

Научная статья

УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-87-97

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ НАНЕСЕНИИ КОНДЕНСАЦИОННО-ДИФФУЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Д.С. Горлов¹, Д.С. Кашин¹, Е.Н. Азаровский¹, Я.С. Дружнова¹

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

Аннотация. Приведены результаты градиентного осаждения конденсационно-диффузионного покрытия для защиты никелевого сплава от сульфидно-оксидной коррозии и высокотемпературного окисления с целью получения минимального размера капельной фазы в начальный момент осаждения при работе напряжения смещения в постоянном или импульсном режимах. Установлено, что режимы работы смещения существенно не влияют на адгезионную составляющую и количество дефектов на границе раздела «сплав–покрытие», а градиентное начало осаждения повышает уровень данных характеристик.

Ключевые слова: градиентное осаждение, конденсационно-диффузионное покрытие, сульфидно-оксидная коррозия, высокотемпературное окисление, постоянное напряжение смещения, импульсное напряжение смещения, граница раздела «сплав–покрытие»

Для цитирования: Горлов Д.С., Кашин Д.С., Азаровский Е.Н., Дружнова Я.С. Технологические приемы ионной обработки при нанесении конденсационно-диффузионного покрытия // Труды ВИАМ. 2023. № 12 (130). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-87-97.

Scientific article

TECHNOLOGICAL METHODS OF ION PROCESSING WITH APPLYING CONDENSATION-DIFFUSION COATING

D.S. Gorlov¹, D.S. Kashin¹, E.N. Azarovskiy¹, Ya.S. Druzhnova¹

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 gradient deposition of a condensation-diffusion coating to protect a nickel alloy from sulfide-oxide corrosion and high-temperature oxidation are presented in order to obtain the minimum size of the droplet phase at the initial moment of deposition when the bias voltage is operating in constant or pulse modes. It is established that the displacement operating modes do not significantly affect the adhesive component and the number of defects at the alloy-coating interface, and the gradient onset of deposition increases these characteristics.

Keywords: gradient deposition, condensation-diffusion coating, sulfide-oxide corrosion, high-temperature oxidation, constant displacement voltage, pulse displacement voltage, alloy-coating interface

For citation: Gorlov D.S., Kashin D.S., Azarovskiy E.N., Druzhnova Ya.S. Technological methods of ion processing with applying condensation-diffusion coating. *Trudy VIAM*, 2023, no. 12 (130), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-87-97.

Введение

Для изготовления газотурбинных двигателей нового поколения применяют жаропрочные никелевые сплавы [1–5], обладающие высокими уровнями жаростойкости, коррозионной стойкости и эксплуатируемые при рабочих температурах до 1200 °С. Несмотря на высокие уровни свойств, для продления ресурса работы жаропрочных никелевых сплавов используют конденсационно-диффузионные покрытия (КДП), которые наносят различными методами.

В России широкое применение получил метод вакуумной плазменной технологии высоких энергий, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [6–7]. При реализации данного метода на поверхность пера лопаток наносят широкую номенклатуру КДП: жаростойкие, коррозионностойкие, эрозионностойкие и др. [8–10].

Для продления срока службы жаропрочного никелевого сплава, работающего при температуре 1100–1150 °С, на рабочую поверхность пера лопатки наносят КДП системы $\text{NiCoCrAlY} + \text{AlNiSiB}$. Данное покрытие предназначено для защиты от газовой коррозии при температуре до 1050 °С и от сульфидно-оксидной коррозии деталей газотурбинных двигателей, работающих при температурах до 950 °С [11–15].

В производственных условиях КДП толщиной до 100 мкм наносят на поверхность пера рабочих и сопловых лопаток с помощью ионно-плазменных установок типа МАП. Для крупногабаритных деталей в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны установки роторного типа МАП (МАП-Р, МАП-5) [16].

Для обеспечения заданных свойств необходимо соблюдать требования и параметры процесса на всех этапах нанесения КДП на поверхность детали, которые изложены в технологических инструкциях разработчика покрытия. Одной из причин образования дефектов на границе сопряжения «сплав–покрытие» может стать нарушение технологии подготовки рабочей поверхности на этапе ионной обработки – в частности, несоблюдение параметров подачи напряжения смещения вследствие загрязненной поверхности обрабатываемых деталей, нестабильности работы источника, несрабатывания ключа защиты или неправильного подключения регистрирующего прибора напряжения смещения. Вторым фактором образования дефектов на границе сопряжения «сплав–покрытие» может служить нарушение рекомендаций разработчиков материала и технологии напыления КДП. Несоблюдение требований к конструкции покрытия, характеризующейся соотношением толщин конденсированного никелевого слоя и диффузионного алюминиевого слоя, может привести к сквозному алитированию конденсированного слоя до жаропрочного сплава. В поверхностном слое сплава могут образоваться вторичная реакционная зона или пройти процессы некомпенсированной взаимной диффузии элементов сплава и покрытия.

