

УДК 629.7.023.222

А.А. Смирнов¹, С.А. Будиновский¹, П.В. Матвеев¹, Д.А. Чубаров¹**РАЗРАБОТКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЛОПАТОК ТВД ИЗ НИКЕЛЕВЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ВЖМ4, ВЖМ5У**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-17-24

Проведены исследования изотермической жаростойкости образцов из никелевых монокристаллических сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У для лопаток турбины высокого давления (ТВД) с теплозащитными покрытиями (ТЗП) при температурах 1200 и 1150°C на базе испытаний 100 и 500 ч. Приведены результаты металлографических исследований образцов.

Ключевые слова: теплозащитные покрытия, ионно-плазменная технология, магнетронное распыление, жаростойкость, защита жаропрочных сплавов, покрытия для лопаток турбины.

Investigations of isothermal heat resistance of single-crystal nickel alloys VZHM4, VZHM5U samples for high-pressure turbine blades with thermal barrier coatings at temperatures 1200 and 1150°C on the basis of 100 and 500 hours are undertaken. The results of metallographic examinations of samples are provided.

Keywords: thermal barrier coatings, ion-plasma technology, magnetron sputtering, heat resistance, protection of high-temperature alloys, coatings for turbine blades.

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

Модернизация и развитие отечественной авиационной промышленности требуют разработки и внедрения безуглеродистых жаропрочных никелевых сплавов для литья лопаток турбин с монокристаллической структурой. В связи с этим в ВИАМ с помощью метода компьютерного моделирования разработаны жаропрочные никелевые сплавы 4-го поколения ВЖМ4 и ВЖМ5 для литья лопаток перспективных авиационных турбин. Новые сплавы по характеристикам длительной прочности и плотности не уступают сплавам аналогичного назначения, разработанным в США (EPM-102, фирма General Electric) и Франции (MC-NG, фирма ONERA), и обеспечивают при существующих температурно-силовых режимах увеличение в 4–6 раз ресурса работы лопаток или повышение на 50–60°C рабочей температуры турбин [1–4]. Однако для обеспечения длительного ресурса работы рабочих лопаток турбины в условиях интенсивных теплосмен необходима их защита специальными покрытиями, предотвращающими разрушение поверхности пера лопатки в продуктах горения авиационного топлива при высоких эксплуатационных температурах до 1200°C [5–10]. В настоящее время отсутствуют систематические исследования теплозащитных покрытий (ТЗП) для монокристаллических сплавов типа ВЖМ, содержащих рений и рутений. За рубежом для защиты деталей турбин при рабочих температурах до 1100–1150°C применяют многослойные покрытия PWA286 (фирма Pratt & Whitney Company), RT31 и MDC-150 (фирма Chromalloy Research Corp.). Исследование теплозащитных покрытий для монокристал-

лических рабочих лопаток из сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У при рабочих температурах до 1150–1200°C является актуальной задачей в связи с разработкой новых авиационных ГТД предприятиями отрасли.

Материалы и методы

Исследования проводили на цилиндрических образцах с монокристаллической структурой из жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У. Конструкция теплозащитного покрытия представлена на рис. 1. В качестве жаростойкого слоя ТЗП использовали экспериментальные и серийные сплавы, применяемые для изготовления ионно-плазменных покрытий: СДП-41 (Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf); ВСДП-4 (Ni–Al–Cr–Hf); ВСДП-3 (Ni–Cr–Al–Re–Y–Hf); ВСДП-16 (Al–Ni–Y).

