

УДК 621.793.1

doi 10.54708/19926502\_2024\_283105129

## Исследование жаростойких покрытий систем ВСДП-11, TiAl, AlCr, AlY

А.А. Тулина<sup>а</sup>, А.Ю. Назаров<sup>б</sup>, К.Н. Рамазанов<sup>в</sup>, В.Р. Мухамадеев<sup>г</sup>

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ), г. Уфа, Россия

**Аннотация.** В статье описано исследование технологий нанесения жаростойких покрытий на основе трех различных систем соединений – TiAl, AlCr, AlY, а также ВСДП-11. Покрытия наносились на образцы из жаропрочного сплава ЖС6К-ВИ. Образцы с покрытиями были подвергнуты диффузионному отжигу и высокотемпературным испытаниям и исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного и рентгеноструктурного анализа. Результаты исследования показали, что разработанная технология позволяет получать равномерные покрытия, позволяющие повысить жаростойкость лопаток из жаропрочного сплава без разрушения покрытий в результате высокотемпературного окисления. Полученные результаты свидетельствуют о применимости покрытий в условиях реального производства лопаток.

**Ключевые слова:** жаростойкие покрытия, жаропрочный сплав, лопатка ГТД, высокотемпературное окисление.

<sup>а-г</sup> angelatool@yandex.ru

### Введение

Одним из важнейших путей совершенствования газотурбинных двигателей (ГТД) является повышение рабочей температуры газа перед турбиной [1]. Условия работы лопаток ротора турбины высокого давления (ТВД) характеризуются высокой степенью теплонапряженного состояния и рабочими температурами, достигающими 1200 °С. Основной причиной, приводящей к выходу из строя лопаток, является высокотемпературное окисление. В связи с этим необходимо обеспечивать работоспособность и повышать ресурс лопаток турбины при высоких температурах.

Уровень рабочих температур уже существующих отечественных жаропрочных материалов для лопаток ГТД позволяет реализовывать конструкции новых конкурентоспособных авиационных двигателей. На сегодняшний день в качестве материалов деталей из горячих частей ГТД применяются различные жаропрочные сплавы на основе никеля, титана и различных интерметаллидов [2, 3]. Их свойства являются необходимыми для условий работы лопаток ротора ГТД, однако они не обеспечивают достаточной устойчивости лопаток к воздействию агрессивных сред. Одним из самых эффективных методов повышения ресурса лопаток ротора является применение жаростойких и термобарьерных покрытий. Среди применяемых покрытий широко распространены покрытия системы Me-Cr-Al-Y [4]. В настоящее время жаростойкие покрытия на основе данных систем не могут обеспечить требуемые характеристики по стойкости и ресурсу теплозащитного покрытия для перспективных газотурбинных двигателей с учетом роста КПД и ужесточения экологических требований, которые во многом достигаются повышением давления и температуры рабочего тела газогенератора [2, 5, 6]. При температурах выше 1200 °С снижается способность сопротивлению деформациям и покрытие теряет свою фазовую стабильность, что приводит к спеканию и разрушению [7]. Наиболее эффективным методом защиты рабочих лопаток ГТД является комбинированное теплозащитное покрытие, состоящее из внутреннего металлического жаростойкого слоя, поверх которого наносится керамический термобарьерный слой. Жаростойкий слой обеспечивает сцепление керамического слоя с подложкой и защиту поверхности лопатки от высокотемпературного окисления [4, 9].

В данной работе исследуется технология нанесения жаростойких покрытий на основе трех новых систем соединений – TiAl, AlCr, AlY, а также ВСДП-11 (система Al-Si-Y). Основной механизм защиты от коррозии состоит в образовании на поверхности покрытий оксид-

ных пленок  $SiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , которые способны предотвратить дальнейшее окисление материала [9]. Для оценки способности покрытий противостоять коррозии проводятся высокотемпературные испытания, а затем осуществляется оценка толщины оксидной пленки.

### Методики

В настоящей работе покрытия наносились вакуумно-дуговым методом на установке ННВ6.6-И1. Вакуумно-дуговое осаждение заключается в нанесении покрытий в вакууме путем конденсации на подложку требуемого материала из плазменных потоков, генерируемых на катоде в катодном пятне вакуумной дуги [8]. Покрытие наносилось на 16 образцов из жаропрочного сплава ЖС6К-ВИ размерами 10×20 мм, покрытие каждой системы напылялось на 4 образца. Режимы осаждения представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Режимы осаждения.

