

Научная статья

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-52-59

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГАЗОЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Д.С. Кашин¹, П.А. Стехов¹, Д.В. Чесноков¹

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

Аннотация. Газоциркуляционный метод обеспечивает равномерное нанесение различных металлических покрытий по всей поверхности детали, однако имеет ряд недостатков, которые в настоящее время преодолеваются с помощью технологических приемов. Для решения проблемы нанесения покрытия на любые поверхности деталей используют маскирующие и порошковые смеси. Рассмотрены основные способы нанесения диффузионных покрытий с помощью газоциркуляционных процессов. Показано превосходство таких покрытий по сравнению с покрытиями, нанесенными порошковыми методами.

Ключевые слова: никелевые сплавы, алитированный слой, газоциркуляционный метод, жаростойкость, диффузионные покрытия, алитирование, хромирование

Для цитирования: Кашин Д.С., Стехов П.А., Чесноков Д.В. Современные тенденции развития газоциркуляционных покрытий // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-52-59.

Scientific article

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF CHEMICAL VAPOR DEPOSITION COATINGS

D.S. Kashin¹, P.A. Stekhov¹, D.V. Chesnokov¹

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 chemical vapor deposition method ensures uniformity of the applied coating over the entire surface of the part, however, it has a number of drawbacks that are currently being technologically solved. The problem of applying the coating to all surfaces is being addressed with the help of masking pastes and powder mixtures. The main methods of chemical vapor deposition processes for applying diffusion coatings are considered. The superiority over coatings applied by powder methods is demonstrated.

Keywords: nickel alloys, aluminium layer, chemical vapor deposition, heat resistant, diffusion coating, aluminizing, chrome coating

For citation: Kashin D.S., Stekhov P.A., Chesnokov D.V. Modern trends in the development of chemical vapor deposition coatings. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-52-59.

Введение

В настоящее время для повышения ресурса и обеспечения работоспособности большинства деталей газотурбинных двигателей (ГТД) широко используют различные защитные покрытия. Для защиты поверхностей лопаток турбины ГТД от окисления при высоких температурах зачастую применяют газоциркуляционные покрытия. Наиболее перспективным направлением является использование лопаток со сложной внутренней системой каналов для принудительного охлаждения в процессе эксплуатации. Качество нанесения покрытия влияет на его механические, физико-химические и эксплуатационные свойства, такие как прочность, пластичность, сопротивление усталости и жаростойкость. Чтобы обеспечить необходимые свойства и долговечность системы «сплав–покрытие», важно правильно сформировать структуру покрытия в процессе его нанесения. Газоциркуляционный метод позволяет наносить защитный состав на высококоразвитую внутреннюю поверхность деталей, в том числе получаемых аддитивными методами [1–7].

В рамках реализации комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ ведутся работы по созданию новых составов и технологий нанесения покрытий газоциркуляционным методом [8].

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

Обзор газоциркуляционных покрытий

Диффузионные покрытия получают в специально подобранной среде, которая при высоких температурах содержит активные атомы (ионы) насыщающего элемента. Многообразие технологий химико-термической обработки требует рационального выбора среды насыщения, подтвержденного термодинамическими расчетами.

При газоциркуляционном алитировании алюминий перемещается на поверхность подложки за счет газопереноса, например с помощью газообразного хлорида алюминия, поэтому процесс нанесения покрытия более точно можно описать как химическое осаждение из газовой фазы. При взаимной диффузии между наносимым алюминием и основным сплавом формируется металлическое покрытие, состоящее в основном из NiAl, CoAl, FeAl или TiAl в зависимости от состава базового сплава и содержащее разное количество большинства элементов, присутствующих в основном сплаве.

Процессы диффузионного насыщения являются сложными, даже если рассматривать только никель и алюминий. Это связано с термодинамической устойчивостью различных фаз в системе Ni–Al, диапазоном составов, при которых каждая фаза является устойчивой (состояние изменяется в процессе нагрева), и доминирующими процессами диффузии в слоях сплава, близких к поверхности.

В работе [9] систематизированы дефекты микроструктуры газоциркуляционного хромоалитированного покрытия, выявленные методами металлографического и рентгеноструктурного анализа. Показаны возможные причины возникновения дефектов и предложены способы их устранения. Особое внимание уделено газоциркуляционным покрытиям, качество которых зависит от исходной структуры и состава. Рассмотрены процессы формирования структуры и влияние ее характеристик на качество и долговечность покрытия.