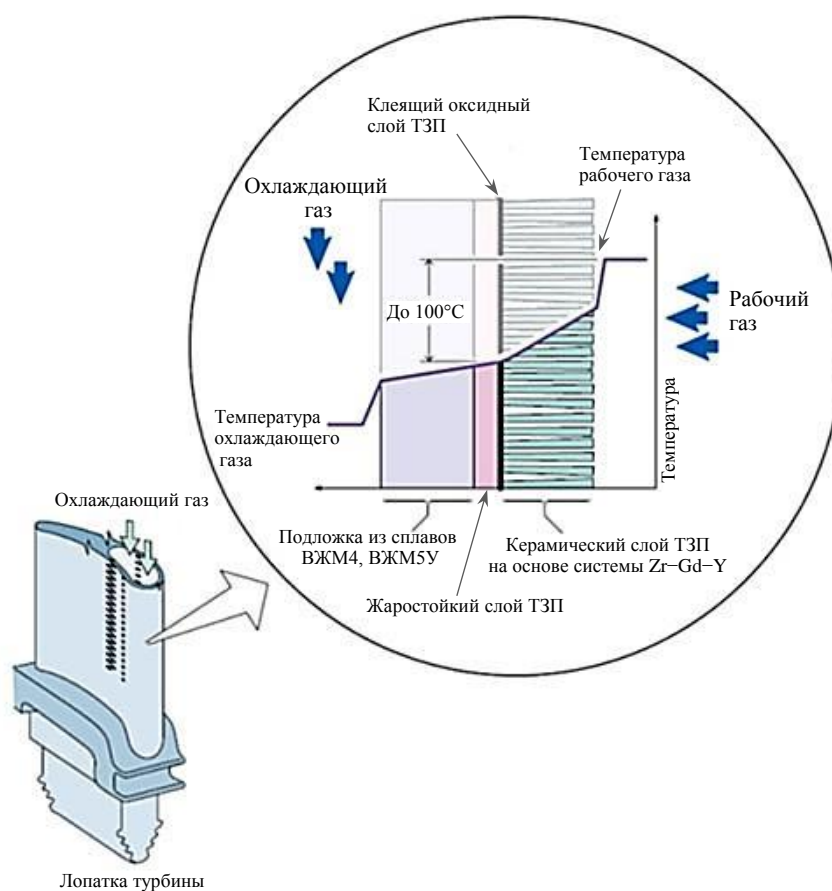


Рис. 1. Конструкция теплозащитного покрытия

Жаростойкие слои ТЗП нанесены на промышленной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУТП) типа МАП-2. После напыления материала покрытия проводили высокотемпературный вакуумный отжиг (при 1050°C, 3 ч), необходимый для формирования покрытия и релаксации напряжений. С целью увеличения количества алюминия в поверхностном слое покрытия, необходимого для повышения жаростойкости полученного ТЗП, проводили дополнительное алитирование поверхности отожженных образцов на установке МАП-2 с использованием серийного катода из сплава на алюминиевой основе ВСДП-16 [11–15].

Керамический слой теплозащитного покрытия, наносимый на установке УОКС-2 на базе магнетронных распылителей повышенной частоты из мишеней, изготовленных на основе циркониевого сплава системы $Zr-7,75Gd-7,75Y$ в среде рабочего газа кислорода и аргона, состоит из оксидов редкоземельных металлов с низким коэффициентом теплопроводности. Рабочий газ обеспечивает распыление мишени и генерацию потока атомов металла, направленного к поверхности покрываемых деталей. Формирование керамического слоя на поверхности деталей происходит в процессе плазмохимического взаимодействия атомов металла с атомами кислорода, которые вступают в реакцию, образуя химическое соединение [16–20].

Для проведения испытаний и исследований выбраны комплексные теплозащитные покрытия следующих составов:

– СДП-41 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м²)+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60–70 мкм);

– ВСДП-4 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м²)+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60–70 мкм);

– ВСДП-3 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м²)+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60–70 мкм).

Испытания на изотермическую жаростойкость образцов из сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У с ТЗП проводили в камерной электропечи Nabertherm: в закрытых керамических тиглях в спокойной атмосфере печи (на воздухе) при температурах 1150 (500 ч) и 1200°С (100 ч) в соответствии с ГОСТ 6130. Оценка жаростойких свойств образцов из сплава ВЖМ4 и ВЖМ5У с ТЗП осуществлялась гравиметрическим методом путем их взвешивания в процессе испытаний и определения удельного изменения массы без учета массы окалины, осыпавшейся с поверхности. Измерение массы образцов проводилось после 25, 50, 100, 250 и 500 циклов испытаний. Удельное изменение массы образцов (Δm_τ , г/м²) рассчитывалось по формуле

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

где m_τ – масса образца после τ часов испытаний, г; m_0 – масса образца в исходном состоянии, г; S – площадь поверхности образца в исходном состоянии, м².

