



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-1-1

**ЖАРОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ НОВОГО
ПЕРСПЕКТИВНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО
СПЛАВА ВИНЗ**

А.А. Косьмин

С.А. Будиновский
доктор технических наук

А.М. Гаямов
кандидат технических наук

А.А. Смирнов

Апрель 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.А. Космин¹, С.А. Будиновский¹, А.М. Гаямов¹, А.А. Смирнов¹

ЖАРОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ НОВОГО ПЕРСПЕКТИВНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВИНЗ

Разработано новое жаростойкое покрытие для защиты от высокотемпературного окисления деталей турбины ГТД, изготовленных из интерметаллидного сплава ВИНЗ, эксплуатирующихся в области температур 1100–1200°C. Проведены исследования жаростойкости свойств, эволюции состава и структуры легированных ионно-плазменных покрытий на сплаве ВИНЗ при рабочих температурах.

Ключевые слова: *покрытия, жаростойкие покрытия, ионно-плазменные покрытия, ионно-плазменная технология, жаростойкость, защита интерметаллидных сплавов, покрытия для лопаток турбины.*

A.A. Kosmin¹, S.A. Budinovskiy¹, A.M. Gayamov¹, A.A. Smirnov¹

HEAT-RESISTANT COATING FOR NEW INTERMETALLIC NICKEL-BASED SUPERALLOY VIN3

New heat-resistant coating for protection against high-temperature oxidation of turbine parts made of intermetallic nickel-based superalloy working at 1100–1200°C is developed. Research of heat-resistance, evolution of composition and structure of doped ion-plasma coatings for intermetallic superalloy is made.

Key words: *coatings, heat-resistant coatings, ion-plasma coatings, ion-plasma technology, heat-resistance, protection for intermetallic alloys, coatings for turbine blades.*

¹ Федеральное 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

В настоящее время основной тенденцией развития современных газотурбинных двигателей авиационного назначения, в том числе для существующих и перспективных вертолетов, является повышение температуры рабочего газа турбины, что обеспечивает рост тактико-технических и экономических характеристик. В связи с этим представляется целесообразным исследовать возможность применения в вертолетных турбинах

новых современных материалов, обладающих по сравнению с используемыми более высокими прочностными характеристиками, а также меньшей плотностью, что позволит снизить массу двигателя и, соответственно, повысить экономическую эффективность данных изделий [1–4].

Одним из направлений комплексного повышения служебных характеристик существующих конструкций ГТД, в том числе продления ресурса работы, снижения массы и повышения рабочих температур, является применение интерметаллидных сплавов на никелевой основе для деталей вертолетных турбин [5–7]. В России во ФГУП «ВИАМ» разработан ряд интерметаллидных литейных сплавов серии ВИН, обладающих удовлетворительным комплексом механических свойств при температурах до 1200°С на базах испытаний до 1000 ч [8–11]. Однако с ростом рабочих температур в перспективных ГТД обеспечение длительных ресурсов работы сопловых лопаток вертолетных турбин не представляется возможным. В условиях интенсивных теплосмен обеднение поверхности деталей из интерметаллидных сплавов алюминием и хромом приводит к окислению и разупрочнению и может быть скомпенсировано применением защитного покрытия [12, 13].

При создании перспективных вертолетных двигателей появляется необходимость увеличения ресурса работы лопаток турбины из новых разработанных сплавов путем нанесения на них жаростойкого покрытия, защищающего от высокотемпературного окисления в области температур 1000–1200°С [14].

Материал и методы исследования

Для исследований выбраны следующие покрытия:

- СДП-2+ВСДП-18 (из серийных жаростойких сплавов);
- СДП-41+ВСДП-18 (показавшее высокую жаростойкость на интерметаллидных сплавах ВКНА-1В и ВКНА-25 [15]);
- СДП-42+ВСДП-18 (СДП-42 схож по составу со сплавом СДП-41 и отличается тем, что Re заменен на W – для снижения стоимости покрытия).

