



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-1-1

**ВЫБОР ЖАРОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ  
ДЛЯ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО  
РЕНИЙ-РУТЕНИЙСОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВА  
МАРКИ ВЖМ4**

А.М. Гаямов

*кандидат технических наук*

С.А. Будиновский

*доктор технических наук*

С.А. Мубояджян

*доктор технических наук*

А.А. Косьмин

**Январь 2014**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

*А.М. Гаямов, С.А. Будиновский, С.А. Мубояджян, А.А. Косьмин*

## **ВЫБОР ЖАРОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО РЕНИЙ-РУТЕНИЙСОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВА МАРКИ ВЖМ4**

*Проведен выбор жаростойкого покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты изделий из рений-рутенийсодержащего жаропрочного никелевого сплава ВЖМ4 при рабочих температурах до 1150°C. Выполнены исследования изотермической и циклической жаростойкости композиций «сплав–покрытие», а также структуры после испытаний на жаростойкость. Полученные результаты показывают, что барьерный слой на основе сплава системы Ni–Cr–Al–Ta–Hf–Re–Y, содержащий частицы карбида тантала, эффективно подавляет процессы формирования вторичной реакционной зоны (ВРЗ). Применение жаростойких покрытий на сплаве ВЖМ4 позволяет уменьшить глубину проникновения коррозии в десятки раз.*

**Ключевые слова:** жаростойкие покрытия, ионно-плазменная технология, жаропрочные никелевые сплавы, вторичная реакционная зона, топологически плотноупакованные фазы.

*A.M. Gayatov, S.A. Budinovskiy, S.A. Muboyadzhyan, A.A. Kosmin*

## **SELECTION OF HEAT-RESISTANT COATING WITH METALLOCERAMIC BARRIER LAYER FOR PROTECTION OF Re-Ru-BEARING NICKEL-BASED SUPERALLOY VZhM4**

*Selection of heat-resistant coating with metalloceramic barrier layer for protection of details made of Re-Ru nickel-based superalloy operating at 1150°C is made. High-temperature tests of isothermic and cyclic heat-resistance and research of structure after these tests are made. Results show that the Ni–Cr–Al–Ta–Hf–Re–Y barrier layer containing tungsten carbide particles effectively suppresses forming of the secondary reaction zone. Heat-resistant coatings for Re-Ru superalloy reduce corrosion level up to a dozens of times.*

**Key words:** heat-resistant coatings, ion-plasma coatings, nickel-based superalloys, secondary reaction zone, topologically close packed phases.

Литейные жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС), легированные рением либо рением и рутением, являются наиболее перспективным конструкционным материалом для рабочих лопаток газотурбинных двигателей [1–3]. В ВИАМ разработана серия рений- и рений-рутенийсодержащих ЖНС, обладающих высокой конкурентоспособностью с зарубежными сплавами-аналогами фирм «General Electric», «Onera», «Cannon-Muskegon» и др. [4–6].

Данная работа посвящена выбору жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутенийсодержащего сплава ВЖМ4, обладающего высокими прочностными характеристиками при рабочих температурах до 1150°C. Для обеспечения длительного ресурса изделий из сплава ВЖМ4 в условиях высоких температур и интенсивных теплосмен необходима их защита жаростойкими покрытиями, предотвращающими при высоких эксплуатационных температурах разрушение металла вследствие окисления на границе с агрессивной средой [7–9]. Однако известно, что при нанесении покрытия на подложку из ЖНС, содержащего рений, в поверхностном слое такого сплава в условиях высоких температур формируется вторичная реакционная зона (ВРЗ). Данное структурное образование, возникающее вследствие высокотемпературной диффузии элементов через поверхность раздела «сплав–покрытие», состоит из пластинчатых топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз и ведет к деградации структуры ЖНС и его разупрочнению [10, 11]. Поэтому жаростойкое покрытие, предназначенное для защиты рений- либо рений-рутенийсодержащих ЖНС, должно содержать композиционный барьерный слой, замедляющий процессы высокотемпературной диффузии через поверхность раздела «сплав–покрытие» [12–15]