Микроструктуру композиции «сплав–покрытие» исследовали на растровом электронном микроскопе FEI Inspect f50.

Результаты

Проведены металлографические (электронная микроскопия) и металлофизические (рентгенофазовый анализ) исследования образцов из сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У с теплозащитными покрытиями в исходном состоянии (рис. 2).

По результатам расшифровки дифрактограмм, полученных после рентгенофазового анализа, установлено, что во всех исследованных образцах основной фазой в покрытии является тетрагональный оксид на основе системы $Zr-Gd-Y$, обеспечивающий стойкость к спеканию и длительную работоспособность керамического слоя при высоких температурах.

Методом растровой электронной микроскопии исследована микроструктура образцов из сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У с теплозащитными покрытиями. Показано, что в исходном состоянии керамический слой ТЗП имеет характерную столбчатую структуру. Результаты измерения толщин полученных защитных жаростойких и керамических слоев ТЗП, сформированных на образцах, приведены в табл. 1.

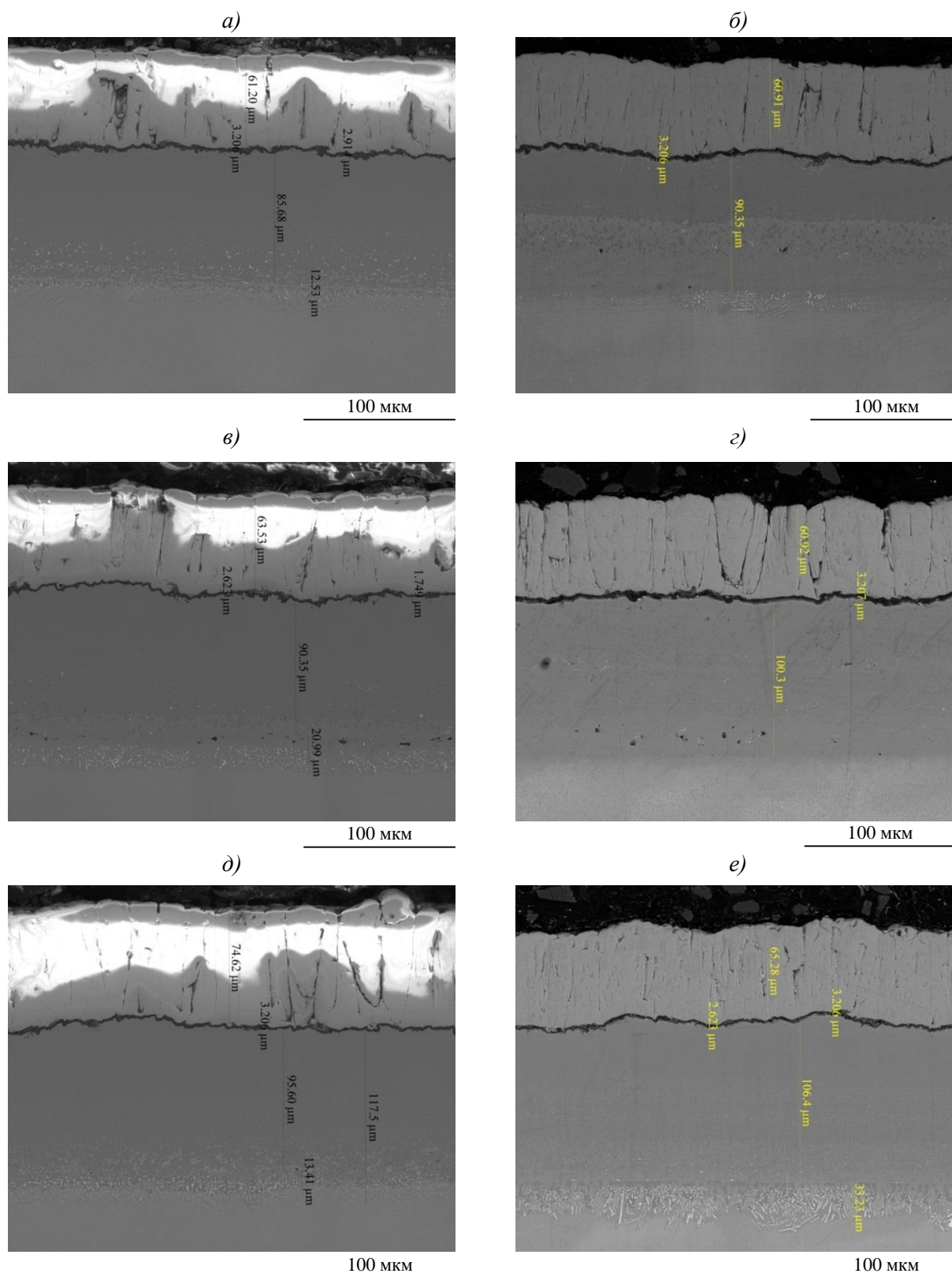


Рис. 2. Микроструктура образцов из никелевых сплавов ВЖМ5У (а, в, д) и ВЖМ4 (б, г, е) с теплозащитными покрытиями (в исходном состоянии):

а, б – СДП-41+ВСДП-16+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O; в, г – ВДСП-4+ВСДП-16+ТО+ВСДП-16+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O; д, е – ВСДП-3+ВСДП-16+ТО+ВСДП-16+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O

Таблица 1

Толщины защитных жаростойких покрытий

Сплав	Покрытие	Толщина слоя, мкм		
		жаростойкого	оксидного	керамического
ВЖМ5У	СДП-41 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ +ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	85	2-3	60
	ВСДП-4 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ +ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	90	2-3	60
	ВСДП-3 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ +ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	95	2-3	70
ВЖМ4	СДП-41 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ +ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	90	2-3	60
	ВСДП-4 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ +ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	95	2-3	60
	ВСДП-3 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ +ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	90	2-3	65