Режимы	ВСДП-11	TiAl		AlCr		AlY	
Время осаждения, ч	5	4		4		2	
Напряжение смещения U, В	50	50		50	50	50	
Ток дуги, А	100	Ti	50	Al	50	Al	60
		Al	86	Cr	100	Y	80
$I_{\text{пикк}}$ , А	20	10–15		10–15		10–15	

После нанесения покрытий все образцы были подвергнуты вакуумному диффузионному отжигу при температуре 800 °С. Далее были проведены высокотемпературные испытания образцов. Испытания проводились в муфельной печи при температуре, близкой к рабочей температуре покрытий, которая составляет 1100 °С. Максимальная выдержка образцов составляла 100 ч. Затем образцы исследовались при помощи установки для рентгеноструктурного анализа *Bruker D2 Phaser* для выявления полученных соединений. Также проведен анализ при помощи растрового электронного микроскопа *JEOL JSM-6490LV*. Исследования проводились на поперечных шлифах, выполненных после фиксации образцов в проводящей смоле и подготовки на шлифовально-полировальных машинах *P25FRS*.

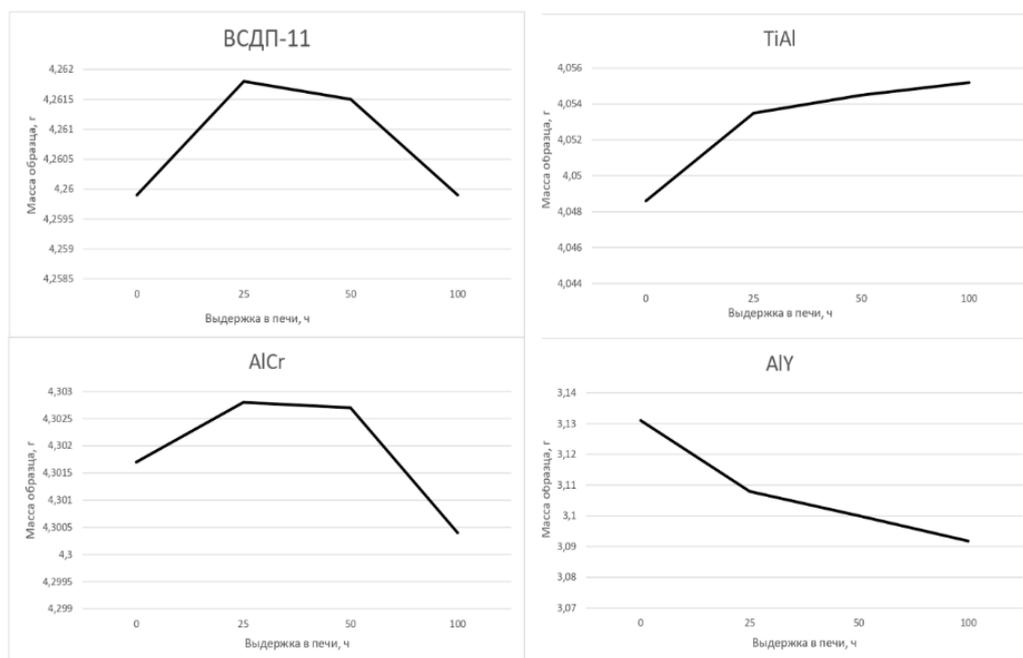
### Результаты

В таблице 2 представлены изменения масс образцов в результате реакций в процессе высокотемпературных испытаний. Была замерена масса исходных образцов и образцов после 25, 50 и 100 часов испытаний.

