



УДК 629.7.023.224:629.7.03-226.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5

**РАЗРАБОТКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ
РАБОЧИХ И СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ИЗ
ЖАРОПРОЧНЫХ И ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ**

С.А. Будиновский

доктор технических наук

А.А. Смирнов

П.В. Матвеев

Д.А. Чубаров

Апрель 2015

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.

УДК 629.7.023.224:629.7.03-226.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5

С.А. Будиновский¹, А.А. Смирнов¹, П.В. Матвеев¹, Д.А. Чубаров¹

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РАБОЧИХ И СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ И ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ

Представлено комплексное теплозащитное покрытие (ТЗП) для рабочих лопаток ТВД из жаропрочного никелевого монокристаллического сплава ВЖМ4, работающих при температурах до 1200°C, а также рассмотрено применение высокотемпературных жаростойких покрытий в качестве соединительных слоев (ЖСС) ТЗП для сопловых лопаток ТВД из интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА, работающих при температурах до 1250°C. Приведены результаты высокотемпературных испытаний образцов из сплавов ВЖМ4 и ВКНА-25 с нанесенными ТЗП. Показано, что ТЗП состава $[Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf+Al-Ni-Y]+(Zr-Y-Gd)O$ обеспечивает защиту изделий из сплава ВЖМ4 при температуре 1150°C – до 500 ч, а ТЗП состава $[Ni-Cr-Al-Hf+A-[Ni-Hf]+(Zr-Y-Gd)O$ обеспечивает защиту изделий из интерметаллидных сплавов типа ВКНА при температуре 1250°C – до 100 ч. Приведены результаты исследования теплопроводности керамического слоя $(Zr-Y-Gd)O$.

Ключевые слова: *теплозащитные покрытия, жаростойкие покрытия, рабочие лопатки турбины, сопловые лопатки турбины, жаропрочные сплавы, интерметаллидные сплавы.*

S.A. Budinovskii, A.A. Smirnov, P.V. Matveev, D.A. Chubarov

DEVELOPMENT OF THERMAL BARRIER COATINGS FOR ROTOR AND NOZZLE TURBINE BLADES MADE OF NICKEL-BASE SUPER- AND INTERMETALLIC ALLOYS

The complex thermal barrier coating (TBC) for rotor blades of jet prop engines made of nickel-base superalloy VZHM4 working at temperatures up to 1200°C is represented, and also application of high-temperature heat resistant coatings for intermetallic nickel-base alloys as a bond coatings for turbine nozzle blades working at temperatures up to 1250°C is considered.

Results of high-temperature tests of VZhM4 and VKNA-25 alloys with applied TBC are represented. It is shown that $[Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf+Al-Ni-Y]+(Zr-Y-Gd)O$ TBC protects VZhM4 alloy at temperatures up to 1200°C and $[Ni-Cr-Al-Hf+Al-Ni-Hf]+(Zr-Y-Gd)O$ HPC protects VKNA-25 alloy at temperatures up to 1250°C. Research of thermal conductivity of ceramic $(Zr-Y-Gd)O$ material is made.

Keywords: *thermal barrier coatings (TBC), heat-resistant coating, turbine rotor blades, turbine nozzle blades, Ni-based superalloys, Ni-based intermetallic alloys.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Развитие отечественной авиационной промышленности требует разработки и внедрения новых материалов – безуглеродистых жаропрочных и интерметаллидных никелевых сплавов для литья охлаждаемых рабочих и сопловых лопаток турбины. В связи с этим в ВИАМ с применением метода компьютерного моделирования разработаны жаропрочный никелевый монокристаллический сплав IV поколения ВЖМ4 для литья охлаждаемых лопаток ТВД с рабочей температурой до 1150°C и интерметаллидные сплавы типа ВКНА для сопловых лопаток с рабочей температурой до 1200°C [1–5]. Однако для обеспечения длительного ресурса работы деталей турбины в условиях интенсивных теплосмен необходима их защита специальными покрытиями, предотвращающими разрушение поверхности пера лопаток в продуктах горения авиационного топлива при высоких эксплуатационных температурах [6–9].