Толщина покрытия из конденсированного слоя сплавов СДП-2, СДП-41, СДП-42 и алюминидного диффузионного слоя из сплава ВСДП-18 во всех случаях составила 80 мкм.

Покрытия наносили на вакуумной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) типа МАП-2 [16].

Испытания на изотермическую жаростойкость проводили в соответствии с ГОСТ 6130 на дисковых образцах $\varnothing 25$ мм, $h=3$ мм, без покрытия и с покрытиями, в атмосферной печи: в керамических тиглях с крышками при $T=1200^{\circ}\text{C}$.

Исследования на циклическую жаростойкость проводили на дисковых образцах $\varnothing 25$ мм, $h=3$ мм, без покрытия и с покрытиями, по режиму: выдержка при температуре 1200°C в течение 50 мин и охлаждение на воздухе в течение 10 мин до температуры 200°C (1 цикл испытаний). Оценка жаростойких свойств сплава без покрытия и с покрытием осуществлялась гравиметрическим методом – путем взвешивания образцов каждые 20–80 ч испытаний и определения удельного изменения массы образцов без учета массы окалины, осыпавшейся с их поверхности.

Микроструктура композиций «сплав–покрытие» исследовалась на оптическом микроскопе Olympus GX51 после отжига в вакууме и высокотемпературных испытаний на воздухе, элементный состав композиций «сплав–покрытие» – на волновом рентгеновском спектрометре JCMA-733. На данном приборе также изучали структуру покрытий в режиме «СОМРО», когда контрастность изображения определяется средней атомной массой химических элементов, входящих в состав исследуемой области или фазы. При этом, чем больше средняя атомная масса, тем светлее на фотографии микроструктуры исследуемая фаза.

Результаты исследования и их обсуждение

После 500 ч испытаний на изотермическую жаростойкость (рис. 1, *a*) все покрытия обладают высокими характеристиками жаростойкости по сравнению с защищаемым сплавом. Из рис 1, *a* видно, что для образцов с покрытиями кривые удельного изменения массы имеют незначительные различия, унос массы покрытия не превышает 50 г/м² при общем исходном удельном привесе покрытия $550\text{--}600$ г/м². Покрытие СДП-42+ВСДП-18 имеет наименьшую потерю массы (на уровне 17 г/м²), что составляет около 3% от исходного удельного привеса покрытия.

При испытаниях на циклическую жаростойкость (рис. 1, *б*) на базе 100 циклов не наблюдается снижения массы покрытий СДП-41+ВСДП-18 и СДП-42+ВСДП-18. Покрытие СДП-42+ВСДП-18 имеет схожие показатели – прирост массы составляет $3,35$ г/м² – с покрытием СДП-41+ВСДП-18, прирост массы которого составил $8,12$ г/м², что говорит о его более интенсивном взаимодействии с кислородом и, как следствие, возможном снижении жаростойкости.

По результатам проведенных металлографических исследований определено, что толщина покрытия СДП-42+ВСДП-18 в исходном состоянии (без учета зоны диффузионного взаимодействия) составила 75–80 мкм.