При разработке и применении КДП одной из важнейших характеристик является соотношение толщины (мкм) покрытия внутреннего конденсированного слоя системы MeCoCrAlY и величины удельного привеса (г/м^2) алюминиевого слоя. Это соотношение влияет на конструкцию и тип защитного жаростойкого покрытия, которое формируется после проведения высокотемпературного вакуумного диффузионного отжига. В свою очередь, температурно-временные параметры вакуумного термодиффузионного отжига влияют на глубину алитированного слоя, поэтому для каждой системы разработанного КДП необходимо подбирать соответствующий режим.

В работе [17] описаны условия получения КДП системы $\text{MeCoCrAlY} + \text{AlNiY}$ с дефектами на границе сопряжения «сплав–покрытие», возникшими в результате нарушения технологических параметров ионной очистки и конструкции покрытия при несоблюдении рекомендованного соотношения толщины конденсированного никелевого слоя и величины удельного привеса алюминиевого слоя. В модельном эксперименте

показано, что переизбыток алюминиевого слоя при термодиффузионном отжиге приводит к протеканию процессов некомпенсированной взаимной диффузии элементов КДП и основы, вследствие чего на границе сопряжения «сплав–покрытие» образуется цепочка пор (эффект Киркендалла). Показано, что при соблюдении параметров ионной обработки поверхности при нанесении КДП с градиентным осаждением на начальной стадии формирования покрытия и работающим в постоянном или импульсном режимах источнике смещения на границе сопряжения «сплав–покрытие» не образуются дефекты, которые могут стать причиной скалывания, растрескивания, отслаивания, снижения адгезионной прочности. Режимы работы смещения существенно не влияют на уровень данных характеристик.

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

Материалы и методы

Для определения причин возникновения дефектов на границе сопряжения «сплав–покрытие» на начальной стадии осаждения КДП проведен модельный эксперимент, включающий нанесение покрытия системы NiCoCrAlY + AlNiSiB для защиты жаропрочного никелевого сплава от сульфидно-оксидной коррозии при температуре до 950 °С и высокотемпературного окисления при температуре до 1050 °С. Данный эксперимент отличается от серийной технологии нанесения градиентным началом осаждения для получения минимальных размеров капельной фазы с последующим увеличением величины тока вакуумной дуги и, как следствие, размеров капельной фазы, а также возможностью источников смещения регулировать напряжение в постоянном или импульсном режимах.

В качестве макета лопатки изготовлены образцы-свидетели из жаропрочного никелевого сплава прямоугольной формы с максимальными габаритами 3×20×230 мм и цилиндрической формы диаметром 25 мм и длиной 8 мм для контроля распределения толщины покрытия по высоте обрабатываемой детали, которые можно напылять в ионно-плазменной установке с ассистированным осаждением МАП-3. Внешний вид вакуумно-дуговой установки МАП-3 с автоматизированной системой управления технологическим процессом с ассистированным осаждением представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид вакуумно-дуговой установки МАП-3 с автоматизированной системой управления технологическим процессом с ассистированным осаждением

Установка МАП-3 оснащена двумя инверторными источниками смещения со встроенными ключами дугогашения типа ELB-40/450 (работает при постоянном режиме, напряжении до 450 В и токе до 40А) и типа СПЭС-56 (работает при постоянном и импульсном режимах, напряжении до 1000 В, токе до 56 А, частоте от 1 до 40 кГц). Методом вакуумной плазменной технологии высоких энергий в ионно-плазменных установках типа МАП реализовано два электрических контура управления

технологическим процессом: первый (катод и анод) отвечает за формирование плазмы материала катода в рабочей камере установки, второй (детали–опорный электрод) – за управление энергией ионного потока. Изменяя величину тока вакуумной дуги можно управлять размером капельной фазы, регулируя величину напряжения смещения – проводить процессы осаждения, травления и насыщения поверхности деталей ионами материала катода.

