

УДК 621.793.74

**И.В. Ситников<sup>1,2</sup>, Д.А. Максимов<sup>1</sup>, В.Н. Батраков<sup>1</sup>, Ю.А. Боронников<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Акционерное общество «ОДК-Пермские моторы», Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **РАЗРАБОТКА ЖАРОСТОЙКОГО ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД И ГТУ**

Работа посвящена разработке новых составов жаростойкого термобарьерного покрытия для деталей газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. Представлены основные существующие материалы и технологии нанесения жаростойких термобарьерных покрытий, а также представлены перспективные материалы для получения жаростойких термобарьерных покрытий. Предлагаемый в работе новый состав жаростойкого термобарьерного покрытия представляет собой четырехслойную композицию: в качестве двух первых жаростойких связующих слоев использованы материалы на основе никеля с добавлением алюминия, хрома, иттрия, рения, гафния; в двух последних слоях использованы материалы на основе диоксида циркония с добавлением оксидов редкоземельных металлов. Представлены результаты сравнительных испытаний на термоциклическую стойкость, изотермическую жаростойкость образцов из суперсплава на основе никеля с новым составом жаростойкого термобарьерного покрытия и с существующими на АО «ОДК-Пермские моторы» составами. А также измерена температуропроводность методом лазерной вспышки образцов из суперсплава на основе никеля с новым и одним из существующих на АО «ОДК-Пермские моторы» составов жаростойкого термобарьерного покрытия. Применение разработанного состава жаростойкого термобарьерного покрытия позволяет значительно повысить ресурс деталей горячей части газотурбинных двигателей и газотурбинных установок, а также обеспечить работоспособность деталей на новых и перспективных изделиях с повышенной рабочей температурой. На сегодняшний день, в условиях АО «ОДК-Пермские моторы», новый состав жаростойкого термобарьерного покрытия применяется при изготовлении газотурбинных установок и газотурбинных двигателей на базе ПС90-А.

**Ключевые слова:** плазменное напыление в открытой атмосфере, плазменное напыление в динамическом вакууме, жаростойкое термобарьерное покрытие, газотурбинный двигатель, газотурбинная установка, суперсплав на основе никеля, диоксид циркония, редкоземельные металлы, циклическая стойкость, изотермическая жаростойкость, температуропроводность.

**I.V. Sitnikov<sup>1,2</sup>, D.A. Maksimov<sup>1</sup>, V.N. Batrakov<sup>1</sup>, Yu.A. Boronnikov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Joint Stock Company «UEC-Perm motors», Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **DEVELOPMENT OF A HEAT-RESISTANT THERMOBARRIER COATING FOR PARTS OF GTE AND GTP**

The work is devoted to the development of new compositions of a heat-resistant thermal barrier coating for parts of gas turbine engines and gas turbine plants. The main existing materials and technologies for applying heat-resistant thermal barrier coatings are presented, and promising materials for the production of heat-resistant thermal barrier coatings are presented. The proposed new composition of the heat-resistant thermal barrier coating is a four-layer composition: as the first two heat-resistant bonding layers, materials based on nickel with the addition of aluminum, chromium, yttrium, rhenium, hafnium are used; in the last two layers, materials based on zirconium dioxide with the addition of rare earth metal oxides were used. The results of comparative tests for thermal cyclic resistance, isothermal heat resistance of samples from a superalloy based on nickel with a new composition of a heat-resistant thermal barrier coating and compositions existing at JSC "UEC-Perm Motors" are presented. And also measured the thermal diffusivity by the method of laser flash of samples from a superalloy based on nickel with a new and one of the existing at JSC «UEC-Perm Motors» compositions of the heat-resistant thermal barrier coating. The use of the developed composition of a heat-resistant thermal barrier coating makes it possible to significantly increase the service life of parts of the hot part of gas turbine engines and gas turbine plants, as well as to ensure the performance of parts on new and promising products with an increased operating temperature. Today, in conditions JSC «UEC-Perm Motors», a new composition of a heat-resistant thermal barrier coating is used in the manufacture of gas turbine plants and gas turbine engines based on PS90-A.

**Keywords:** plasma spraying in an open atmosphere, plasma spraying in a dynamic vacuum, heat-resistant thermal barrier coating, gas turbine engine, gas turbine plant, nickel-based superalloy, zirconium dioxide, rare earth metals, cyclic resistance, isothermal heat resistance, thermal diffusivity.

При изготовлении деталей ГТД и ГТУ, работающих в условиях воздействия высокотемпературного газового потока, широко применяются жаропрочные сплавы на основе никеля. В таких условиях критичными характеристиками применяемых материалов, которые определяют максимальные параметры турбины, наряду с жаропрочностью является их жаростойкость. Невысокий запас жаростойкости применяемых материалов, в условиях повышения температуры эксплуатации, ограничивает срок их службы. В процессе эксплуатации в жаропрочном сплаве под воздействием высокой температуры происходят структурные изменения, снижающие его жаропрочность [1–7].

