия по профилю лопатки соплового аппарата турбины, представленного на рис. 7.

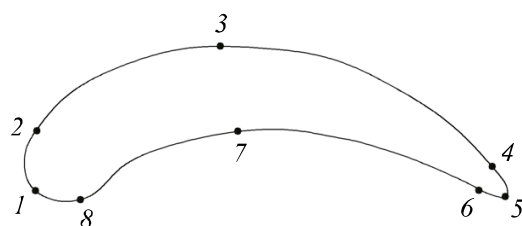


Рис. 8. Распределение толщины покрытия по профилю лопатки:

1 — 95 мкм; 2 — 77 мкм; 3 — 75 мкм;
4 — 93 мкм; 5 — 67 мкм; 6 — 28 мкм;
7 — 84 мкм; 8 — 92 мкм

Применяемые в трубопроводных системах АО «Газпром» рабочие лопатки газотурбинного привода для газоперекачивающих агрегатов ГТК-10И (двигатель М8 3000 фирмы «Дженерал Электрик») и ГТК-25И (двигатель М8 5000 фирмы «Дженерал Электрик») представлены на рис. 9. Покрытие СДП-1 наносится в условиях серийного производства с 2000 г. по технологии, разработанной НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ.

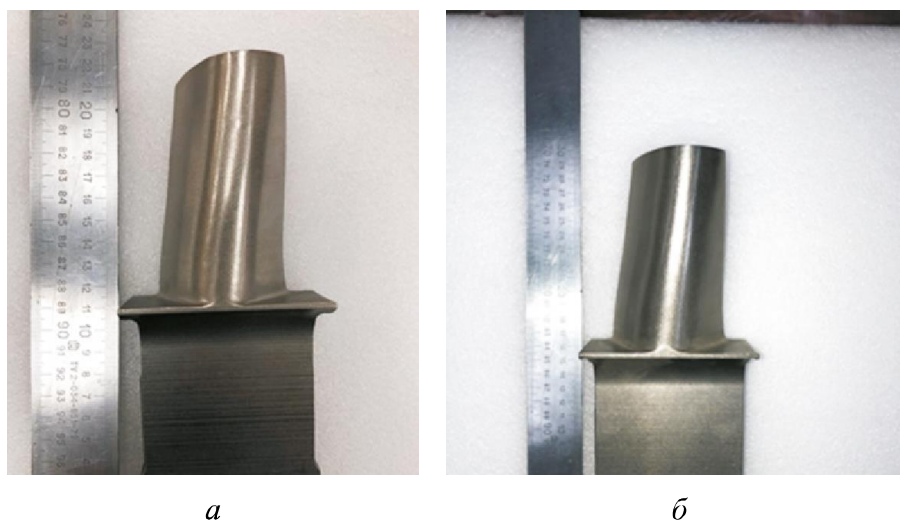


Рис. 9. Внешний вид рабочих лопаток турбины приводов газоперекачивающих агрегатов ГТК-10И (а) и ГТК-25И (б)

Следует отметить, что повышение технико-экономических показателей в энергетике делает безальтернативным широкое применение газотурбинных установок для производства электроэнергии [22]. Кроме того, повышение рабочей температуры ГТУ, которая на перспективных образцах турбин уже достигла уровня турбин авиационных ГТД, не только приведет к увеличению КПД установки, но и снизит количество выбрасываемых в атмосферу вредных примесей. Все это расширит область применения ионно-плазменных технологий, оборудования и материалов, разработанных ранее для авиационных турбин [9].

Для решения перспективных задач космонавтики, в число которых входят доставка тяжелых космических аппаратов на геостационарную орбиту, освоение Луны и Марса, полеты в дальний космос и многие другие, потребуется наличие мощного источника энергопитания на борту пилотируемых аппаратов. Самым перспективным источником питания в данный момент является ядерная энергетическая установка с газотурбинным преобразователем энергии [23]. Применение в конструкции энергетической установки деталей с защитными

и специальными ионно-плазменными покрытиями может обеспечить требуемый ресурс работы при минимальной массе конструкции.