Материалы и методы

Исследование теплозащитного покрытия для рабочих лопаток турбины из жаропрочного никелевого сплава ВЖМ4

Для защиты рабочих лопаток ТВД от высокотемпературной газовой коррозии в перспективных самолетных, вертолетных и наземных ГТД применяются теплозащитные покрытия (ТЗП), обеспечивающие работоспособность и повышение энергоэффективности благодаря внешнему керамическому слою покрытия, который позволяет снизить температуру газа на поверхности охлаждаемой лопатки до 100°C. Схема конструкции ТЗП, разработанного в ВИАМ для охлаждаемых лопаток турбины перспективных ГТД, представлена на рис. 1.

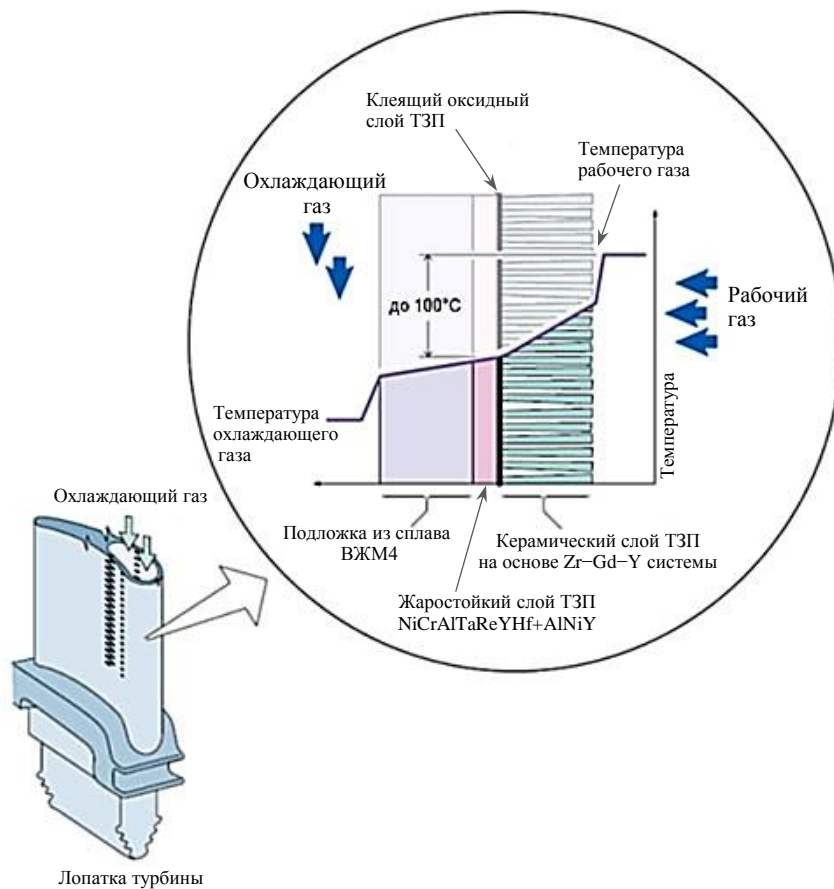


Рис. 1. Конструкция комплексного теплозащитного покрытия





Теплозащитное покрытие состоит из внутреннего металлического жаростойкого слоя и внешнего керамического слоя. Жаростойкий слой является конденсационно-диффузионным покрытием, осаждаемым на ионно-плазменной установке МАП-2 в вакууме путем конденсации на подложку (лопатку) материала из плазменных потоков, генерируемых на катоде. Внутренний жаростойкий слой (ЖСС) наносят в три этапа: на первом этапе наносят слой покрытия на основе никелевого сплава системы Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf, на втором – слой покрытия на основе алюминиевого сплава системы Al-Ni-Y, на третьем этапе – проводят вакуумный отжиг полученных слоев при температуре 1050°C в течение 3 ч для формирования β-фазы (NiAl) с повышенным содержанием Al в поверхностном слое жаростойкого покрытия, обеспечивающим при легировании Hf высокую стойкость к окислению при высоких температурах. Гафний эффективно повышает жаростойкость алюминидных покрытий в области температур до 1200°C.

Керамический слой, состоящий из оксидов редкоземельных металлов с низким коэффициентом теплопроводности, наносят после формирования жаростойкого слоя ТЗП в среде кислорода и аргона на установке УОКС-2 на базе магнетронных распылителей повышенной частоты из мишеней, изготовленных на основе циркониевого сплава. Материалом керамического слоя ТЗП является соединение на основе системы Zr–Gd–Y [10–17].

Результаты

В таблице представлены результаты испытаний на изотермическую жаростойкость в закрытых керамических тиглях в спокойной атмосфере печи (на воздухе) при температурах 1150 и 1200°C на базе 500 и 100 ч соответственно.