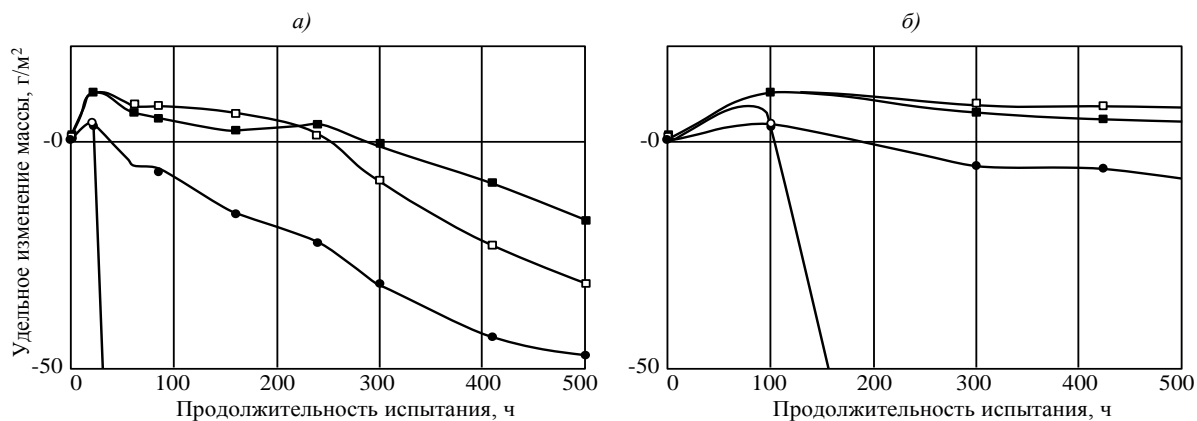
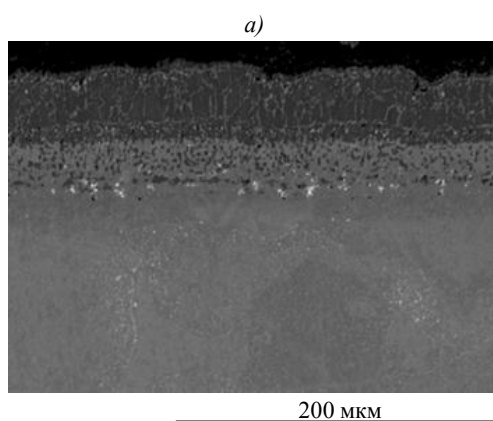
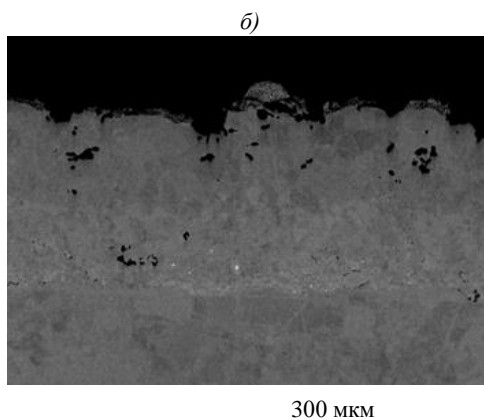


Рисунок 1. Удельное изменение массы образцов из сплава ВИНЗ в зависимости от продолжительности испытания на изотермическую жаростойкость при температуре 1200°C (а) и циклическую жаростойкость при температуре 1200±200°C (б) без покрытия (○) и с покрытиями СДП-2+ВСДП-18 (●), СДП-41+ВСДП-18 (□), СДП-42+ВСДП-18 (■)



Область анализа	Содержание элементов, % (по массе)												
	Al	Cr	Co	Ni	Y	Mo	La	Ce	Hf	Ta	W	Re	Σ
Темная	20,2	5,2	0,7	72,6	Н/о*	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	1,4	Н/о	Н/о	100,1
Светлая	10,3	3,6	0,7	74,4	Н/о	1,0	Н/о	Н/о	1,3	8,8	Н/о	Н/о	100,1
0 мкм	9,6	6,0	1,5	71,7	Н/о	1,5	Н/о	Н/о	1,1	6,3	2,3	Н/о	100,0

* Н/о – не обнаружено.



Область анализа	Содержание элементов, % (по массе)											
	Al	Cr	Co	Ni	Y	Mo	La	Hf	Ta	W	Re	Σ
Темная	5,6	8,0	4,7	68,7	Н/о*	5,3	Н/о	Н/о	3,7	2,3	1,7	100,0
Светлая	6,2	7,3	5,1	69,6	Н/о	5,6	Н/о	Н/о	3,0	1,7	1,7	100,2
0 мкм	7,8	4,6	3,8	71,4	Н/о	4,3	Н/о	Н/о	5,6	2,4	Н/о	99,9

* Н/о – не обнаружено.