Заключение. Начиная с 1980-х годов практически во всех изделиях отечественной авиации применяются разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ защитные покрытия на изделия ГТД. Опытно-промышленные установки ВИАМ МЭШ-50 и МАП-Р для нанесения ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали горячего тракта ГТД и ГТУ могут быть использованы при решении задач по увеличению ресурса и надежности работы узлов космических аппаратов.

Установки позволяют реализовать в условиях серийного производства все базовые ионно-плазменные технологические процессы с использованием стандартных катодов из никелевых, кобальтовых, алюминиевых сплавов и чистых металлов. Установка МАП-Р предназначена для серийного нанесения двухслойного коррозионностойкого покрытия на сопловой аппарат, выполненный по технологии «блиск», мобильной электростанции с газотурбинным приводом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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, с. 3–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
- [2] Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики. *Наука и жизнь*, 2009, № 10, с. 6–10.
- [3] Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения. *Авиационные материалы и технологии*, 2012, № S, с. 36–52.
- [4] Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей. *Электрометаллургия*, 2016, № 10, с. 23–38.
- [5] Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия с керамическим слоем пониженной теплопроводности на основе оксида циркония для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД. *Сб. докл. конф. «Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники»*. Москва, ФГУП «ВИАМ», 2015, с. 3–3.
- [6] Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А. Вакуумно-плазменная технология получения защитных покрытий из сложнолегированных сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1995, № 2, с. 15–18.
- [7] Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленная установка МАП-1 для нанесения защитных покрытий различного назначения. *Авиационная промышленность*, 1995, № 7–8, с. 44–48.
- [8] Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Журавлева П.Л. Исследование влияния подготовки поверхности и ассистированного осаждения на структуру и свойства эрозионностойкого ионно-плазменного покрытия.

- Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.*, 2018, № 10. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.04.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73
- [9] Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Ионно-плазменные покрытия для защиты лопаток промышленных турбин от сульфидно-оксидной коррозии. *Наука и техника в газовой промышленности*, 2009, № 3, с. 61–68.
- [10] Мубояджян С.А., Александров Д.А., Луценко А.Н., Журавлева П.Л. Упрочнение поверхности титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования. *Авиационные материалы и технологии*, 2018, № 2, с. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39
- [11] Мубояджян С.А. Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2011, № 3, с. 26–30.
- [12] Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Горлов Д.С., Александров Д.А. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности. *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.*, 2013, № 1, Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.04.2020).
- [13] Косьмин А.А., Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Жаро- и коррозионно-стойкое покрытие для рабочих лопаток турбины из перспективного жаропрочного сплава ВЖЛ21. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 1, с. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24
- [14] Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Конденсированные и конденсационно-диффузионные покрытия для лопаток турбин из жаропрочных сплавов с направленной кристаллической структурой. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1996, № 4, с. 15.
- [15] Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий. *Энциклопедия инженера-химика*, 2012, № 5, с. 34–41.
- [16] Будиновский С.А., Смирнов А.А. Нанесение защитных покрытий на ионно-плазменной установке МАП роторного типа. *Авиационная промышленность*, 2018, №3–4, с. 30–34.
- [17] *Способ нанесения защитных покрытий и устройство для его осуществления: пат. 2625698 Рос. Федерация*. № 2016135082; заявл. 29.08.2016; опубл. 18.07.2017. Бюл. № 20 (II ч.). 2 с.
- [18] *Способ защиты лопаток газовых турбин: пат. 2404286 Рос. Федерация*. № 2009139016; заявл. 22.10.2009; опубл. 20.11.2010. Бюл. № 16. 5 с.
- [19] *Изготовление установок для нанесения защитных и упрочняющих покрытий*. URL: <https://viam.ru/map> (дата обращения 18.01.2021).
- [20] Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий. *Энциклопедия инженера-химика*, 2012, № 5, с. 34–41.
- [21] Интервью с начальником лаборатории «Защитные ионно-плазменные, газотермические и газоциркуляционные покрытия деталей ГТД» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) Сергеем Артемовичем Мубояджяном. *Сайт НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ*. URL: <https://viam.ru/interview/2044> (дата обращения 18.01.2021).
- [22] Мадаева А.Д., Умарова М.Х., Джамалуева А.А., Шахидов Х.Р. Перспективы ГТУ в российской энергетике. *Заметки ученого*, 2020, № 3, с. 84–86.