Внешний вид и удельное изменение массы образцов из сплава ВЖМ4 после испытаний на изотермическую жаростойкость

Покрытие	Условия испытаний	Удельное изменение массы образцов, г/м ²	Внешний вид образцов
Без покрытия	1150°C, 500 ч	-2694	
	1200°C, 100 ч	-1418	
С покрытием*	1150°C, 500 ч	-49,4	
	1200°C, 100 ч	-52,1	

*Покрытие системы [Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y] (80–100 мкм) + (Zr–Gd–Y)O (до 100 мкм).

В результате испытаний на изотермическую жаростойкость образцов из сплава ВЖМ4 с ТЗП выявлено, что внешний керамический слой не имеет отслоений, сколов или вздутий. По результатам рентгенофазового анализа в образцах в исходном виде и после испытаний установлено, что основной фазой в покрытии является тетрагональный оксид на основе системы Zr–Gd–Y, обеспечивающий стойкость к спеканию и дли-

тельную работоспособность керамического слоя при высоких температурах, с кратковременными забросами до 1200°C.

В результате исследований микроструктур образцов из сплава ВЖМ4 с ТЗП методом растровой электронной микроскопии установлено, что в исходном виде керамический слой имеет характерную столбчатую структуру (рис. 2, б).

Под керамическим слоем находится тонкий оксидный клеящий слой (TGO – thermally grown oxide) на основе оксида алюминия толщиной 3 ± 1 мкм. На микроструктурах этот слой четко выделяется в виде тонкой прослойки между керамическим и жаростойким слоями (см. рис. 2, а, б). Внутренний ЖСС имеет характерное двухзонное строение, верхний слой которого состоит из β -фазы (NiAl) и обеспечивает защиту основы сплава от окисления (см. рис. 2, а). Образец из сплава ВЖМ4 с покрытием состава [Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y]+(Zr–Gd–Y)O после испытаний имеет вторичную реакционную зону (ВРЗ) толщиной 300 мкм, в которой присутствуют иглы ТПУ фаз (см. рис. 2, в). Керамический слой ТЗП после испытаний имеет трещины в структуре покрытия, что вызвано накоплением напряжений в результате окисления поверхности жаростойкого покрытия, поскольку керамический слой из-за своей пористости пропускает кислород и продукты окисления накапливаются между жаростойким и керамическим слоями (см. рис. 2, в, г). Толщина данного оксидного слоя после испытаний на изотермическую жаростойкость составляет 14 ± 3 мкм (см. рис. 2, г).

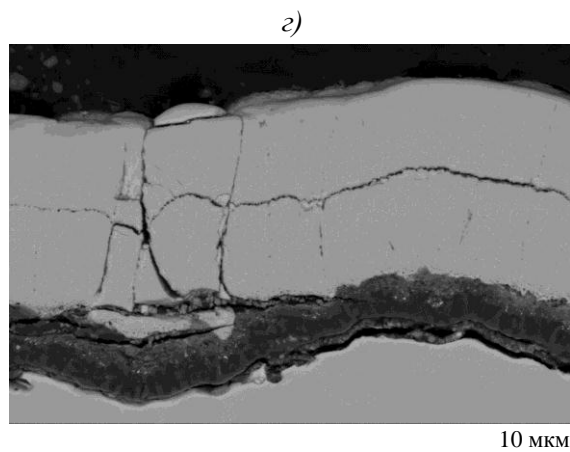
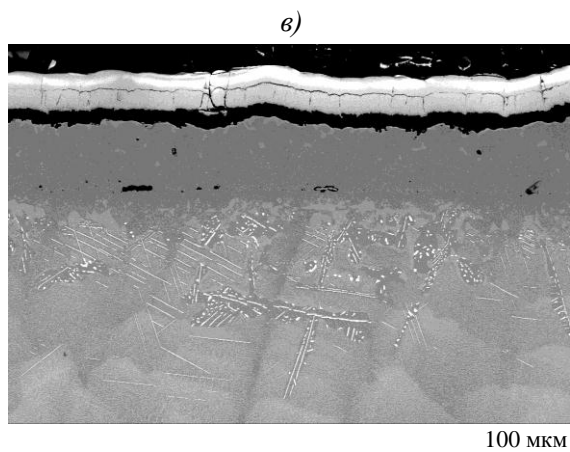
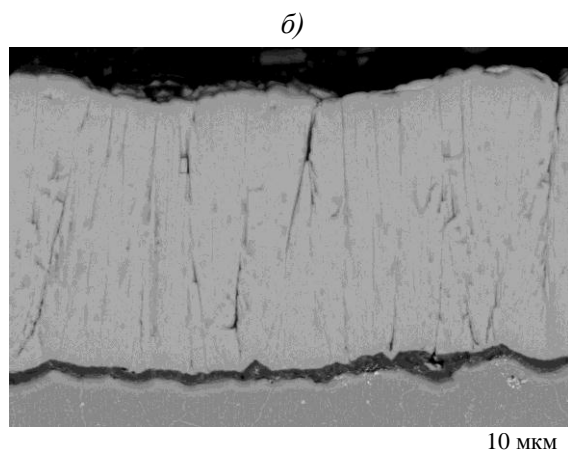
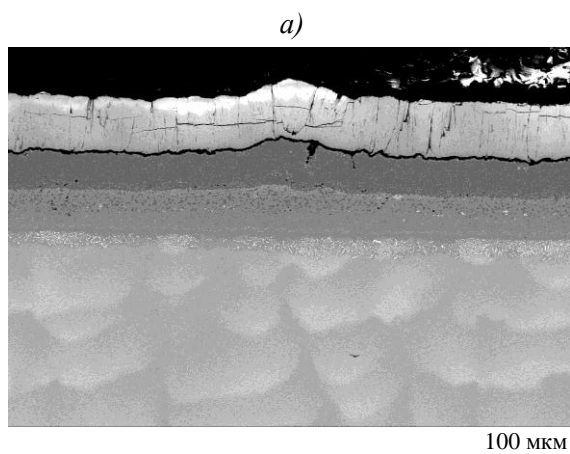