Основной стадией перед нанесением КДП является подготовка поверхности детали и образцов-свидетелей. От качества подготовки поверхности перед нанесением КДП и ионной очистки деталей в рабочей камере установки типа МАП зависят адгезионная составляющая и количество дефектов на границе сопряжения «сплав–покрытие». В данной работе применяли серийную технологию подготовки поверхности образцов-свидетелей перед напылением: обезжиривание в ацетоне, промывка в щелочном растворе, сушка, поверхностная обдувка электрокорундом, промывка в ультразвуковой ванне с дистиллированной водой и сушка.

После подготовки поверхности образцы-свидетели закрепляли в технологической оснастке и размещали в рабочей камере установки МАП-3 (рис. 2). С целью увеличения обрабатываемой площади для стабильной работы инверторных источников смещения в рабочей камере также размещали цилиндрические имитаторы.



Рис. 2. Внешний вид образцов-свидетелей, размещенных в рабочей камере установки МАП-3

Перед градиентным осаждением увеличили время ионной очистки в плазме материала покрытия для сравнения с серийной технологией, а также повышения качества подготовки и активации поверхности образцов-свидетелей.

Далее КДП системы $\text{NiCoCrAlY} + \text{AlNiSiB}$ наносили по серийной технологии и с градиентным началом осаждения при работе инверторных источников смещения со встроенными ключами дугогашения типа ELB-40/450 в постоянном режиме и типа СПЭС-56 в постоянном и импульсном режимах. Градиентное начало осаждения проводили при токе вакуумной дуги 500 А, уровень которого плавно увеличивали до 700 А в течение 10 мин, тем самым варьировали размеры капельной фазы, начиная осаждение с каплей меньшего размера, чем капли, характерные для данного материала катода при заданном токе вакуумной дуги 700 А. Параметры смещения соответствовали серийным. Отличительной особенностью процесса было наличие инверторных источников смещения разных производителей, в одном из которых реализован импульсный режим работы с частотой до 40 кГц.

После нанесения КДП системы $\text{NiCoCrAlY} + \text{AlNiSiB}$ по серийной технологии и с градиентным началом осаждения при работе инверторных источников смещения со встроенными ключами дугогашения в постоянном и импульсном режимах образцы-свидетели разделили на две части: в исходном состоянии и после вакуумного отжига. Следует отметить, что градиентное осаждение применяли и для диффузионного слоя AlNiSiB , за исключением образцов, полученных по серийной технологии.

Для металлографического исследования границы сопряжения «сплав–покрытие» на наличие дефектов после осаждения КДП из образцов-свидетелей изготовлены шлифы в местах максимума напыления, в условном месте перехода полки лопатки в перо и в районе верхней бандажной полки.

На рис. 3 представлена модельная схема расположения «горячего» и «холодных» сечений выбранных для исследования микроструктур покрытия на образцах-свидетелях, имитирующих высоту крупногабаритной лопатки газотурбинного двигателя. Материалы, отобранные для исследования на высоте 125 мм на образце-свидетеле, соответствуют «горячему» сечению пера лопатки, на высоте 45 и 220 мм – «холодным» сечениям нижней и верхней частей пера лопатки соответственно.