- [23] Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Ионно-плазменные покрытия для защиты лопаток промышленных турбин от сульфидно-оксидной коррозии. 2009. *Сайт НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ*. URL: <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2009/2009-205436.pdf> (дата обращения 18.01.2021).
- [24] Акимов В. Н., Захаренков Л.Э., Каревский А.В., Кувшинова Е.Ю., Семенкин А.В., Солодухин А.Е. Особенности построения и возможные применения мощных ядерных энергодвигательных установок перспективных космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6 (90). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-6-1889

Статья поступила в редакцию 07.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Будиновский С.А., Ляпин А.А., Бенклян А.С. Опытно-промышленные ионно-плазменные установки МЭШ-50 и МАП-Р для нанесения защитных покрытий на детали транспортных и энергетических газотурбинных установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-10-2120>

Будиновский Сергей Александрович — д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории «Технологии поверхности и защитные покрытия для металлических материалов» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ. Автор более 150 научных работ и 50 изобретений в области технологий ионно-плазменного осаждения. e-mail: bbssaa55@mail.ru

Ляпин Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ и изобретений в области плазменных технологий, плазменных двигателей и устройств. e-mail: laa1@bmstu.ru

Бенклян Артем Сергеевич — аспирант 3-го курса кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер лаборатории «Технологии поверхности и защитные покрытия для металлических материалов» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ. e-mail: benklyanartem@yandex.ru

Experimental industrial ion-plasma plants MESH-50 and MAP-R for applying protective coatings on transport and power gas turbine components

© S.A. Budinovskiy¹, A.A. Lyapin², A.S. Benklyan¹

¹ FSUE “VIAM” (All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials),
Moscow, 105005, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper considers selected features of the protective ion-plasma coating deposition on-to large-sized gas turbine components using vacuum-arc method by means of the MESH-50 and MAP-R pilot plants. The units have been developed based on the long-term operating experience of MAP-1 (MAP-1M) serial production. These plants are widely used in Russian and international aircraft-building complexes enabling all basic ion-plasma technological processes using standard cathodes made of nickel, cobalt, aluminum alloys and pure metals (Cu, Ti, Cr, Zr, etc.). The increased dimensions of the deposition chamber and the simultaneous use of several evaporators with pipe cathodes 180 mm in diameter and 540 mm high make it possible to apply coatings to large-sized components of gas turbine engines and plants, including such complex parts as “blisk” and “blink”.

Keywords: protective ion-plasma coatings, heat-resistant coatings, corrosion-resistant coatings, gas turbine engine, gas turbine plant, vacuum arc deposition, MAP-1M plant

REFERENCES

- [1] Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2015, no. 1, pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
- [2] Kablov E.N. *Nauka i zhizn (Science and Life)*, 2009, no. 10, pp. 6–10.
- [3] Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2012, no. 5, pp. 36–52.
- [4] Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. *Elektrometallurgiya — Russian Metallurgy*, 2016, no. 10, pp. 23–38.
- [5] Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Teplozaschitnye pokrytiya s keramicheskim sloem ponizhennoy teploprovodnosti na osnove oksida tsirkoniya dlya lopatok turbiny vysokogo davleniya perspektivnykh GTD [Heat-protective coatings with a ceramic layer of low thermal conductivity based on zirconium oxide for high-pressure turbine blades of promising gas turbine engines]. *Sb. dokl. konf. «Sovremennye dostizheniya v oblasti sozdaniya perspektivnykh nemetallicheskikh kompozitsionnykh materialov i pokrytiy dlya aviatsionnoy i kosmicheskoy tekhniki»* [Proc. of conf. “Modern achievements in the field of creating promising non-metallic composite materials and coatings for aviation and space technology”]. Moscow, FSUE “VIAM”, 2015, p. 3.
- [6] Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N., Budinovskiy S.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov — Metal Science and Heat Treatment*, 1995, no. 2, pp. 15–18.
- [7] Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A. *Aviatsionnaya promyshlennost — Aviation Industry*, 1995, no. 7–8, pp. 44–48.
- [8] Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Zhuravleva P.L. *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn — Scientific and Technical On-line*