### **Материал и методы исследования**

Исследования проведены на образцах с монокристаллической структурой из жаропрочного никелевого сплава ВЖМ4. Для нанесения покрытий использовались жаростойкие сплавы для ионно-плазменных покрытий СДП-41 (Ni–Cr–Al–Ta–Hf–Re–Y), ВСДП-9 (Ni–Al–Cr–Ta–Y) и ВСДП-18 (Al–Ni–Cr–Y). Предполагалось, что содержание в сплавах СДП-41 и ВСДП-9 тантала в количестве 2–3% обеспечит формирование термостабильного барьерного слоя с частицами карбида тантала.

В работе исследовались покрытия систем СДП-41+ВСДП-18, [СДП-41+C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>]+СДП-41+ВСДП-18, ВСДП-9+ВСДП-18, [ВСДП-9+C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>]+ВСДП-9+ВСДП-18. Все покрытия получены на промышленной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) типа МАП-2 [16].

Композиционные барьерные слои [СДП-41+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] и [ВСДП-9+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] формировали при испарении в вакуумном дуговом разряде материала катодов из сплавов СДП-41 и ВСДП-9 соответственно. Процесс проводился при токе вакуумного дугового разряда, равном 700 А, потенциале смещения на изделиях: 50 В, и подаче в рабочую камеру установки ацетилена при давлении: 0,03–0,1 Па [14, 15]. Толщина барьерных слоев составляла 10 либо 20 мкм. После формирования барьерного слоя заданной толщины подачу ацетилена прекращали, и процесс нанесения покрытия продолжался в вакууме. После процесса напыления ионно-плазменных покрытий проводился высокотемпературный вакуумный отжиг (1050°С, 3 ч), необходимый для окончательного формирования фазового состава покрытия и релаксации напряжений. По окончании вакуумного отжига образцов с покрытиями произошел скол покрытия на базе сплава СДП-41 с барьерным слоем [СДП-41+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] толщиной 20 мкм, вследствие чего данное покрытие снято с испытаний и в дальнейшем не исследовалось.

Испытания на изотермическую жаростойкость проводились в соответствии с ГОСТ6130 на дисковых образцах (∅25 мм, *h*=3 мм) без покрытия и с покрытиями, в атмосферной печи в керамических тиглях с крышками при температуре испытаний 1150°С. Измерение массы образцов проводилось после 25, 50, 100, 200 и 500 ч испытаний.

Испытания на циклическую жаростойкость проводились в интервале температур от 200 до 1150°С. Цикл длительностью 1 ч включает: выдержку образцов в течение 50 мин при 1150°С и последующее охлаждение в течение 10 мин до температуры 200°С. Измерение массы образцов проводилось после 25, 50, 100, 200 и 500 циклов испытаний.

Удельное изменение массы образцов  $\Delta m_\tau$  (г/м<sup>2</sup>) после  $\tau$  часов испытаний рассчитывалось по формуле:

$$\Delta m_\tau = (m_\tau - m_0) / S, \quad (1)$$

где  $m_\tau$  – масса образца после  $\tau$  часов испытаний, г;  $m_0$  – масса образца в исходном состоянии, г;  $S$  – площадь поверхности образца в исходном состоянии, м<sup>2</sup>.