Рис. 2. Микроструктуры образцов из сплава ВЖМ4 с теплозащитным покрытием состава $[\text{Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf+Al-Ni-Y}]+(\text{Zr-Gd-Y})\text{O}$:

а, б – в исходном состоянии; *в, г* – после испытаний при 1150°C в течение 500 ч

Разработка теплозащитного покрытия для сопловых лопаток турбины из интерметаллидных сплавов типа ВКНА

Особенность разработки ТЗП для интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА заключается в повышенной рабочей температуре покрытия. Это связано с прогнозируемым применением данных сплавов при температурах свыше 1200°C в перспективных ГТД. В ВИАМ разработаны жаростойкие покрытия, способные защищать интерметаллидные сплавы типа ВКНА от разрушения при температурах до 1300°C – это покрытия систем $[\text{Ni-Cr-Al-Hf+Al-Ni-Y}]$ и $[\text{Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf+Al-Ni-Y}]$, отличающиеся пониженным содержанием хрома [18–22]. Такие покрытия могут быть использованы в качестве ЖСС по двум причинам:

- способность защищать изделие из интерметаллидного сплава в случае скола керамического слоя ТЗП;

- сравнительно низкое (не более 11% (по массе)) содержание хрома, приводящее к снижению температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) ЖСС, что увеличивает термостойкость покрытия.

По данным, полученным из литературных источников, известно, что одними из наиболее широко применяющихся за рубежом подслоев являются платино-алюминидные покрытия, которые представляют собой β -фазу (NiAl) состава, близкого к стехиометрическому, легированную платиной. Известно также, что β -фаза стехиометрического состава имеет температурный коэффициент линейного расширения, наиболее близкий к ТКЛР керамических материалов среди алюминидов никеля.

Однако в случае покрытия состава $[\text{Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf+Al-Ni-Y}]$ повышенные рабочие температуры могут привести к интенсивному обеднению алюминием β -фазы внешнего слоя ЖСС, а также к диффузии тугоплавких элементов, содержащихся в никелевом конденсированном слое ЖСС, в приповерхностные слои покрытия. Появление тугоплавких элементов во внешнем слое ЖСС ведет к увеличению скорости роста и снижению прочностных характеристик оксидного слоя (ТГО), формирующегося на поверхности ЖСС в процессе высокотемпературной выдержки, что, в свою очередь, приводит к значительному снижению термостойкости ТЗП. Микроструктура и микроанализ образцов из сплавов типа ВКНА с ТЗП после высокотемпературных ис-

пытаний представлены на рис. 3, на котором видны характер разрушения слоя TGO и результаты микрорентгеноспектрального анализа приповерхностного слоя ЖСС состава [Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y].