- Journal "Proceedings of VIAM"*, 2018, no. 10, p. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed 20.04.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73
- [9] Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A., Kosmin A.A. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti — Science and Technology in the Gas Industry*, 2009, no. 3, pp. 61–68.
- [10] Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Lutsenko A.N., Zhuravleva P.L. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2018, no. 2, pp. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39
- [11] Muboyadzhyan S.A. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik — Polymer Science. Series D*, 2011, no. 3, pp. 26–30.
- [12] Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Gorlov D.S., Aleksandrov D.A., *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn — Scientific and Technical On-line Journal "Proceedings of VIAM"*, 2013, no. 1, p. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed April 20, 2020).
- [13] Kosmin A.A., Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. 1, pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24
- [14] Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov — Metal Science and Heat Treatment*, 1996, no. 4, p. 15.
- [15] Muboyadzhyan S.A. *Entsiklopediya inzhenera-khimika — Encyclopedia of Chemical Engineer*, 2012, no. 5, pp. 34–41.
- [16] Budinovskiy S.A., Smirnov A.A. *Aviatsionnaya promyshlennost — Aviation Industry*, 2018, no. 3-4, pp. 30–34.
- [17] *Sposob nanoseniya zashchitnykh pokrytiy i ustroystvo dlya yego osushestvleniya* [A method of applying protective coatings and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2016135082, 2016, 2 p.
- [18] *Sposob zashchity lopatok gazovykh turbin* [A method for protecting blades of gas turbines]. Patent RF, no. 2009139016, 2009, 5 p.
- [19] *Izgotovleniye ustanovok dlya nanoseniya zaschitnykh i uprochnyayuschikh pokrytiy* [Manufacturing of installations for applying protective and hardening coatings]. Available at: <https://viam.ru/map> (accessed January 18, 2021).
- [20] Muboyadzhyan S.A. *Entsiklopediya inzhenera-khimika — Encyclopedia of Chemical Engineer*, 2012, no. 5, pp. 34–41.
- [21] Interview with the head of the laboratory “Protective ion-plasma, gas-thermal and gas-circulation coatings of GTE parts” of the All-Russian Research Institute of Aviation Materials (VIAM) Sergey Artemovich Muboyadzhyan. *VIAM website*. Available at: <https://viam.ru/interview/2044> (accessed January 18, 2021).
- [22] Madaeva A.D., Umarova M.Kh., Dzhamalueva A.A., Shakhidov Kh.R. *Zametki uchenogo (Scientist's notes)*, 2020, no. 3, pp. 84–86.
- [23] Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A., Kosmin A.A. *Ionno-plazmennye pokrytiya dlya zaschity lopatok promyshlennykh turbin ot sulfidno-oksidnoy korrozii* [Ion-plasma coatings for the protection of industrial turbine blades against sulfide-oxide corrosion]. Moscow, VIAM, 2009. Available at: <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2009/2009-205436.pdf> (accessed January 18, 2021).
- [24] Akimov V.N., Zakharenkov L.E., Karevskiy A.V., Kuvshinova E.Yu., Semenkina A.V., Solodukhin A.E. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 6 (90). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-6-1889>

Budinovskiy S.A. (b. 1955), Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory “Protective ion-plasma, gas-thermal and gas-circulation coatings of GTE parts”, FSUE VIAM. Author of over 150 research papers and 50 inventions in the field of ion-plasma deposition. e-mail: bbssaa55@mail.ru

Lyapin A.A. (b. 1950), Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Plasma Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 papers and inventions in the field of plasma technology, plasma engines and facilities. e-mail: laa1@bmstu.ru

Benklyan A.S. (b. 1994), post-graduate student, Department of Plasma Power Plants, Bauman Moscow State Technical University; technician, Laboratory “Surface technologies and protective coatings for metallic materials”, FSUE VIAM. e-mail: benklyanar-tem@yandex.ru