**Таблица 2.** Изменения масс образцов в процессе высокотемпературных испытаний.

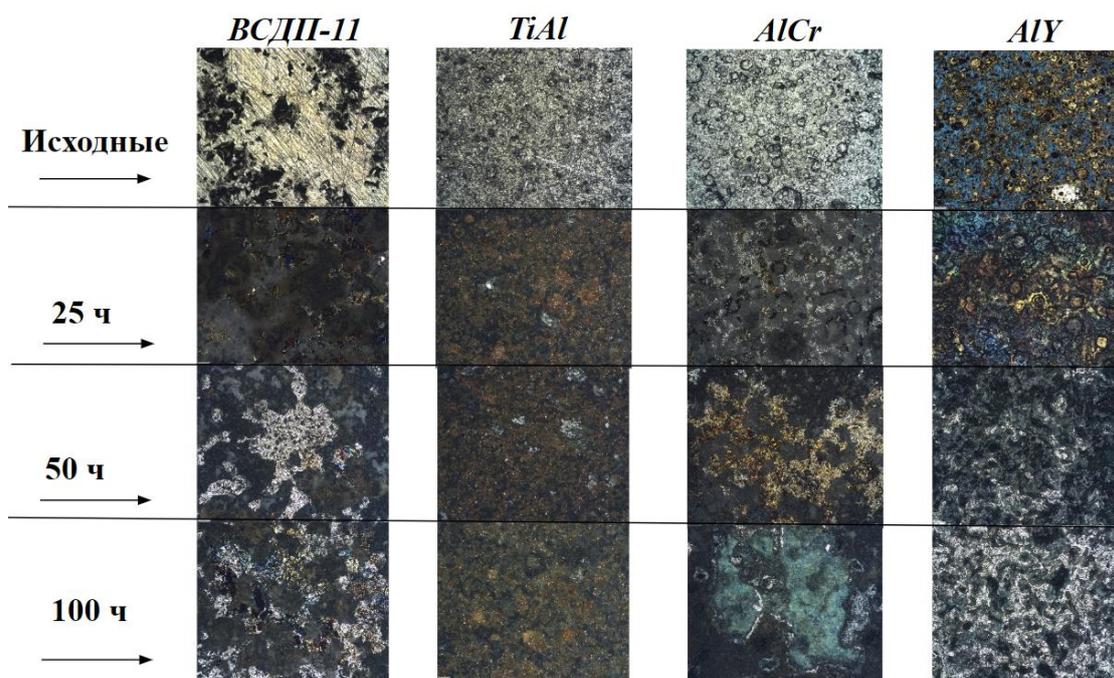
	м, г исходная	м, г (25 ч)	м, г (50 ч)	м, г (100 ч)
<b>A1 ВСДП-11 (1)</b>	4,3171	–	–	–
<b>A1 ВСДП-11 (2)</b>	3,9140	3,9167	–	–
<b>A1 ВСДП-11 (3)</b>	4,1938	4,1954	4,1953	–
<b>A1 ВСДП-11 (4)</b>	4,2599	4,2618	4,2615	4,2599
<b>A2 TiAl (1)</b>	4,4702	–	–	–
<b>A2 TiAl (2)</b>	4,1619	4,1674	–	–
<b>A2 TiAl (3)</b>	4,0314	4,0360	4,0370	–
<b>A2 TiAl (4)</b>	4,0486	4,0535	4,0545	4,0552
<b>A3 AlCr (1)</b>	4,2092	–	–	–
<b>A3 AlCr (2)</b>	4,1316	4,1325	–	–
<b>A3 AlCr (3)</b>	4,2302	4,2310	4,2302	–
<b>A3 AlCr (4)</b>	4,3017	4,3028	4,3027	4,3004
<b>A4 AlY (1)</b>	4,2053	–	–	–
<b>A4 AlY (2)</b>	4,2774	4,2472	–	–
<b>A4 AlY (3)</b>	4,0977	4,0684	4,0580	–
<b>A4 AlY (4)</b>	3,1310	3,1079	3,1000	3,0918

На основании измерений потери масс образцов с максимальной выдержкой в высокотемпературном испытании были построены графики, изображенные на Рис. 1. Анализ результатов изменений масс выявил, что наибольшую потерю массы в данном испытании с принятыми режимами проявило покрытие системы  $AlY$ , а наименьшую – покрытие системы  $AlCr$ .



**Рисунок 1.** Графики изменения масс образцов в результате испытаний.

После проведения высокотемпературных испытаний покрытия изучались при помощи оптического микроскопа. На Рис. 2 можно наблюдать снимки поверхностей каждого из покрытий при различном времени выдержки в высокотемпературных испытаниях. На каждом образце можно заметить присутствие оксидной пленки.



**Рисунок 2.** Снимки покрытий ВСДП-11, TiAl, AlCr, AlY в исходном состоянии, а также после 25, 50 и 100 часов высокотемпературных испытаний.