В результате проведенных исследований микроструктур образцов из сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У с ТЗП были получены данные о толщинах керамического, клеящего алюминидного и жаростойкого слоев. Толщина керамического слоя составляет 60–70 мкм, структура покрытия представляет собой направленные перпендикулярно к поверхности сплава выращенные в среде аргона и кислорода керамические столбцы на основе диоксида циркония, стабилизированного диоксидом иттрия и гадолиния. Толщина клеящего оксидного слоя на основе оксида алюминия, являющегося переходным между жаростойким и керамическим покрытиями, на всех образцах составляет 2–3 мкм. Толщина жаростойких слоев ТЗП составляет 80–90 мкм, покрытия имеют характерное двухзонное строение: верхний «темный» слой покрытия состоит из фазы β -(NiAl) – это большая часть покрытия с повышенным содержанием алюминия (20–25% (по массе)), которая обеспечивает защиту основы сплава от интенсивного окисления в процессе высокотемпературной эксплуатации, в «светлом» слое содержание алюминия составляет 10–15% (по массе).

Потери удельной массы образцов из сплава ВЖМ4 после 500 ч испытаний на изотермическую жаростойкость при 1150°C и 100 ч при 1200°C с теплозащитными покрытиями и без них приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Удельное изменение массы образцов из сплава ВЖМ4 с покрытиями и без них после испытаний на изотермическую жаростойкость при 1150°C в течение 500 ч

Покрытие	Удельный унос, г/м ²
Без покрытия	2694
СДП-41 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	50,4
ВСДП-4 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	38,8
ВСДП-3 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	137,5

Таблица 3

Удельное изменение массы образцов из сплава ВЖМ4 с покрытиями и без них после испытаний на изотермическую жаростойкость 1200°C в течение 100 ч

Покрытие	Удельный унос, г/м ²
Без покрытия	1418
СДП-41 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	52,1
ВСДП-4 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	91,5*
ВСДП-3 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	227*

* Сколы керамического слоя на поверхности образца.

По результатам испытаний образцов из сплава ВЖМ4 с теплозащитными покрытиями на изотермическую жаростойкость при температурах 1150 и 1200°C высокими жаростойкими свойствами характеризуются покрытия СДП-41+ВСДП-16+ТО+ВСДП-16+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O и ВСДП-4+ВСДП-16+ТО+ВСДП-16+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O, обладающие наименьшим удельным уносом массы. После проведенной длительной высокотемпературной изотермической выдержки крупных сколов и отслоений поверхностного керамического слоя покрытия не обнаружено.