Исследовано влияние состава лигатуры и остаточного давления воздуха в установке на эксплуатационные свойства и качество покрытий [10]. Описаны условия совместного нанесения хрома и алюминия на поверхность деталей, что позволяет заменить двухстадийный процесс осаждения элементов более экономичным одностадийным. Состав используемой лигатуры влияет на фазовый состав внешнего слоя покрытия. При соотношении хрома и алюминия в лигатуре 1:4 формируется γ' -фаза, которая обладает низкой жаростойкостью. Однако установлено, что хромоалитирование возможно при соотношении элементов 1:1, при котором во внешнем слое формируется жаростойкая β -фаза с оптимальным содержанием алюминия и хрома. Показано, что содержание хрома в исходной лигатуре влияет на толщину покрытия.

Отмечено, что остаточное давление газа в установке влияет на количество частиц Al_2O_3 в покрытии, которые являются концентраторами термических напряжений при эксплуатации охлаждаемых лопаток. Авторы анализируют влияние размера и формы частиц оксида алюминия на термические напряжения с использованием компьютерного моделирования и предлагают термодинамический расчет, подтверждающий возможность полного предотвращения образования оксида алюминия в покрытии при использовании никель-иттриевой лигатуры.

В работе [11] описаны результаты исследований структуры, фазового состава и реакционной зоны взаимодействия комплексных покрытий с монокристаллическими сплавами ЖС32-ВИ и ЖС36-ВИ. Изучено влияние комплексных защитных покрытий на свойства жаропрочных никелевых сплавов. Авторы подчеркивают необходимость применения защитных покрытий для монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, обладающих низкой жаростойкостью при высоких температурах эксплуатации. Благодаря сочетанию различных технологий, включая газоциркуляционную и ионно-плазменную, можно получить перспективные защитные покрытия для внутренних и внешних поверхностей рабочих лопаток ГТД с заданным ресурсом и требуемыми свойствами. Монокристаллические охлаждаемые турбинные лопатки имеют особое значение в обеспечении производительности и эффективности ГТД, однако в экстремальных условиях эксплуатации они подвержены значительному тепловому и механическому воздействию, что может привести к повреждению и сокращению их срока службы. Рассмотрены различные аспекты разработки комплексных защитных покрытий для монокристаллических охлаждаемых турбинных лопаток. Получено комплексное покрытие с хромоалюминиевым подслоем, нанесенным газоциркуляционным методом, которое повышает длительную прочность сплава ЖС36-ВИ до 30 %. Однако под покрытием образуется измененная зона, состоящая из игольчатой фазы, также известной как топологически плотноупакованная фаза, что приводит к резкому снижению длительной прочности после высокотемпературной выдержки.

Описаны модифицированные диффузионные покрытия на никелевых жаропрочных сплавах, полученные газоциркуляционным методом [12]. Автор работы проводит сравнительный анализ покрытий, нанесенных газоциркуляционным и порошковым методами. Приведены результаты исследования термостойкости, длительной прочности и механических свойств покрытий. Актуальной задачей данного исследования является повышение уровня физико-механических свойств поверхностей никелевых жаропрочных сплавов путем модифицирования диффузионных покрытий. Рассмотрены основные технологии получения покрытий – двухстадийное порошковое и циркуляционное хромоалитирование. При изучении структуры покрытий, полученных методом циркуляционного алитирования, обнаружены темные включения, представляющие собой

мелкодисперсные частицы оксида алюминия. На основе проведенных исследований автор делает вывод, что циркуляционное хромоалитирование является эффективным методом получения диффузионных покрытий на никелевых жаропрочных сплавах. Термостойкость покрытий, нанесенных газоциркуляционным и порошковым методами, составляет 530 и 415 циклов соответственно.

В патенте [13] предложен способ диффузионного хромоалитирования поверхности детали из металлов или сплавов. Автор сравнивает разработанный способ и метод одновременного насыщения детали несколькими диффундирующими элементами в циркулирующей галогенидной среде, которая образуется при контакте исходной газовой среды с источниками диффундирующих элементов. В качестве источников диффундирующих элементов обычно используют алюминий, хром и кремний. Однако полученное при одновременном насыщении детали покрытие содержит повышенное количество алюминия и недостаточно насыщено хромом, что снижает его ресурс. Преимуществом способа, реализуемого в патенте, является использование сплавов алюминия (FeAl, NiAl) в качестве навески для газоциркуляционного процесса, что позволяет достаточно эффективно контролировать активность алюминия и влияет на содержание хрома в покрытии. Предложенный способ позволяет реализовать одностадийный процесс диффузионного хромоалитирования, а также улучшить качество и эксплуатационные характеристики наносимого покрытия.

Разработан способ нанесения покрытия газоциркуляционным методом в специальных контейнерах, разделенных на зоны предварительного нагрева и осаждения [14]. Для получения хромоалитированного покрытия на поверхности подложки используют различные процессы осаждения. Слой хрома осаждается при термическом разложении гексакарбонила хрома, а слой алюминия получают путем термического разложения триметилалюминия. Для окончательного формирования покрытия проводится вакуумный отжиг при температуре 1050 °С. Изобретение позволяет улучшить качество покрытия и параметры эксплуатации ГТД.