Рисунок 2. Микроструктура и состав покрытия СДП-41+ВСДП-18 на сплаве ВИНЗ до (а) и после испытания (б) при температуре 1200°С на базе 500 ч

Методами растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного фазового анализа и микрорентгеноспектрального анализа (рис. 2) установлено, что после испытаний покрытие СДП-42+ВСДП-18 на сплаве ВИНЗ полностью сохранилось и продолжало выполнять свои защитные функции. Это связано с тем, что в поверхностном слое выявлены участки β-фазы, а среднее содержание алюминия в слое покрытия составляет 8–9% (по массе).

Таким образом установлено, что после испытаний образцов из сплава ВИНЗ на изотермическую жаростойкость при температуре 1200°С на базе 500 ч покрытие СДП-42+ВСДП-18 имеет наименьшую потерю массы из всех исследованных систем покрытий, которая составляет 17 г/м².

По результатам исследования образцов из сплава ВИНЗ с защитными покрытиями на циклическую и изотермическую жаростойкость при температуре 1200±200°С на базе 100 циклов определено, что в покрытии СДП-42+ВСДП-18 наблюдается прирост массы, который составляет 3,35 г/м².

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение. 2008. Т. 2. С. 159–192.
3. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 97–105.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).

5. 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.
6. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 57–60.
7. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Каблов Д.Е. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 20–25.
8. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al : пат. 2434067 Рос. Федерация; опубл. 01.07.2010.
9. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al : пат. 2434068 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.
10. Жаропрочный сплав на никелевой основе для монокристаллического литья: пат. 2439184 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.
11. 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.
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. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 149–163.
14. 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.
15. 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.
16. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Inozemcev A.A., Nihamkin M.A., Sandrackij V.L. Osnovy konstruirovaniya aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok [Basis for designing aircraft engines and power plants]. M.: Mashinostroenie. 2008. T. 2. S. 159–192.
3. Kablov E.N., Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovykh zagotovok iz litejnyh zharoprochnykh splavov novogo pokolenija [Modern technologies for bar stock of casting superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 97–105.
4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements – materials of current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
5. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Casting nickel superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 36–52.
6. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat-resistant casting intermetallic alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 57–60.
7. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A., Kablov D.E. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnykh i intermetallidnykh splavov s monokristallicheskoj strukturoj [The development process of directional solidification of high-temperature gas turbine engine blades and intermetallic alloys with a single-crystal structure] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 20–25.
8. Splav na osnove intermetallida Ni3Al [Alloy based on Ni3Al intermetallic]: pat. 2434067 Ros. Federacija; opubl. 01.07.2010.
9. Splav na osnove intermetallida Ni3Al [Alloy based on Ni3Al intermetallic]: pat. 2434068 Ros. Federacija; opubl. 05.10.2010.
10. Zharoprochnyj splav na nikelvoj osnove dlja monokristallicheskogo lit'ja [Superalloy based on nickel single crystal casting]: pat. 2439184 Ros. Federacija; opubl. 05.10.2010.

11. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokotepλονagruzhennyh detalej gazoturbinnnyh dvigatelej [Materials for high-thermal components of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
12. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-resistant and heat-resistant coatings for high-pressure turbine blades looking GTE] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 60–70.
13. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Ionnoe travlenie i modifizirovanie poverhnosti otvetstvennyh detalej mashin v vakuumno-dugovoj plazme [Ion etching and surface modification of critical components of machinery on a vacuum arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 149–163.
14. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising gtes //Russian metallurgy (Metally). 2012. №1. S. 1–7.
15. Matveev P.V., Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Kos'min A.A. Zashhitnye zharostojkie pokrytija dlja splavov na osnove intermetallidov nikelja [Heat-resistant protective coatings for intermetallic alloys based on nickel] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 12–15.
16. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennyh detalej kompressora GTD [Protecting and strengthening the ion-plasma coatings for blades and other parts of responsibility compressor GTE] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 71–81.