Для изучения структуры покрытий на растровом электронном микроскопе были подготовлены поперечные шлифы. С помощью данного исследования выявлено, что на каждом образце, подвергнутом испытанию, образовалась оксидная пленка. На рис. 3 изображены снимки покрытия  $AlCr$  после 25 часов (а), 50 часов (б), 100 часов (в) высокотемпературных испытаний. По снимкам можно наблюдать, как изменяется структура поверхности покрытия с увеличением времени выдержки.

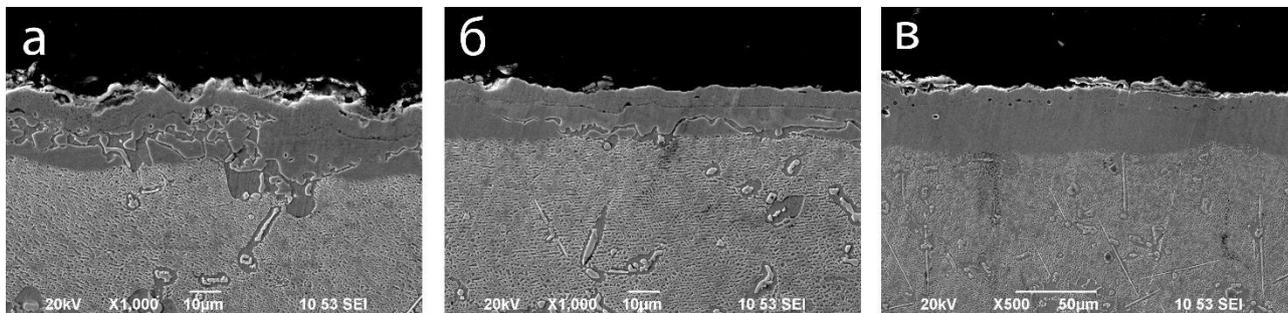


Рисунок 3. Снимки покрытия  $AlCr$  после 25 часов (а), 50 часов (б), 100 часов (в) высокотемпературных испытаний.

Рентгеноструктурный анализ является одним из важнейших методов исследования структуры вещества. В его основе лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трёхмерной кристаллической решётке [10]. С помощью рентгеноструктурного анализа выявлены все химические соединения и фазы, образовавшиеся в полученных покрытиях. На каждом образце, подвергнутом испытанию, образовалась оксидная пленка, представляющая собой в основном соединение  $Al_2O_3$ . В частности, на Рис. 4 показаны рентгенограммы, демонстрирующие фазовый состав образцов с покрытием системы ВСДП-11. Наблюдаются выраженные пики подложки никелевого сплава на всех образцах. Начиная с образца, выдержавшего высокотемпературные испытания в течение 25 часов, начинают проявляться пики оксида алюминия  $\alpha-Al_2O_3$ , а также  $\kappa-Al_2O_3$  и  $\theta-Al_2O_3$ . Максимум пиков данных соединений проявляется на образце с наибольшей выдержкой. На рентгенограмме присутствуют пики оксида хрома  $Cr_2O_3$ , составляющего меньшую долю оксидной пленки. Также получившееся покрытие включает в себя фазу интерметаллидного соединения  $Ni_3Al$ .