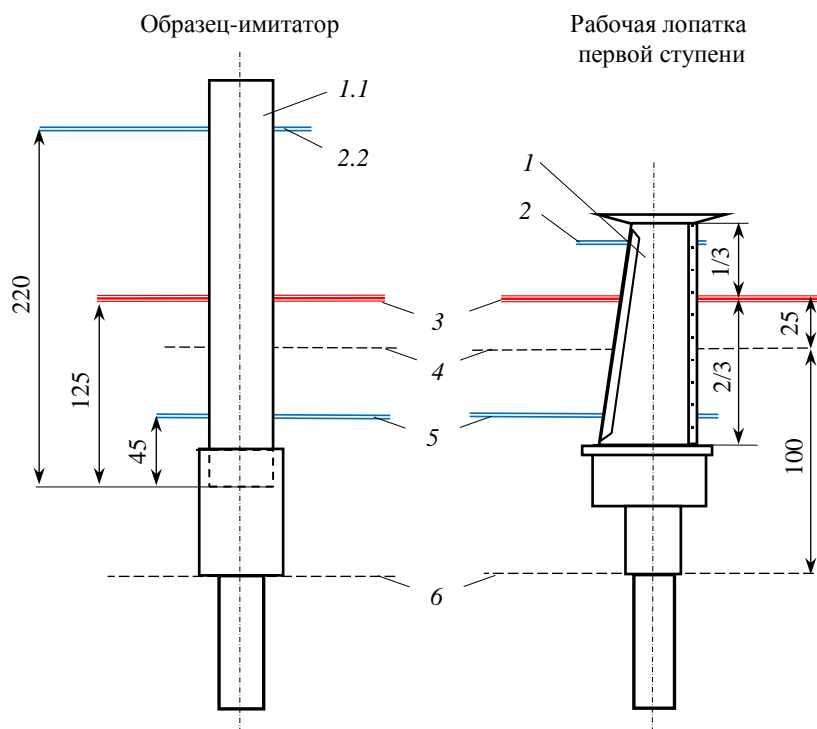


Рис. 3. Модельная схема расположения «горячего» и «холодных» сечений, выбранных для исследования микроструктур покрытия на образцах-свидетелях, имитирующих высоту рабочей лопатки газотурбинного двигателя: 1 – рабочая поверхность пера лопатки; 1.1 – рабочая поверхность; 2 – верхняя плоскость «холодного» сечения пера лопатки у бандажной полки; 2.2 – верхняя плоскость «холодного» сечения; 3 – плоскость «горячего» сечения; 4 – плоскость фиксатора установки МАП-3; 5 – нижняя плоскость «холодного» сечения; 6 – плоскость расположения среза трубки вращения детали на карусели

Металлографические исследования образцов-свидетелей после нанесения КДП системы $\text{NiCoCrAlY} + \text{AlNiSiB}$ в исходном состоянии и после вакуумного отжига проводили на оптическом микроскопе с цифровой системой обработки изображения при увеличении $\times 500$.

Результаты и обсуждение

Цель данной работы – показать различия между серийной технологией осаждения КДП и технологией, предусматривающей градиентное нанесение первичных слоев, в первую очередь конденсированного слоя NiCoCrAlY , для уменьшения количества дефектов на границе сопряжения «сплав–покрытие» за счет формирования минимального размера капельной фазы на начальном этапе осаждения. Зачастую именно от

начальной стадии ионной очистки зависят свойства покрытия. При некачественной ионной очистке, связанной либо с поломкой источника смещения, ключа дугогашения, либо с неправильной их настройкой, некорректной продолжительностью ионной очистки, а также при нарушениях, допущенных при подготовке поверхности деталей перед нанесением, на границе сопряжения «сплав–покрытие» наблюдаются дефекты в виде черных включений и отслоений. В задачи данной работы также входило изучение влияния импульсного режима инверторного источника питания на осаждение КДП. Поэтому для оценки качества ионной очистки, градиентного осаждения и осаждения с импульсным смещением, а также контроля толщины нанесенного КДП системы NiCoCrAlY + AlNiSiB в различных сечениях изготовлены шлифы в исходном состоянии и после вакуумного отжига.

Микроструктуры КДП системы NiCoCrAlY + AlNiSiB, нанесенного по серийной технологии, а также с градиентным началом осаждения при работе инверторных источников смещения со встроенными ключами дугогашения в постоянном и импульсном режимах на прямоугольный образец-свидетель из никелевого сплава, в местах максимума (125 мм), минимальной (45 мм) и максимальной (220 мм) зон напыления до вакуумного отжига представлены на рис. 4.

Четко видны границы сопряжения «сплав–покрытие», а также между никелевым конденсированным слоем системы NiCoCrAlY и алюминиевым диффузионным слоем системы AlNiSiB. Значительных дефектов на границе сопряжения «никелевый сплав–конденсированный слой системы NiCoCrAlY» во всех исследуемых зонах образцов-свидетелей не наблюдается. Присутствует шероховатость, характерная для подготовки поверхности обдувкой электрокорундом с размером фракции F100. В минимальных и максимальных зонах напыления наблюдаются включения на границе сопряжения в виде черных точек. Возможно, это частички электрокорунда, оставшиеся после обдувки, или пористость, образовавшаяся за счет конденсации более крупных капель, или грязь, появившаяся после травления. Больше всего дефектов зафиксировано в максимальной зоне напыления (220 мм). Отсутствуют дефекты и на границе сопряжения «никелевый слой–алюминиевый слой». Толщина КДП системы NiCoCrAlY + AlNiSiB, нанесенного по серийной технологии и с градиентным началом осаждения при работе инверторных источников смещения со встроенными ключами дугогашения в постоянном и импульсном режимах, до вакуумного отжига составляет от 73,4 до 103,6 мкм. Существенной разницы в конденсатах покрытий, полученных при работе инверторных источников смещения в постоянном и импульсном режимах, не наблюдается.