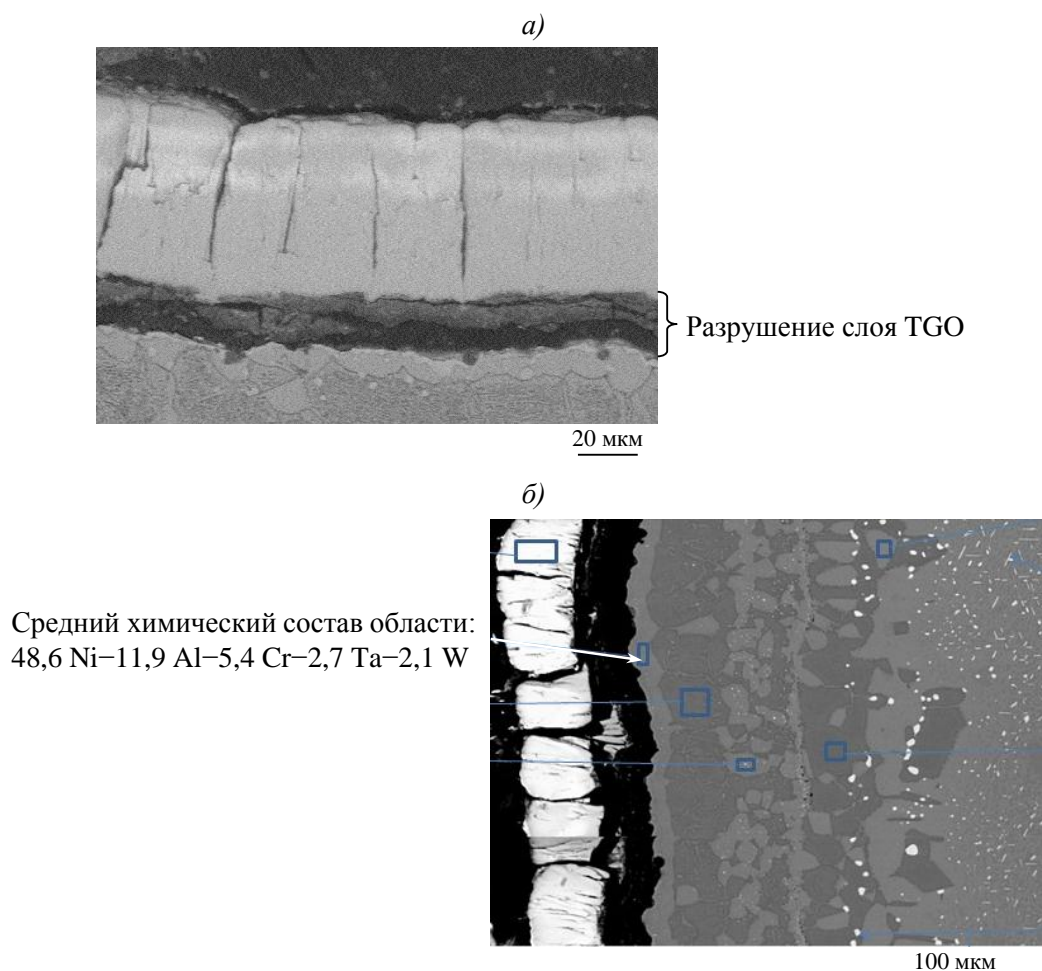


Рис. 3. Микроструктура (а – $\times 700$) и результаты рентгеноспектрального микроанализа (б) образцов из сплавов типа ВКНА с теплозащитным покрытием с жаростойким подслоем состава [Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y] после 50 циклов испытаний при 1200°C

Таким образом, в качестве базового ЖСС выбрано покрытие состава [Ni–Cr–Al–Hf+Al–Ni–Y]. Однако испытания ТЗП с таким подслоем при температуре 1250°C показали достаточно низкую термостойкость – не более 50 циклов испытаний по режиму: выдержка при 1250°C в течение 45 мин с последующим охлаждением на воздухе в течение 15 мин. Для повышения термостойкости ТЗП проведена оптимизация ЖСС, которая заключалась в повышении:

- содержания алюминия во внешнем слое ЖСС;
- плотности слоя TGO и его адгезии к ЖСС.