Глубина проникновения коррозии в сплав/покрытие  $h_\tau$  (мкм) после  $\tau$  часов испытаний рассчитывалась по формуле:

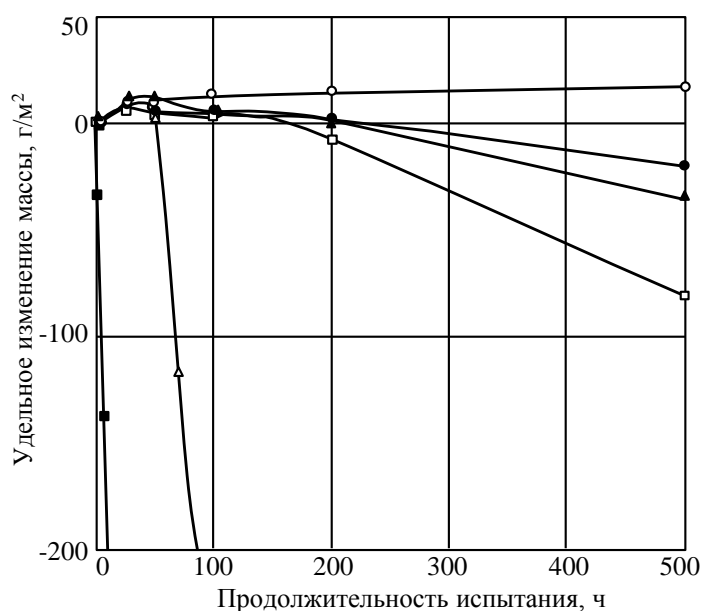
$$h_\tau = |\Delta m_\tau| / \rho \text{ (если } \Delta m_\tau > 0, h_\tau = 0), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность сплава/покрытия, г/см<sup>3</sup>.

Микроструктура композиции «сплав–покрытие» после испытаний на изотермическую и циклическую жаростойкость исследовалась на растровом электронном микроскопе JSM-840 при увеличении  $\times 200$ . Фазовый состав композиционных барьерных слоев в исходном состоянии исследовался методом рентгеноструктурного фазового анализа на дифрактометре ДРОН-3 с монохроматическим  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучением, диапазон сканирования в интервале углов  $2\theta$  составил 15–100 град.

### Результаты исследования и их обсуждение

Исследование фазового состава композиционных барьерных слоев в исходном состоянии показало наличие в слое  $[\text{СДП-41}+\text{C}_2\text{H}_2]$  карбида тантала ( $\text{TaC}$ ), а в слое  $[\text{ВСДП-9}+\text{C}_2\text{H}_2]$  – карбида хрома ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ). Основной фазой в этих барьерных слоях является  $\gamma'$ -фаза ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ).



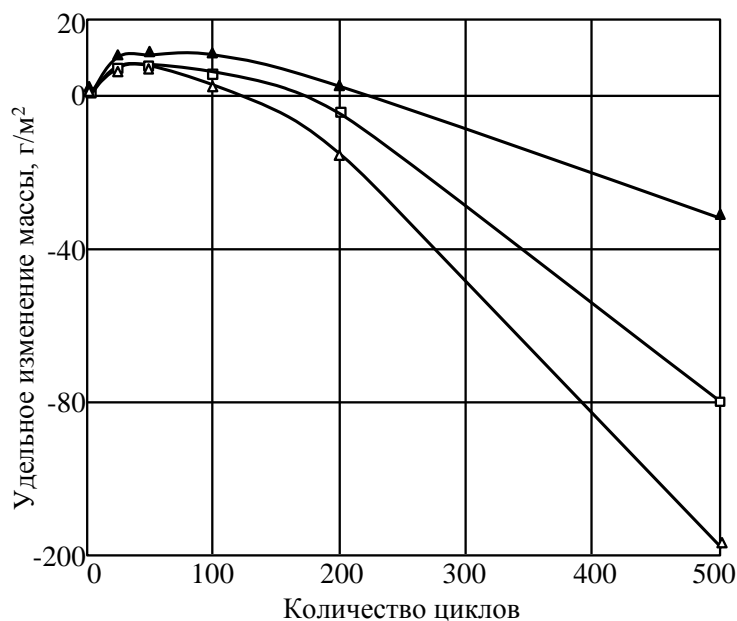


Рисунок 2. Зависимости удельного изменения массы образцов из сплава ВЖМ4 с покрытиями [СДП-41+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] (10 мкм)+СДП-41+ВДП18 (▲), [ВДП-9+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] (10 мкм)+ВДП-9+ВДП-18 (□), [ВДП-9+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] (20 мкм)+ВДП-9+ВДП-18 (Δ) и без покрытия от количества циклов испытания на циклическую жаростойкость в интервале температур 1150±200°С