В работе [15] рассмотрены способы нанесения диффузионных покрытий. При получении покрытия методом химического осаждения из газовой фазы происходят диссоциация и взаимодействие газовых реагентов в стимулирующей среде. Химическое осаждение включает гомогенные реакции, происходящие в газовой фазе, и гетерогенные реакции, протекающие на нагретой поверхности и приводящие к образованию пленок. При насыщении порошковым способом летучие газообразные реагенты синтезируются внутри порошка, в отличие от обычных путей образования пара при реализации газоциркуляционных методов. Материалы для нанесения обычно представляют собой порошковую смесь из чистого металла или сплава (например, Al, FeAl, Cr, Si в зависимости от вида покрытия), активатора в виде соли галогеноводородных кислот (например, NaCl, NaF, NH₄Cl) и инертного наполнителя (например, Al₂O₃). Оба метода имеют особенности, преимущества и ограничения. Выбор метода зависит от назначения покрытия и требований к нему. Важно учитывать такие факторы, как стоимость, сложность процесса, требования к покрытию, а также экологические и экономические аспекты. Автор подчеркивает, что газоциркуляционный метод является более эффективным способом нанесения диффузионных покрытий, равномерных по толщине, на сложные поверхности.

Несмотря на все преимущества, газоциркуляционный метод имеет существенный недостаток, поскольку не позволяет наносить покрытия на определенные поверхности деталей, не затронув участки, на которые нанесения покрытия не требуется (например, на замок рабочих лопаток турбины).

В изобретении [16] показан способ защиты участков поверхности детали перед нанесением покрытия. На определенные участки поверхности наносится защитный состав, который затем подвергается сушке. В качестве защитного состава используется паста, содержащая смесь порошков из активного и инертного компонентов, а также связующего вещества. Активный компонент (никель, железо, кобальт или сплавы на их основе) содержится в количестве до 80 % от общей массы смеси порошков, инертный компонент (оксид алюминия или смесь оксидов алюминия и магния) – от 20 до 95 %. В качестве связующего вещества используют состав, содержащий коллоксилин, амилацетат и диэтилоксалат. Такой подход значительно повышает эффективность защиты участков поверхности деталей перед нанесением покрытия. В частности, замки лопаток ГТД после нанесения покрытия остаются светлыми, поверхностный слой металла не изменяется.

В патенте [17] рассмотрен способ защиты поверхности турбинной лопатки от окисления при термической обработке, заключающийся в погружении детали или ее части в керамический порошок на основе огнеупорных оксидов с температурой плавления 1400–2800 °С и дисперсностью 0,01–17 мкм. Данный способ можно использовать не только для процессов горячего изостатического прессования, но и газоциркуляционных, чтобы предотвратить образование покрытия на отдельных участках поверхности.

В изобретении [18] рассмотрены способы оптимизации смесей, используемых для диффузионных методов нанесения покрытий. Предложена маскирующая смесь, которая формируется из порошков инертных компонентов, NiAl и связующего. Маскирующую смесь используют для защиты определенных поверхностей деталей от насыщения при диффузионных процессах. Авторами подобраны составы маскирующих смесей для разных сплавов. Показано, что защитный состав в процессе нанесения покрытия не должен взаимодействовать с поверхностью детали и газовой средой. После нанесения маскирующая смесь должна легко удаляться и не повреждать поверхность.

Заключения

Анализ рассмотренных источников научно-технической литературы показал, что основным методом нанесения диффузионных покрытий на внутреннюю полость турбинной лопатки является газоциркуляционный. Он обеспечивает равномерность наносимого покрытия по всей поверхности детали, однако имеет ряд недостатков, которые в настоящее время решаются с помощью технологических приемов.

Рассмотрены основные способы реализации газоциркуляционных процессов нанесения диффузионных покрытий. Показано превосходство покрытий, полученных данным способом, перед покрытиями, нанесенными порошковыми методами.

В настоящее время газоциркуляционные процессы нанесения покрытий на сложные внутренние полости деталей не имеют аналогов, однако существует проблема защиты отдельных участков поверхностей деталей, которая требует дальнейшего изучения.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // *Электротехнология*. 2022. № 1. С. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С., Дынин Н.В. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // *Электротехнология*. 2022. № 4. С. 15–25. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-4-15-25.