Потери удельной массы образцов из сплава ВЖМ5У после испытаний на изотермическую жаростойкость при 1150 (500 ч) и 1200°C (100 ч) с теплозащитными покрытиями и без них приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Удельное изменение массы образцов из сплава ВЖМ5У с покрытиями и без них после испытаний на изотермическую жаростойкость при 1150°C в течение 500 ч

Покрытие	Удельный унос, г/м ²
Без покрытия	1254
СДП-41 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	55,2
ВСДП-4 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	270,1*
ВСДП-3 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	70,3

* Сколы керамического слоя на поверхности образца.

Таблица 5

Удельное изменение массы образцов из сплава ВЖМ5У с покрытиями и без них после испытаний на изотермическую жаростойкость при 1200°C в течение 100 ч

Покрытие	Удельный унос, г/м ²
Без покрытия	798
СДП-41 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	131,9*
ВСДП-4 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	351,7**
ВСДП-3 (80 мкм)+ВСДП-16 (60 г/м ²)+ТО+ВСДП-16 (35 г/м ²)+ТО+ +(Zr-7,75Gd-7,75Y)O (60-70 мкм)	291,6** (скол после 80 ч)

* Небольшие сколы керамического слоя на поверхности образца.

** Скол керамического слоя со всей поверхности образца.

По результатам испытаний образцов из сплава ВЖМ5У с теплозащитными покрытиями на изотермическую и циклическую жаростойкость при температурах 1150 и 1200°C высокими жаростойкими свойствами характеризуется покрытие

СДП-41+ВСДП-16+ТО+ВСДП-16+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O, обладающее наименьшим удельным уносом массы. После проведенной длительной высокотемпературной изотермической выдержки крупных сколов и отслоений поверхностного керамического слоя покрытия не обнаружено.

Обсуждение и заключения

Проведены испытания на изотермическую жаростойкость образцов из сплавов ВЖМ4, ВЖМ5У с комплексными теплозащитными покрытиями при температурах 1150 и 1200°C на базе испытаний 500 и 100 ч соответственно.

По результатам проведенных исследований установлено:

– теплозащитные покрытия СДП-41 (Ni-Cr-Al-Y-Ta-Re-Hf)+ВСДП-16 (Al-Ni-Y)+ТО+ВСДП-16 (Al-Ni-Y)+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O и ВСДП-4 (Ni-Cr-Al-Y-Hf)+ВСДП-16 (Al-Ni-Y)+ТО+ВСДП-16 (Al-Ni-Y)+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y) обеспечивают длительную защиту сплава ВЖМ4;

– комплексное теплозащитное покрытие СДП-41 (Ni-Cr-Al-Y-Ta-Re-Hf)+ВСДП-16 (Al-Ni-Y)+ТО+ВСДП-16 (Al-Ni-Y)+ТО+(Zr-7,75Gd-7,75Y)O обеспечивает длительную защиту сплава ВЖМ5У.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 36–52.
2. Жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2402624 Рос. Федерация; опубл. 16.06.09.
3. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2365656 Рос. Федерация; опубл. 30.01.08.
4. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Висик Е.М. и др. Жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности // *Литейное производство*. 2012. №6. С. 5–11.
5. 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.
6. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES // *Russian metallurgy (Metally)*. 2012. №1. P. 1–7.
7. 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.
8. 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.
9. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys // *Metal Sciens and Heat Treatment*. 1995. №2. P. 15–18.
10. 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.
11. 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.
12. Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутениевого сплава марки ВЖМ4 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №1. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-1-1.
13. Чубаров Д.А., Будиновский С.А. Выбор керамического материала для теплозащитных покрытий лопаток авиационных турбин на рабочие температуры до 1400°C // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №4. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-7-7.

14. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 43–46.
15. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Металлы*. 2012. №1. С. 5–13.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Чубаров Д.А. Технология получения ионно-плазменных жаростойких подслоев с повышенным содержанием алюминия для перспективных ТЗП // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №5. С. 56–60.
20. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Чубаров Д.А. Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №5. С. 38–44.