Для обогащения внешнего слоя ЖСС алюминием разработана технология двойного алитирования, позволяющая увеличить его содержание до 35%. Для оптимизации свойств защитной оксидной пленки проведено легирование ЖСС гафнием (экспериментальный состав слоя Al–Ni–Hf).

Оптимизация ТЗП позволила более чем в два раза повысить его термостойкость при температуре испытаний 1250°C, которая составила 100 циклов.

Результаты высокотемпературных циклических испытаний ТЗП с различными ЖСС приведены на рис. 4. Видно преимущество использования материала на никелевой основе системы Ni–Cr–Al–Hf, не содержащего тугоплавких легирующих элементов, а также преимущество дополнительного легирования ЖСС гафнием.

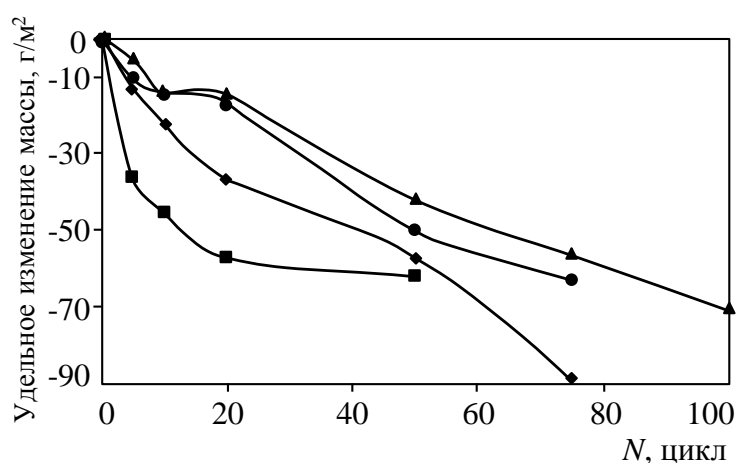


Рис. 4. Результаты циклических испытаний на жаростойкость образцов из сплава ВКНА-25 при температуре 1250±200°C с теплозащитным покрытием состава:

■ – [Ni–Cr–Al–Y–Ta–Re–Hf+Al–Ni–Y]+(Zr–Y–Gd)O; ● – [Ni–Cr–Al–Hf+Al–Ni–Y]+(Zr–Y–Gd)O; ◆ – [Ni–Cr–Al–Y–Ta–Re–Hf+Al–Ni–Hf]+(Zr–Y–Gd)O; ▲ – [Ni–Cr–Al–Hf+Al–Ni–Hf]+(Zr–Y–Gd)O

Важнейшим свойством ТЗП, определяющим эффективность его применения на рабочих и сопловых лопатках турбин, является теплопроводность, определяющая уровень теплозащитного эффекта и долговечность керамического слоя, а также время, в течение которого покрытие будет выполнять свои теплозащитные функции. Для определения количественного значения данного параметра проведены измерения теплопроводности керамического слоя ТЗП в диапазоне температур от 20 до 1250°C: $\lambda_{ср}=1,1$ Вт/(м·К) – для керамического слоя ТЗП на основе системы Zr–Gd–Y для охлаждаемых рабочих и сопловых лопаток ТВД.

Обсуждение и заключения

Для эффективной защиты охлаждаемых изделий турбины разработаны конденсационно-диффузионные ионно-плазменные жаростойкие покрытия на основе систем [Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y] – для изделий из сплава ВЖМ4 и [Ni–Cr–Al–Hf+Al–Ni–Hf] – для изделий из сплавов типа ВКНА, обладающие высокими защитными жаростойкими характеристиками в области рабочих температур: до 1200°C – для сплава ВЖМ4 и до 1250°C – для сплавов типа ВКНА, которые могут быть использованы в качестве ЖСС в системе ТЗП.

Проведены высокотемпературные испытания систем ТЗП с выбранными составами ЖСС и керамическим слоем системы Zr–Gd–Y.

По результатам испытаний видно, что ТЗП состава [Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf+Al–Ni–Y]+(Zr–Y–Gd)O обеспечивает защиту изделий из сплава ВЖМ4 при температурах 1150 и 1200°C до 500 и 100 ч соответственно, а ТЗП состава [Ni–Cr–Al–Hf+Al–Ni–Hf]+(Zr–Y–Gd)O обеспечивает защиту изделий из интерметаллидных сплавов типа ВКНА при температуре 1250°C до 100 ч.