С целью дальнейшего исследования изготовили микрошлифы из образцов-свидетелей, прошедших вакуумный отжиг. В полученных шлифах на границе сопряжения «сплав–покрытие» пористости не наблюдается, присутствует классическая структура легированного КДП с тремя четкими переходными зонами (рис. 5). В верхней (рабочей) зоне покрытий формируется интерметаллидная фаза NiAl, в которой содержатся жаро- и коррозионностойкие элементы – алюминий и хром в количестве 25 и 15 % (по массе) соответственно. Как правило, содержание алюминия снижается при переходе от рабочей зоны к границе сопряжения «сплав–покрытие». Белые мелкодисперсные включения представляют собой вытесненный алюминием чистый альфа-хром, который равномерно распределен по толщине КДП и присутствует в виде тугоплавких карбидов. Толщина КДП системы NiCoCrAlY + AlNiSiB, нанесенного по серийной технологии и с градиентным началом осаждения при работе инверторных источников смещения со встроенными ключами дугогашения в постоянном и импульсном режимах, после вакуумного отжига составляет от 71,1 до 102,1 мкм.

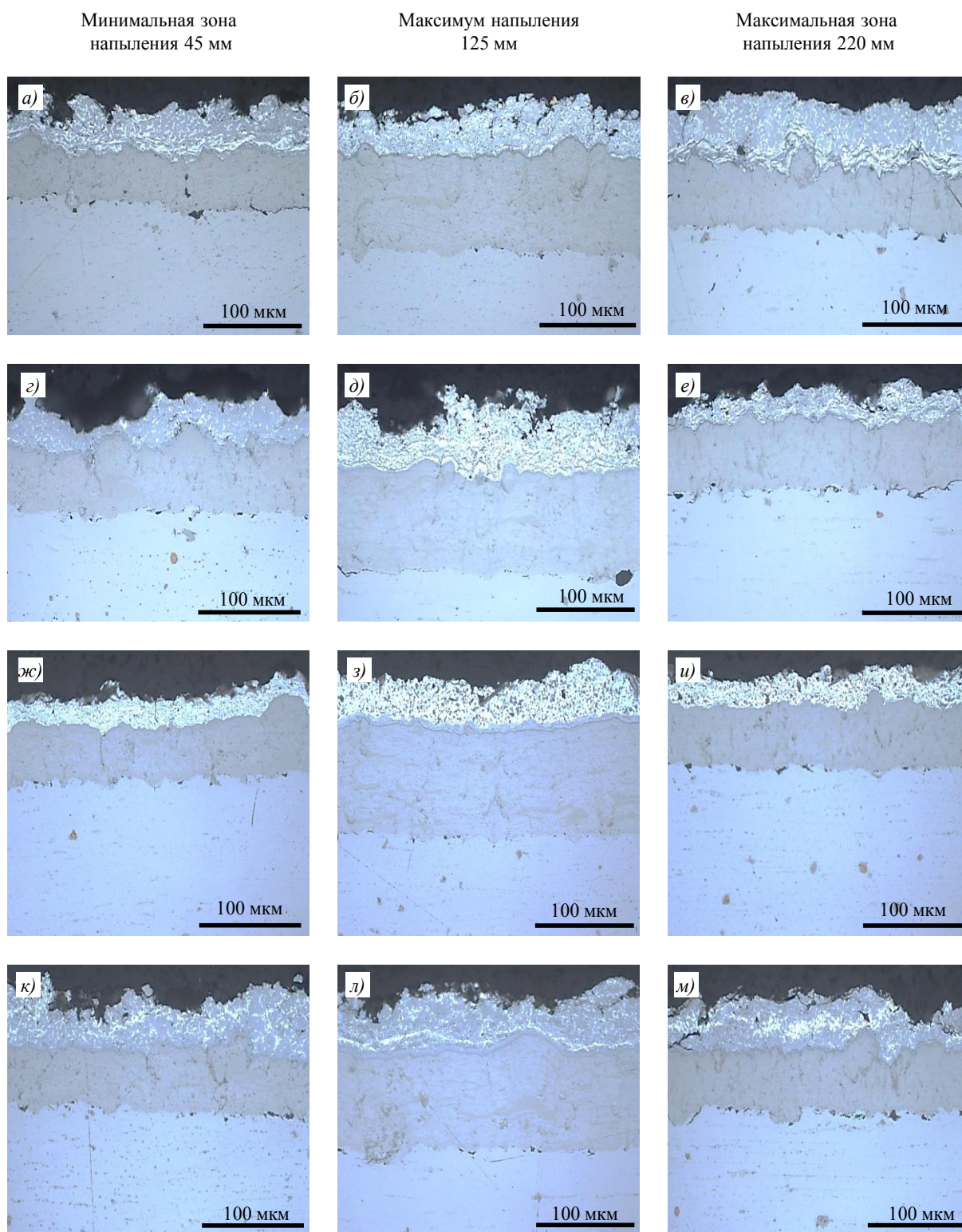


Рис. 4. Микроструктуры ($\times 500$) конденсационно-диффузионного покрытия системы $\text{NiCoCrAlY} + \text{AlNiSiB}$, нанесенного по серийной технологии (а–в) и с градиентным началом осаждения (г–м) при работе инверторных источников смещения со встроенными ключами дугогашения типа ELB-40/450 (а–е) и типа СПЭС-56 (ж–м) в постоянном (а–и) и импульсном (к–м) режимах на прямоугольный образец-свидетель из никелевого сплава, в местах максимума, минимальной и максимальной зон напыления до вакуумного отжига