Графики удельного изменения массы образцов из сплава ВЖМ4 с покрытиями и без покрытия в зависимости от продолжительности испытаний на изотермическую и циклическую жаростойкость приведены на рис. 1 и 2. Испытания на изотермическую жаростойкость проводились для всех вариантов покрытий, представленных в таблице, а также для сплава ВЖМ4 без покрытия. При испытаниях на циклическую жаростойкость рассматривались только покрытия с композиционными барьерными слоями, поскольку предполагалось, что в условиях частых теплосмен наличие металлокерамического барьерного слоя повышает величину остаточных термических напряжений в покрытии. Однако из графиков видно, что для образцов с покрытиями, содержащими барьерные слои толщиной 10 мкм, кривые удельного изменения массы в результате испытаний на изотермическую и циклическую жаростойкость отличаются незначительно. При этом для образцов с покрытием, содержащим барьерный слой толщиной 20 мкм, испытания в условиях многократного повторения часового цикла «нагрев–охлаждение» оказались заметно более «мягкими» в сравнении с испытаниями на изотермическую жаростойкость – удельные потери массы образцов с данным вариантом покрытия после 500 циклов испытаний составляют 117 г/м<sup>2</sup>, а после 500 ч испытаний на изотермическую жаростойкость: 332 г/м<sup>2</sup>. Последнее значение соответствует значительным удель-

ным потерям массы покрытия (около 60%). Таким образом, оба варианта жаростойкого покрытия с барьерным слоем толщиной 20 мкм (см. таблицу) непригодны для защиты изделий из сплава ВЖМ4 от высокотемпературной газовой коррозии, в то время как остальные варианты покрытия в композиции со сплавом ВЖМ4 характеризуются высокой жаростойкостью. Глубина проникновения коррозии в покрытие после 500 ч испытаний на изотермическую жаростойкость представлена в таблице. Для покрытий без барьерного слоя и с барьерным слоем толщиной 10 мкм данная величина составляет <12 мкм (для покрытия СДП-41+ВСДП-18: 0 мкм), а для сплава ВЖМ4 без покрытия: 334 мкм, т. е. 0,33 мм или 10% толщины всего образца.

**Глубина проникновения коррозии в сплав (покрытие)  $h_{500}$  после испытаний на изотермическую жаростойкость при 1150°C в течение 500 ч**

| Покрытие  | Глубина проникновения коррозии $h_{500}$ , мкм |
|---|--|
| СДП-41+ВСДП-18  | 0,00   |
| [СДП-41+С <sub>2</sub> Н <sub>2</sub> ] (10 мкм)+СДП-41+ВСДП-18 | 5,04   |
| ВСДП-9+ВСДП-18  | 2,81   |
| [ВСДП-9+С <sub>2</sub> Н <sub>2</sub> ] (10 мкм)+ВСДП-9+ВСДП-18 | 11,46  |
| Без покрытия  | 334,13   |

Результаты металлографических исследований образцов из сплава ВЖМ4 с покрытиями после испытаний на изотермическую жаростойкость при 1150°C в течение 500 ч приведены на рис. 3. Под покрытием ВСДП-9+ВСДП-18 обнаружена вторичная реакционная зона, включающая в себя частицы ТПУ фаз выраженной пластинчатой морфологии (см. рис. 3, в). Композиционный барьерный слой [ВСДП-9+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] толщиной 10 мкм способствует сокращению глубины ВРЗ (см. рис. 3, з). Под покрытием СДП-41+ВСДП-18 обнаружены отдельные выделения пластинчатых ТПУ фаз (см. рис. 3, а), барьерный слой [СДП-41+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] позволяет значительно уменьшить глубину залегания пластинчатых ТПУ фаз и практически полностью предотвратить их формирование в поверхностном слое сплава.