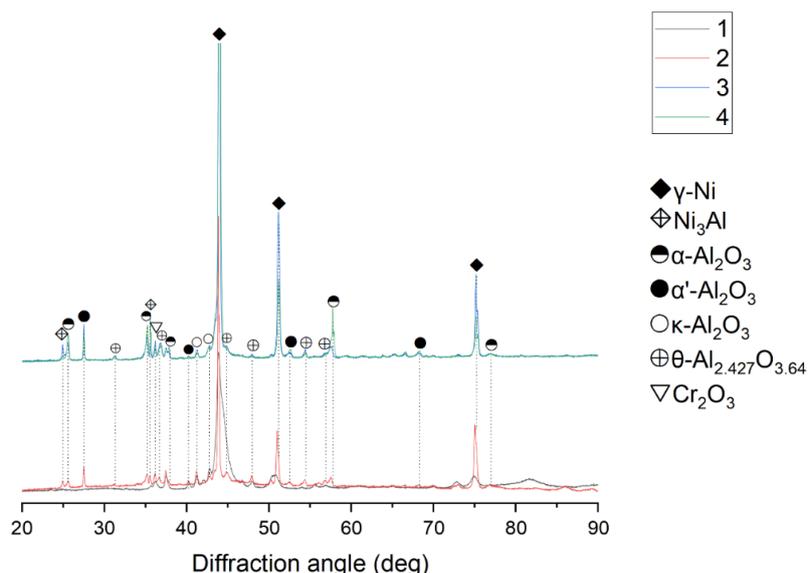
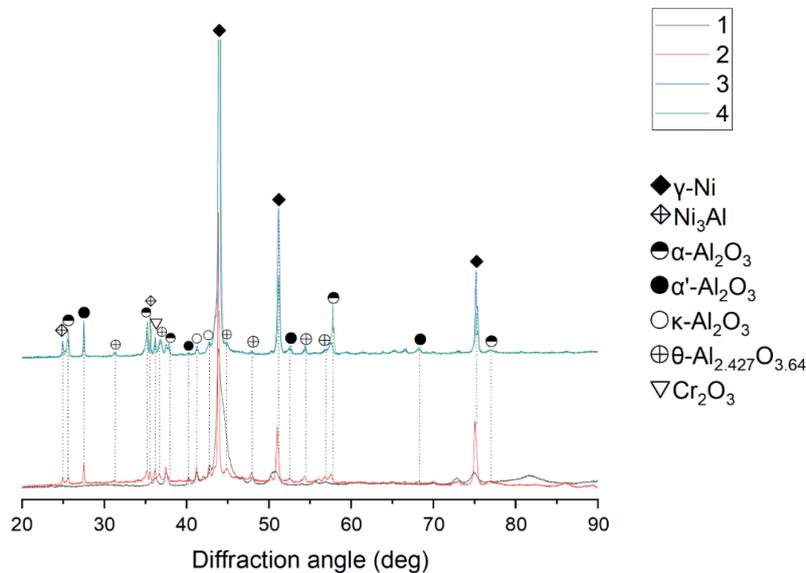


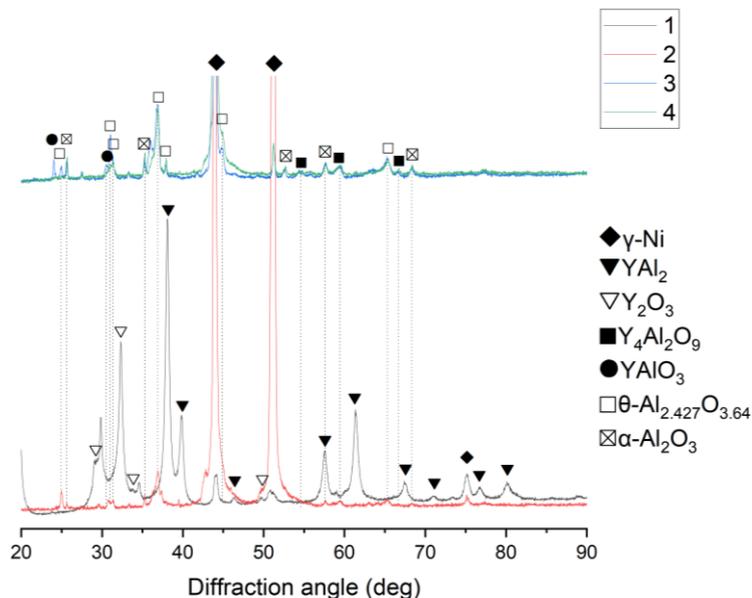
Рисунок 4. Рентгенограммы образцов с покрытием системы ВСДП-11.

На Рис. 5 показаны результаты рентгеноструктурного анализа покрытия  $AlCr$ . Наблюдаются выраженные пики подложки никелевого сплава на всех образцах. На образцах, выдержавших высокотемпературные испытания, проявляются пики оксидов алюминия  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , а также  $\kappa$ - $Al_2O_3$  и  $\theta$ - $Al_2O_3$ . Максимум пиков данных соединений проявляется на образце с наибольшей выдержкой. На рентгенограмме присутствуют пики оксида хрома  $Cr_2O_3$ , составляющего меньшую долю оксидной пленки. Также получившееся покрытие включает в себя фазу интерметаллидного соединения  $CrAl_2$ .