Керамический слой ТЗП на основе системы Zr–Gd–Y обладает низким коэффициентом теплопроводности и обеспечивает снижение рабочей температуры на поверхности рабочих и сопловых лопаток из современных никелевых жаропрочных и интерметаллидных сплавов.

Разработанные ТЗП могут быть рекомендованы к использованию для защиты охлаждаемых рабочих и сопловых лопаток ТВД современных самолетных, вертолетных и наземных ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Висик Е.М. и др. Жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности //Литейное производство. 2012. №6. С. 5–11.
2. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Конакова И.П., Петрушин Н.В., Мубояджян С.А. Структура и фазовый состав монокристаллического сплава ВЖМ4 с газоциркуляционным защитным покрытием //МиТОМ. 2011. №3. С. 28–32.
3. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 57–60.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.

5. Будиновский С.А. Применение аналитической модели определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе в решении задач по созданию жаростойких алюминидных покрытий //Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №3. С. 3–11.
6. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 26–37.
7. Смирнов А.А., Будиновский С.А. Анализ эволюции нормальных напряжений в системе «сплав–покрытие» в области температур до 1200°C //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 8–14.
8. Будиновский С.А., Матвеев П.В., Смирнов А.А. Исследование жаростойкости литейных жаропрочных никелевых сплавов в области температур 1000–1200°C //Авиационная промышленность. 2014. №2. С. 48–52.
9. 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 ЖС36-ВИ //МиТОМ. 2011. №1. С. 34–40.
10. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 3–8.
11. 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.
12. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 60–70.
13. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 43–46.
14. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М. Современное состояние и основные тенденции развития высокотемпературных теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД //Авиационная промышленность. 2008. №4. С. 33–37.
15. Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутенийсодержащего сплава марки ВЖМ4 //Труды ВИАМ. 2014. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
16. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Разработка ионно-плазменных жаростойких металлических слоев теплозащитных покрытий для охлаждаемых рабочих лопаток турбин //МиТОМ. 2013. №11. С. 16–21.

17. Косьмин А.А., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Булавинцева Е.Е. Жаростойкое покрытие для нового перспективного интерметаллидного сплава ВИНЗ //Сварочное производство. 2013. №6. С. 35–37.
18. 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.
19. 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.
20. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
21. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //Металловедение и термическая обработка металлов. 1995. №2. С. 15–18.
22. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Конверсия в машиностроении. 1999. №2. С. 42–47.

REFERENCES LIST

1. Petrushin N.B., Ospennikova O.G., Visik E.M. i dr. Zharoprochnye nikelovye splavy nizkoj plotnosti [Heat resisting nickel alloys of low density] //Litejnoe proizvodstvo. 2012. №6. S. 5–11.
2. Kuznecov V.P., Lesnikov V.P., Konakova I.P., Petrushin N.V., Mubojadzhyan S.A. Struktura i fazovyy sostav monokristallicheskogo splava VZhM4 s gazocirkuljacionnym zashhitnym pokrytiem [Structure and phase composition of VZhM4 single-crystal alloy with gazotsirkulyatsionny protecting cover] //MiTOM. 2011. №3. S. 28–32.
3. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat resisting cast intermetallidny alloys] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. S. 57–60.
4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokoteplonagruzhennyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Materials for the high-heatloaded details of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
5. Budinovskij S.A. Primenenie analiticheskoj modeli opredelenija uprugih mehanicheskikh i termicheskikh naprjazhenij v mnogoslojnoj sisteme v reshenii zadach po sozdaniju zharostojkikh aljuminidnyh pokrytij [Application of analytical model of determination of elastic mechanical and thermal stresses in multi-layer system in the solution of tasks on creation of heat resisting aluminidny coverings] //Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. 2013. №3. S. 3–11.
6. Budinovskij S.A., Kablov E.N., Mubojadzhyan S.A. Primenenie analiticheskoj modeli opredelenija uprugih naprjazhenij v mnogoslojnoj sisteme pri reshenii zadach po sozdaniju vysokotemperaturnykh pokrytij [Application of analytical model of determination of elastic mechanical and thermal stresses in multi-layer system in the solution of tasks on creation of high-temperature resistant coatings] //Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. 2013. №3. S. 12–15.