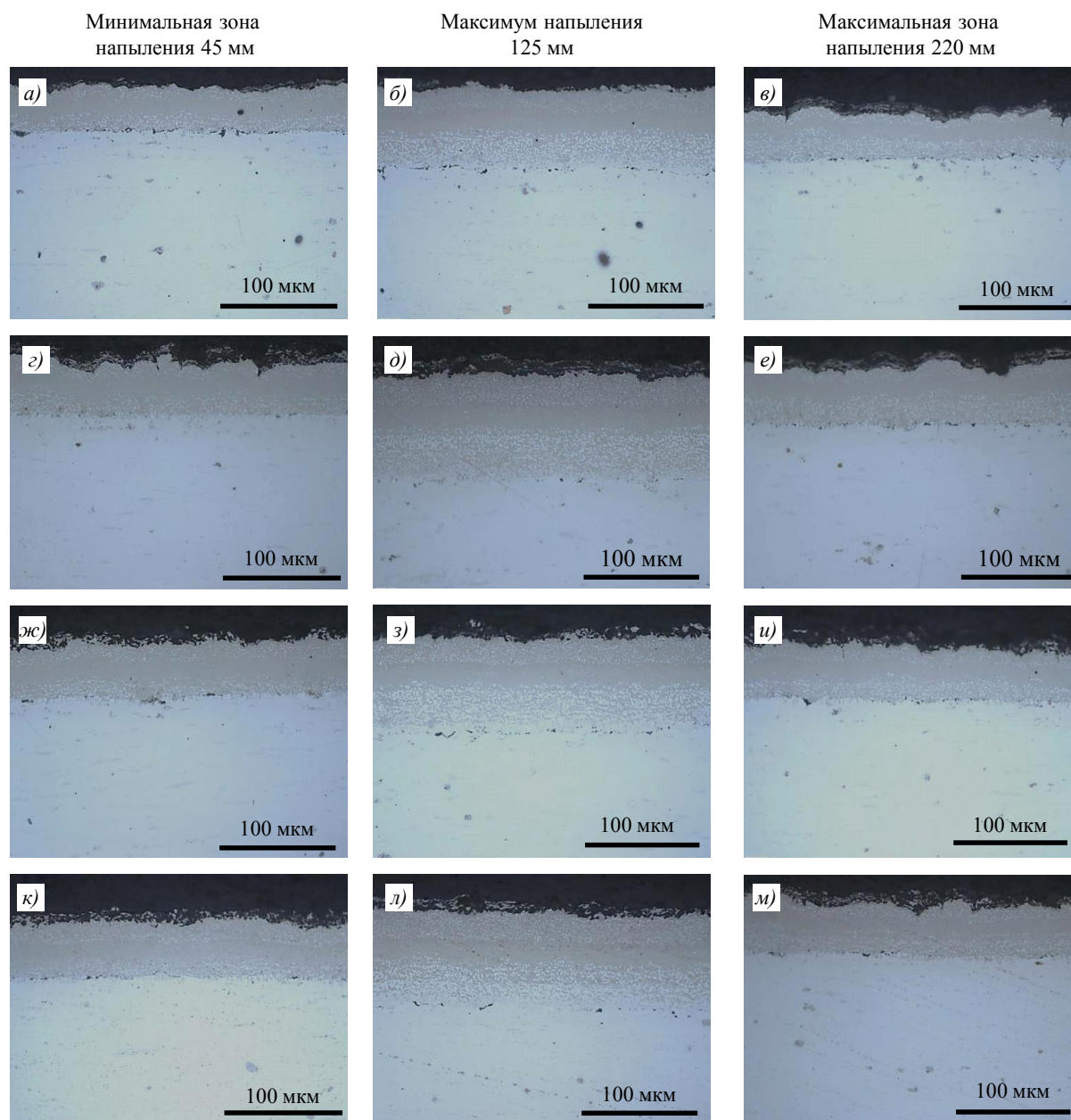


Рис. 5. Микроструктуры ($\times 500$) конденсационно-диффузионного покрытия системы $\text{NiCoCrAlY} + \text{AlNiSiB}$, нанесенного по серийной технологии (а–в) и с градиентным началом осаждения (г–м) при работе инверторных источников смещения со встроенными ключами дугогашения типа ELB-40/450 (а–е) и типа СПЭС-56 (ж–м) в постоянном (а–и) и импульсном (к–м) режимах на прямоугольный образец-свидетель из никелевого сплава, в местах максимума, минимальной и максимальной зон напыления после вакуумного отжига

Для получения заданной конструкции КДП необходимо соблюдать соотношение толщин слоя системы NiCoCrAlY и внешнего алюминиевого слоя системы AlNiSiB , что позволяет получить серийную структуру и исключить дефекты легированного диффузионного покрытия в виде образования пористости на границе сопряжения «жаростойкий сплав–жаростойкое покрытие». Для изучения свойств КДП, полученных по серийной технологии и с градиентным началом осаждения при работе инверторных источников смещения со встроенными ключами дугогашения в постоянном

и импульсном режимах, следует провести работу по их испытаниям на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии и жаростойкость.

Заключения

Приведены результаты технологических приемов при осаждении КДП системы NiCoCrAlY + AlNiSiB для защиты никелевого сплава от сульфидно-оксидной коррозии и высокотемпературного окисления при серийной технологии и градиентном осаждении с целью получения минимального размера капельной фазы в начальный момент осаждения при работе напряжения смещения в постоянном или импульсном режимах. Покрытие наносили на установке МАП-3, оснащенной двумя инверторными источниками смещения со встроенными ключами дугогашения типа ELB-40/450 в постоянном режиме и типа СПЭС-56 в постоянном и импульсном режимах без ассистированного осаждения.