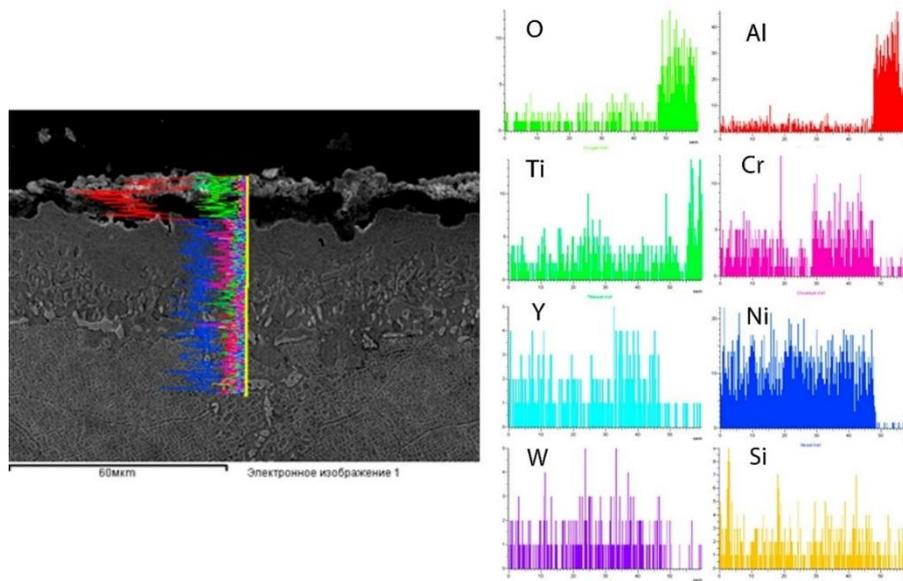
**Рисунок 5.** Рентгенограммы образцов с покрытием системы  $AlCr$ .

На Рис. 6 показаны результаты рентгеноструктурного анализа покрытия  $AlY$ . Наблюдаются выраженные пики подложки никелевого сплава на всех образцах. На образцах, выдержавших высокотемпературные испытания, проявляются пики оксидов алюминия  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , а также  $\theta$ - $Al_2O_3$ . Максимум пиков данных соединений проявляется на образце с наибольшей выдержкой. На рентгенограмме присутствуют пики оксида хрома  $Y_2O_3$ ,  $Y_4Al_2O_9$ ,  $YAlO_3$ , составляющие меньшую долю оксидной пленки. Также получившееся покрытие включает в себя фазу интерметаллидного соединения  $YAl_2$ .



**Рисунок 6.** Рентгенограммы образцов с покрытием системы  $AlY$ .

Результаты химического анализа всех образцов по глубине также показали состав оксидных пленок покрытий и наличие различных химических элементов в покрытии и диффузионном слое. На Рис. 7 представлены карты распределения химических элементов для образца с покрытием  $TiAl$ . На изображении четко прослеживается оксидная пленка, состоящая из оксида алюминия. Толщина оксидного слоя после 25 часов высокотемпературных испытаний составляет 40–70 мкм, в то время как толщина самого покрытия после осаждения составляла около 10 мкм.



**Рисунок 7.** Химический анализ покрытия  $TiAl$  после 25 часов высокотемпературных испытаний.

### Заключение

В данной статье представлены результаты исследования покрытий на основе систем  $TiAl$ ,  $AlCr$ ,  $AlY$ , а также ВСДП-11, полученных вакуумно-дуговым методом. После напыления покрытия были подвергнуты диффузионному отжигу, высокотемпературным испытаниям и ряду исследований, включая растровую электронную микроскопию, энергодисперсионный и рентгеноструктурный анализ.

На каждом образце, подвергнутом испытанию, образовалась оксидная пленка, представляющая собой в основном соединение  $Al_2O_3$ . Разработанная технология позволяет получать равномерные покрытия, позволяющие повысить жаростойкость лопаток из жаропрочного сплава без разрушения покрытий в результате высокотемпературного окисления. По результатам данного исследования можно сделать вывод, что наиболее эффективным жаростойким покрытием является ВСДП-11.

Результаты исследования данных жаростойких покрытий свидетельствуют о возможности их применения при рабочих температурах турбины низкого давления, достигающих 1100 °С.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

### Литература:

1. Бондаренко Ю. А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 2 (55). – С. 3-11. [Yu.A. Bondarenko, Trends in

the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines // *Aviation Materials and Technologies*. – 2019. – No. 2 (55). – pp. 3-11 (in Russian)].

2. Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Оспенникова О. Г. Литейные жаропрочные никелевые сплавы // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2012. – №. 5. – С. 15-19. [N.V. Petrushin, I.L. Svetlov, O.G. Ospennikova, Casting high-temperature nickel alloys // *All Materials. Encyclopaedic Directory*. – 2012. – No. 5. – pp. 15-19 (in Russian)].

3. Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 57. [O.A. Bazyleva, E.G. Arginbaeva, E.Yu. Turenko, High-temperature casting intermetallic alloys // *Aviation Materials and Technologies*. – 2012. – No. 5. – p. 57 (in Russian)].

4. 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. [E.N. Kablov, S.A. Myboyadjan, High-temperature and thermal protection coatings for high-pressure turbine blades of promising gas turbine engines // *Aviation Materials and Technologies*. – 2012. – No. 5. – p. 60 (in Russian)].

5. Tomohiro Takaki, Shinji Sakane, Munekazu Ohno, Yasushi Shibuta, Takayuki Aoki, Charles-André Gandin. Competitive grain growth during directional solidification of a polycrystalline binary alloy. Three-dimensional large-scale phase-field study, *Materialia*, Volume 1, 2018, Pages 104-113.

6. Matthias Senge, John Steger, Angelika Brückner-Foit, Adrian Rienäcker. Quantitative analysis of diffusion processes associated with  $\gamma'$ -depletion in Ni-base superalloys. *Materialia*, Volume 3, 2018, Pages 41-49.

7. Wee S., Do J., Kim K., Lee C., Seok C., Choi B.G., Choi Y., Kim W. Review on mechanical thermal properties of superalloys and thermal barrier coating used in gas turbines. *Appl. Sci.* 2020, 10, 5476.

8. А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев. Вакуумно-дуговые покрытия. – Харьков, ННЦ ХФТИ, 2010. – 318 с. [A.A. Andreev, L.P. Sablev, S.N. Grigoryev. Vacuum arc coatings. – Kharkov, NNC KhFTI, 2010. – p. 318 (in Russian)].

9. Климкин Ю. О. Кинетика протекания диффузионных процессов в жаростойких покрытиях при высокотемпературных испытаниях // *Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли*. – 2018. – С. 45-49. [Yu.O. Klimkin, Kinetics of diffusion processes in heat-resistant coatings during high-temperature tests // *New Technologies, Materials and Equipment of the Russian Aerospace Industry*. – 2018. – pp. 45-49 (in Russian)].

10. Китайгородский А. И. Рентгеноструктурный анализ. – Рипол Классик, 2013. [A.I. Kitaigorodskiy, X-ray structural analysis. – Ripol Klassik, 2013 (in Russian)].

#### Об авторах:

**ТУЛИНА Анжела Александровна**, магистрант кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; angelatool@yandex.ru.

**НАЗАРОВ Алмаз Юнирович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; angelatool@yandex.ru.

**РАМАЗАНОВ Камиль Нуруллаевич**, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; angelatool@yandex.ru.

**МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович**, старший преподаватель кафедры «Механика и цифровое проектирование» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; angelatool@yandex.ru.

#### Metadata:

**Title:** Study of heat-resistant coatings of the VSDP-11, TiAl, AlCr, AlY systems.

**Author 1:** Angela Aleksandrovna Tulina, Master's student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology.

**Author 2:** Almaz Yunirovich Nazarov, Cand.Sci., Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology.

**Author 3:** Kamil Nurullaevich Ramazanov, Dr.Sci., Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology.

**Author 4:** Vener Rifkatovich Mukhamadeev, Senior Lecturer at the Department of Mechanics and Digital Design, Ufa University of Science and Technology.

**Abstract:** The article describes the study of technologies for the deposition of heat-resistant coatings based on three different systems – TiAl, AlCr, AlY and VSDP-11. Coatings were applied onto samples made of the high-temperature alloy ZhS6K-VI. Samples with the coatings were subjected to diffusion annealing and high-temperature tests, and were studied using scanning electron microscopy, energy dispersive and X-ray diffraction analysis. The results of the study showed that the developed technology makes it possible to produce uniform coatings that enable increasing the heat resistance of blades made of the high-temperature alloy, without destruction of the coatings as a result of high-temperature oxidation. The obtained results indicate the applicability of the coatings in real blade production conditions.

**Keywords:** heat-resistant coatings, high-temperature alloy, gas turbine engine blade, high-temperature oxidation.