- turnyh zharostojkih pokrytij dlja rabochih lopatok aviacionnyh turbin [Application of analytical model of determination of elastic stresses in multi-layer system at the solution of tasks on creation of high-temperature heat resisting coverings for working blades of aviation turbines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 26–37.
7. Smirnov A.A., Budinovskij S.A. Analiz jevoljucii normal'nyh naprjazhenij v sisteme «splav–pokrytie» v oblasti temperatur do 1200°C [The analysis of evolution of normal stresses in splav–pokrytiye system in the field of temperatures to 1200°C] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 8–14.
 8. Budinovskij S.A., Matveev P.V., Smirnov A.A. Issledovanie zharostojkosti litejnyh zharoprochnyh nikelovyh splavov v oblasti temperatur 1000–1200°C [Research of heat resistance of cast heat resisting nickel alloys in the field of temperatures 1000–1200°C] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2014. №2. S. 48–52.
 9. Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Gajamov A.M., Stepanova S.V. Ionno-plazmennye zharostojkie pokrytija s kompozicionnym bar'ernym sloem dlja zashhity ot okislenija splava ZhS36-VI [Ion-plasma heat resisting coverings with composition barrier layer for protection against oxidation of alloy ZhS36-VI] //MiTOM. 2011. №1. S. 34–40.
 10. Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Smirnov A.A. Poluchenie keramicheskikh teplozashhitnyh pokrytij dlja rabochih lopatok turbin aviacionnyh GTD magnetronnym metodom [Receiving ceramic heat-protective coatings for working blades of turbines of aviation GTD magnetronny method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 3–8.
 11. Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Matveev P.V. Vysokotemperaturnye zharostojkie pokrytija i zharostojkie sloi dlja teplozashhitnyh pokrytij [High-temperature heat resisting coverings and heat resisting layers for heat-protective coverings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 17–20.
 12. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat resisting and heat-protective coverings for turbine blades of high pressure of perspective GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 60–70.
 13. Chubarov D.A., Matveev P.V. Novye keramicheskie materialy dlja teplozashhitnyh pokrytij rabochih lopatok GTD [New ceramic materials for heat-protective coverings of working blades of GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 43–46.
 14. Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Gajamov A.M. Sovremennoe sostojanie i osnovnye tendencii razvitija vysokotemperaturnyh teplozashhitnyh pokrytij dlja rabochih lopatok turbin aviacionnyh GTD [Current state and the main tendencies of development of high-temperature heat-protective coverings for working blades of turbines of aviation GTD] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2008. №4. S. 33–37.

15. Gajamov A.M., Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Kos'min A.A. Vybor zharostojkogo pokrytija dlja zharoprochnogo nikelvogo renij-rutenijsoderzhashhego splava marki VZhM4 [Choice of heat resisting covering for heat resisting nickel reny-ruteniysoderzhashchy alloy of the VZhM4 brand] //Trudy VIAM. 2014. №1. St. 01 (viam-works.ru).
16. Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Gajamov A.M., Matveev P.V. Razrabotka ionno-plazmennyyh zharostojkih metallicheskih sloev teplozashhitnyh pokrytij dlja ohlazhdaemyh rabochih lopatok turbin [Development of ion-plasma heat resisting metal layers of heat-protective coverings for cooled working blades of turbines] //MiTOM. 2013. №11. S. 16–21.
17. Kos'min A.A., Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Bulavinceva E.E. Zharostojkoe pokrytie dlja novogo perspektivnogo intermetallidnogo splava VIN3 [Heat resisting covering for new perspective intermetallidny alloy of VIN3] //Svarochnoe proizvodstvo. 2013. №6. S. 35–37.
18. Matveev P.V., Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Kos'min A.A. Zashhitnye zharostojkie pokrytija dlja splavov na osnove intermetallidov nikelja [Protective heat resisting coverings for alloys on the basis of nickel intermetallic compound] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 12–15.
19. Matveev P.V., Budinovskij S.A. Issledovanie svojstv zashhitnyh zharostojkih pokrytij dlja intermetallidnyh nikelvyh splavov tipa VKNA dlja rabochih temperatur do 1300°C [Research of properties of protective heat resisting coverings for intermetallidny nickel alloys of VKNA type for working temperatures to 1300°C] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №3. S. 22–26.
20. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Lucenko A.N. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinnyyh dvigatelej [Ion-plasma protecting covers for blades of gas turbine engines] //Metally. 2007. №5. S. 23–34.
21. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //MiTOM. 1995. №2. S. 15–18.
22. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Pomelov Ja.A. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinnyyh dvigatelej [Ion-plasma protecting covers for blades of gas turbine engines] //Konversija v mashinostroenii. 1999. №2. S. 42–47.