Таким образом, нанесение покрытия СДП-41+ВСДП-18 с барьерным слоем [СДП-41+С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>] толщиной 10 мкм позволяет полностью избежать формирования ВРЗ в поверхностном слое сплава ВЖМ4 при испытаниях на изотермическую жаростойкость. Аналогичные результаты получены при металлографических исследованиях образцов с покрытиями после испытаний на циклическую жаростойкость.

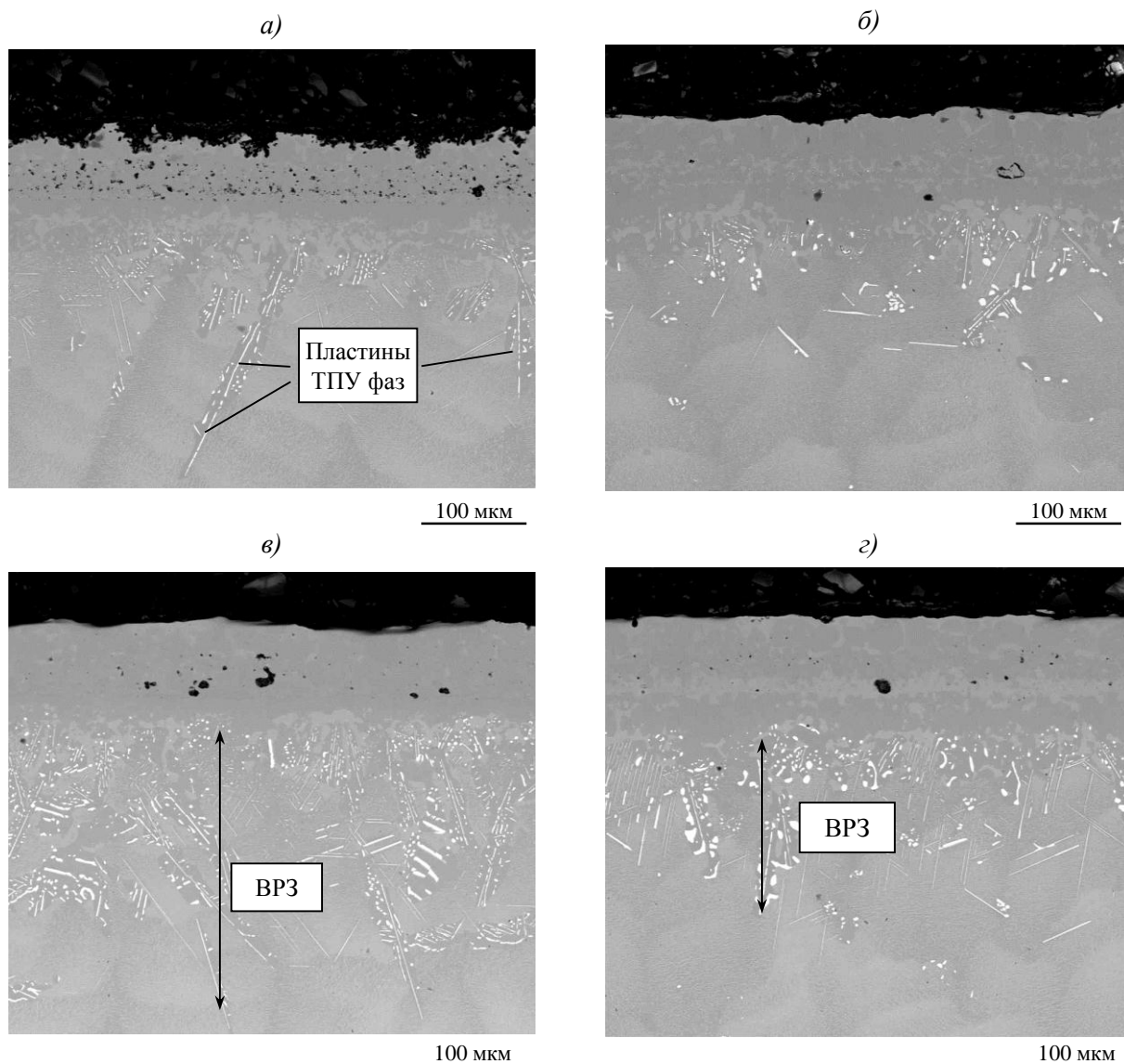


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 200$ ) образцов из сплава ВЖМ4 с покрытиями СДП-41+ВСДП-18 (а); [СДП-41+ $C_2H_2$ ](10 мкм)+СДП-41+ВСДП-18 (б); ВСДП-9+ВСДП-18 (в); [ВСДП-9+ $C_2H_2$ ](10 мкм)+СДП-41+ВСДП-18 (г) после испытаний на изотермическую жаростойкость в течение 500 ч

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- нанесение ионно-плазменных жаростойких покрытий на подложку из жаропрочного никелевого сплава ВЖМ4 обеспечивает снижение глубины высокотемпературной газовой коррозии в десятки раз;

- наименьшая глубина проникновения коррозии характерна для покрытий без композиционного барьерного слоя, однако в композициях с такими покрытиями активно протекают процессы формирования пластинчатых ТПУ фаз и вторичной реакционной зоны;

– наиболее эффективно подавляет процессы образования ВРЗ – барьерный слой [СДП-41 (Ni–Cr–Al–Ta–Hf–Re–Y)+C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>] толщиной 10 мкм, содержащий частицы карбида тантала и формируемый на поверхности раздела покрытия СДП-41+ВСДП-18 с подложкой из сплава ВЖМ4.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. №5. С. 36–52.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологии их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
4. Жаропрочный сплав на никелевой основе для монокристаллического литья: пат. 2439184 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.
5. Жаропрочный сплав на основе никеля: пат.2402624 Рос. Федерация; опубл. 16.06.2009.
6. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2365656 Рос. Федерация; опубл. 30.01.2008.
7. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
8. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 12–15.
9. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising gtes //Russian metallurgy (Metally). 2012. №1. С. 1–7.
10. Suzuki A., Rae C.M.F. Secondary reaction zone formations in coated Ni-base single crystal superalloys //Journal of Physics: Conference Series 2009. P. 165.
11. Suzuki A., Rae C.M.F., Hobbs R.A., Murakami H. Secondary reaction zone formations in Pt-Aluminised fourth generation Ni-base single crystal superalloys //Advanced Materials Research. 2011. V. 278. P. 78–83.

12. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17–20.
13. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Косьмин А.А. Жаростойкие ионно-плазменные покрытия для лопаток турбин из никелевых сплавов, легированных рением //МиТОМ. 2008. №6. С. 31–36.
14. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36ВИ //МиТОМ. 2011. №1. С. 34–40.
15. Гаямов А.М. Жаростойкое покрытие с композиционным барьерным слоем для защиты внешней поверхности рабочих лопаток ГТД из ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов /В сб. материалов XI Российской ежегодной конф. молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». М.: ИМЕТ РАН. 2012. С. 473–475.
16. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности //Труды ВИАМ. №1. 2013. Ст. 02 (viam-works.ru).

#### References list

1. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye liteynye garoproshnyye splavy novogo pokoleniya [Nickel heat-resistant casting alloys of new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 36–52.
2. Ospennikova O.G. Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley special'nogo naznacheniya, zashchitnykh pokrytiy [Development strategy of heat-resistant alloys and special-purpose steels, protective and thermal-protective coatings] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 19–36.
3. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
4. Zharoprochnyy splav na nikelevoy osnove dlya monokristallicheskogo lit'ya [Nickel-based heat-resistant alloy for single crystal casting]: pat. 2439184 Ros. Federatsiya; opubl. 05.10.2010.