Металлографический анализ шлифов, изготовленных из полученных образцов-свидетелей, показал отсутствие дефектов на границе сопряжения «сплав–покрытие». Толщина КДП системы NiCoCrAlY + AlNiSiB до вакуумного отжига составляет от 73,4 до 103,6 мкм, после вакуумного отжига – от 71,1 до 102,1 мкм.

Изучение микршлифов, изготовленных из образцов-свидетелей с нанесенными покрытиями по серийной технологии и с градиентным нанесением при работе смещения в постоянном и импульсном режимах после вакуумного отжига, выявил характерную структуру КДП системы NiCoCrAlY + AlNiSiB, нанесенного по серийной технологии.

Анализ полученных данных не выявил существенных отличий при отклонениях от серийной технологии нанесения с целью выявления особенностей, влияющих на адгезионную составляющую и количество дефектов на границе сопряжения «сплав–покрытие».

Однако эксперименты подтвердили основные постулаты процесса осаждения КДП. Необходимы качественная подготовка поверхности детали перед нанесением и ионная очистка в плазме материала катода при стабильной работе инверторного источника смещения. Не следует пренебрегать продолжительностью ионной очистки: при сокращении времени обработки снижается качество изделий. Нельзя забывать о соотношениях никелевого и алюминиевого слоев, чтобы избежать сквозного алитирования, что неблагоприятным образом может сказаться на свойствах композиции «сплав–покрытие».

Список источников

1. ВИАМ 90 лет: гордимся прошлым, создаем будущее / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 97–103.
2. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 36–52.
4. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Луцкая С.А., Дмитриев Н.С. Литейный интерметаллидный сплав на основе соединения Ni₃Al для турбинных лопаток газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 01 URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.07.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17.
5. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11.

6. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; заявл. 31.03.09; опубл. 27.10.10.
7. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; заявл. 08.11.07; опубл. 27.09.09.
8. 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.
9. Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Эффективность двухстадийной ионно-плазменной технологии получения легированных диффузионных алюминидных покрытий на жаропрочных никелевых сплавах // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. № 5. С. 27–32.
10. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-39-54.
11. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Егорова Л.П., Луценко А.Н., Галоян А.Г. Защитные и упрочняющие покрытия лопаток и деталей ГТД // *75 лет. Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 2007. С. 27–44.
12. Белоус В.Я., Жирнов А.Д., Луценко А.Н., Мубояджян С.А. Повышение коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД путем применения ионно-плазменного покрытия // *Авиационные материалы и технологии*. 2006. № 1. С. 53–60.
13. Матвеев П.В., Будиновский С.А. Исследование свойств защитных жаростойких покрытий для интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА для рабочих температур до 1300 °С // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 3. С. 22–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-22-26.
14. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Жаростойкие высокотемпературные ионно-плазменные покрытия для лопаток турбин современных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. № 1. С. 92–102.
15. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Журавлева П.Л., Горлов Д.С. Исследование влияния подготовки поверхности и ассистированного осаждения на структуру и свойства эрозионностойкого ионно-плазменного покрытия // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.
16. Будиновский С.А., Ляпин А.А., Бенклян А.С. Опыт-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. № 10. С. 1–13. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-10-2120.
17. Азаровский Е.Н., Доронин О.Н., Мубояджян С.А. Образование пористости на границе «жаропрочный сплав–жаростойкое конденсационно-диффузионное покрытие» // *Труды ВИАМ*. 2019. № 2 (74). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-113-120.

References

1. *VIAM 90 years: We are proud of the past, create the future*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NIC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022, pp. 97–103.
2. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
3. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nickel foundry heat resisting alloys of new generation. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 36–52.
4. Bazyleva O.A., Arginbayeva E.G., Lutskaya S.A., Dmitriev N.S. Foundry intermetallic alloy based on Ni₃Al compound for turbine blades gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 11, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17.

5. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. *A method of applying a combined heat-resistant coating*: pat. 2402633 Rus. Federation; appl. 31.03.09; publ. 27.10.10.
7. *A method of processing the surface of a metal product*: pat. 2368701 Rus. Federation; appl. 08.11.07; publ. 27.09.09.
8. Muboyajyan S.A., Kablov E.N., Budinovskiy S.A. Vacuum-plasma technology for obtaining protective coatings from complex alloy alloys. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 1995, no. 2, pp. 15–18.
9. Budinovskiy S.A., Muboyajyan S.A. The effectiveness of a two-stage ion-plasma technology for obtaining alloy diffusion aluminum coatings on heat-resistant nickel alloy. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 2003, no. 5, pp. 27–32.
10. Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A. Ion-plasma technology: prospective processes, coatings, equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
11. Kablov E.N., Muboyajyan S.A., Budinovskiy S.A., Egorova L.P., Lutsenko A.N., Galoyan A.G. Protective and strengthening coatings of the blades and parts of the GTD. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 27–44.
12. Belous V.Ya., Zhirnov A.D., Lutsenko A.N., Muboyajyan S.A. Increase in corrosion resistance of steel blades of the compressor of the GTD by using ion-plasma coating. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2006, no. 1, pp. 53–60.
13. Matveev P.V., Budinovskiy S.A. Research of the properties of protective heat-resistant coating for intermetallic nickel alloys operating at temperatures up to 1300 °C. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 22–26.
14. Muboyajyan S.A., Budinovskiy S.A. Heat-resistant high-temperature ion-plasma coatings for turbines of modern GTD. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2003, no. 1, pp. 92–102.
15. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Zhuravleva P.L., Gorlov D.S. Investigation of the effect of surface preparation and ion-assisted deposition on the structure and properties of erosion-resistant ion-plasma coating. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.
16. Budinovskiy S.A., Lyapin A.A., Benklyan A.S. Expensive industrial-plasma installations of MASH-50 and MAP-R for applying protective coatings to parts of transport and energy gas turbine installations. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2021, no. 10, pp. 1–13. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-10-2120.
17. Azarovskiy E.N., Doronin O.N., Muboyadzhyan S.A. Formation of porosity on the border «of heat-resistant alloy–heat-resistant condensation-diffusion coating». *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-113-120.

Информация об авторах

Горлов Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Кашин Дмитрий Сергеевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

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

Дружнова Яна Сергеевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry S. Gorlov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry S. Kashin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Yana S. Druzhnova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.10.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.11.2023.
The article was submitted 27.10.2023; approved and accepted for publication after reviewing 07.11.2023.