3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов // *Электрометаллургия*. 2022. № 5. С. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19.
4. Щетинина Н.Д., Кузнецова П.Е., Дынин Н.В., Селиванов А.А. Сплавы на основе алюминия с добавками скандия и циркония в аддитивном производстве (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
5. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
6. Неруш С.В., Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Тарасов С.А. Разработка технологии пайки деталей, полученных аддитивными технологиями, из металлопорошковой композиции на основе кобальта // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.
7. Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю., Воробьев Н.Н. Вопрос создания физических и математических моделей тепло- и массопереноса при изготовлении деталей методом аддитивных технологий (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
8. 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.
9. Хасанова Л.А., Древняк В.В., Жуков А.А., Саадатибаи М. Анализ дефектов защитных покрытий в процессе их нанесения // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2015. № 222. С. 207–212.
10. Симонов В.Н., Унчикова М.В., Пахомова С.А. Повышение качества хромоалитированных покрытий, полученных газодиффузионным методом // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2016. № 2. С. 134–145. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-134-145.
11. Лесников В.П., Кузнецов В.П., Конакова И.П., Мороз Е.В. Конструирование комплексных защитных покрытий для монокристаллических охлаждаемых турбинных лопаток современных ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2012. № 3 (34). С. 211–216.
12. Бахрунов К.К. Механические свойства покрытий на никелевых жаропрочных сплавах, полученных циркуляционным хромоалитированием // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2011. № 7. С. 63–68.
13. Способ диффузионного хромоалитирования поверхности детали: пат. 2270880 Рос. Федерация; заявл. 29.09.04; опубл. 27.02.06.
14. Способ нанесения двухкомпонентных хром-алюминиевых покрытий на внутренние полости охлаждаемых рабочих лопаток газовых турбин и устройство для осуществления способа: пат. 2520237 Рос. Федерация; заявл. 28.02.12; опубл. 20.06.14.
15. Peng X. *Metallic Coatings for high-temperature oxidation resistance // Thermal Barrier Coatings: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011, pp. 53–74. DOI: 10.1533/9780857090829.1.53.
16. Способ защиты участков поверхности детали: пат. 2232205 Рос. Федерация; заявл. 06.09.02; опубл. 10.07.04.
17. Способ защиты поверхности лопатки: пат. 2252110 Рос. Федерация; заявл. 09.10.03; опубл. 20.05.05.
18. Diffusion Coating Mixtures: pat. US 4617202; appl. 09.10.81; publ. 14.10.86.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Electrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S., Dynin N.V. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 3. Adaptation and creation of materials. *Electrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 15–25. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-4-15-25.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 4. Development of heat-resistant materials. *Electrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19.
4. Shchetinina N.D., Kuznetsova P.E., Dynin N.V., Selivanov A.A. Aluminum alloys with additions of Sc and Zr in additive manufacturing (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
5. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
6. Nerush S.V., Sviridov A.V., Afansiev-Khodykin A.N., Galushka I.A., Tarasov S.A. Development of brazing technology for parts obtained by additive technologies from cobalt based metal powder composition. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17.
7. Marakhovskij P.S., Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu., Vorobev N.N. On creation of physical and mathematical models of heat and mass transfer during manufacturing by additive technologies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
8. 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.
9. Khasanova L.A., Drevnyak V.V., Zhukov A.A., Saadatibai M. Analysis of defects in protective coatings during their application. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2015, no. 222, pp. 207–212.
10. Simonov V.N., Unchikova M.V., Pakhomova S.A. Improving the quality of chromo-alitized coatings obtained by the gas circulation method. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye*, 2016, no. 2, pp. 134–145. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-134-145.
11. Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P., Konakova I.P., Moroz E.V. Design of complex protective coatings for monocrystalline cooled turbine blades of modern gas turbine engines. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 3 (34), pp. 211–216.
12. Bakhrunov K.K. Mechanical properties of coatings on nickel heat-resistant alloys obtained by circulation chromium aluminizing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2011, no. 7, pp. 63–68.
13. *Method of diffusion chromoalutization of the surface of a part*: pat. 2270880 Rus. Federation; appl. 29.09.04; publ. 27.02.06.
14. *A method for applying two-component chromium-aluminum coatings to the internal cavities of cooled working blades of gas turbines and a device for implementing the method*: pat. 2520237 Rus. Federation; appl. 28.02.12; publ. 20.06.14.

15. Peng X. Metallic Coatings for high-temperature oxidation resistance. *Thermal Barrier Coatings: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011, pp. 53–74. DOI: 10.1533/9780857090829.1.53.
16. *Method of protecting parts of the surface of a part*: pat. 2232205 Rus. Federation; appl. 06.09.02; publ. 10.07.04.
17. *Method of protecting the surface of the blade*: pat. 2252110 Rus. Federation; appl. 09.10.03; publ. 20.05.05.
18. *Diffusion Coating Mixtures*: pat. US 4617202; appl. 09.10.81; publ. 14.10.86.

Информация об авторах

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

Стехов Павел Александрович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чесноков Дмитрий Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Pavel A. Stekhov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitriy V. Chesnokov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.01.2024.
The article was submitted 29.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 12.01.2024.