5. Zharoprochnyy splav na osnove nikelya [Nickel-based heat-resistant alloy]: pat. 2402624 Ros. Federatsiya; opybl. 16.06.2009.
6. Zharoprochnyy liteynyy splav na osnove nikelya i izdelie, vypolnennye iz nego [Nickel-based heat-resistant alloy and a product made thereof]: pat. 2365656 Ros. Federatsiya; opybl. 30.01.2008.
7. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Zharostoykie i teplozashchitnye pokrytiya dlya lopatok turbiny vysokogo davleniya perspektivnykh GTD [Heat-resistant and thermal-protective coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTEs] //Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2012. №5. S. 60–70.
8. Matveev P.V., Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A., Kos'min A.A. Zashchitny zharostoykie pokrytiya slyva splavov na osnove intermetallidov nikelya [Protective heat-resistant coatings for alloys based on nickel intermetallic compounds] //Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2012. №2. S. 12–15.
9. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising gtes [Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTEs] //Russian metallurgy (Metally). 2012. №1. P. 1–7.
10. Suzuki A., Rae C.M.F. Secondary reaction zone formations in coated Ni-base single crystal superalloys [Secondary reaction zone formations in coated Ni-base single crystal superalloys] //Journal of Physics: Conference Series 2009. P. 165.
11. Suzuki A., Rae C.M.F., Hobbs R.A., Murakami H. Secondary reaction zone formations in Pt-Aluminised fourth generation Ni-base single crystal superalloys [Secondary reaction zone formations in Pt-Aluminised fourth generation Ni-base single crystal superalloys] //Advanced Materials Research. 2011. V. 278. P. 78–83.
12. Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A., Gayamov A.M., Matveev P.V. Vysokotemperaturnye zharostoykie pokrytiya i zharostoykie sloi dlya teplozashchitnykh pokrytiy [High-temperature heat-resistant coatings and heat-resistant layers for thermal-protective coatings] //Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2012. №1. S. 17–20.
13. Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A., Gayamov A.M., Kos'min A.A. Zharostoykie ionoplazmennyye pokrytiya dlya lopatok turbin iz nikelovykh splavov, legirovannykh reniem [Heat-resistant plasma-ion coatings for the turbine blades made of rhenium-alloyed nickel alloys] //MiTOM. 2008. №6. S. 31–36.
14. Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A., Gayamov A.M., Stepanova S.V. Ionoplazmennyye zharostoykie pokrytiya s kompozitsionnym bar'ernym sloem dlya zashchity ot

okisleniya splava ZhS36VI [Heat-resistant plasma-ion coatings with composite barrier layer for protection of ZhS36VI alloy from oxidation] //MiTOM. 2011. №1. S. 34–40.

15. Gayamov A.M. Zharostoykie pokrytiya s kompozitsionnym bar'ernym sloem dlya zashchity vneshney poverkhnosti rabochikh lopatok GTD iz reniysoderzhashchikh zharoprochnykh nikelovykh splavov [Heat-resistant coating with composite barrier layer to protect the outer surface of the GTE blades made of heat-resistant rhenium-bearing nickel alloys] /V sb. materialov XI Rossiyskoy ezhegodnoy konf. molodykh nauchnykh sotrudnikov i aspirantov „Fiziko-khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov”. M.: IMET RAN. 2012. S. 473–475.
16. Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Issledovanie vozmozhnosti povysheniya sluzhebnykh kharakteristik lopatok kompressora GTD metodom ionnogo modifitsirovaniya poverkhnosti [Study of possibility to improve the service performance of GTE compressor blades by the ionic-modification of surfaces] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 01 (viam-works.ru).