По мере повышения рабочей температуры ГТД и ГТУ для защиты наиболее теплонагруженных элементов, изготовленных из жаропрочных никелевых сплавов, таких как детали камеры сгорания, сопловые и рабочие лопатки турбины высокого давления, стали применять металлические жаростойкие покрытия, а в дальнейшем комплексные металлокерамические теплозащитные покрытия (ТЗП), состоящие из жаростойкого металлического слоя и термобарьерного керамического слоя. К ТЗП предъявляется ряд требований: низкий коэффициент теплопроводности, стабильность при высоких температурах, высокая долговечность, а также сопротивление эрозии, сопротивление химическому взаимодействию с частицами присутствующими в газе, такими как сера и ванадий или кальций-магний-алюмо-силикаты (CMAS).

Современное ТЗП состоит из следующих слоев: на поверхность детали наносится жаростойкий связующий слой (ЖСС), защищающий основной материал от высокотемпературной коррозии и окисления; поверх ЖСС наносят керамический слой (КС) который ограничивает проникновение тепла внутрь жаропрочного сплава. Самыми распространёнными материалами для нанесения ЖСС являются сплавы систем  $M\text{CrAlY}$  ( $M = \text{Ni}, \text{Co}$ ) и  $\text{Ni(Pt)-Al}$ . Нанесение ЖСС на детали осуществляют методами плазменного напыления (в открытой атмосфере – APS или в динамическом вакууме – VPS), высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF, HVOF) и

рядом конденсационных вакуумных методов (ВПТВЭ, EB PVD и др.) В качестве верхнего КС длительный период применяются материалы на основе диоксида циркония стабилизированного оксидом иттрия. В основном широко применяется диоксид циркония, стабилизированный 6–8 % оксида иттрия (7YSZ). Нанесение верхнего КС осуществляют различными способами – методом газотермического напыления (плазменное напыление в открытой атмосфере – APS, газопламенное напыление), осаждением из паровой фазы в вакууме (EB-PVD) и рядом других вакуумно-конденсационных методов [8–12].

На сегодняшний день КС на базе диоксида циркония стабилизированного оксидом иттрия не может обеспечить требуемые характеристики по стойкости и ресурсу ТЗП для перспективных ГТД, с учетом роста КПД и ужесточения экологических требований, которые во многом достигаются повышением давления и температуры рабочего тела газогенератора. Вся мировая двигателестроительная отрасль ориентирована на поиск и разработку альтернативных решений, принимая во внимание эти тенденции. Одним из перспективных направлений является применение новых материалов на основе диоксида циркония YSZ, частично легированных оксидами редкоземельных металлов (РЗМ) Yb, Gd, Hf, а также цирконатов лантаноидов  $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  [13–15].

В связи с этим, для повышения ресурса работы деталей камеры сгорания и турбины высокого давления специалистами отдела главного сварщика АО «ОДК-Пермские моторы» было принято решение использовать новые материалы на основе 7YSZ с добавлением оксидов РЗМ Yb и Gd, а также новые материалы для ЖСС на основе  $\text{NiCrAlYReHf}$  и  $\text{NiAl}$ . Однако применение нового материала  $\text{ZrYbGd}$  в качестве единственного слоя не дало положительных результатов, так как легирование оксидами РЗМ хоть и уменьшает теплопроводность ТЗП, но при этом снижает его термоциклическую стойкость. Использование новых материалов для ЖСС объясняется наибольшим запасом жаростойкости по сравнению с материалом на основе  $\text{NiCrCoAl}$ . Таким образом, получен уникальный состав ТЗП, включающий в себя четыре слоя, схема

состава ТЗП представлена на рис. 1. Первые два слоя наносятся методом VPS, последующие слои наносятся методом APS.

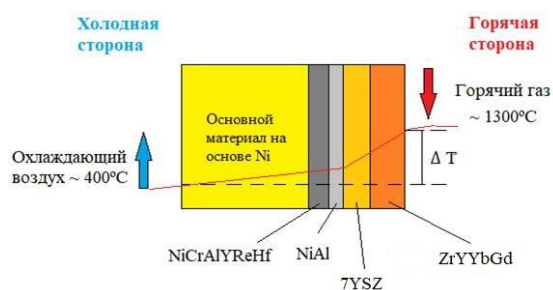


Рис. 1. Схема нового состава ТЗП

Для определения циклической стойкости, изотермической жаростойкости и сравнения полученных данных с данными серийного ТЗП, применяемого на АО «ОДК-Пермские моторы», проведены сравнительные испытания. Температура термоциклических испытаний составляла 1150 °С, изотермических жаростойких испытаний – 1200 °С на базе 100 часов. В качестве образцов для испытаний использованы круглые образцы диаметром 25 мм, толщиной 5 мм из суперсплава на основе никеля.

По результатам сравнительных испытаний новый состав ТЗП обладает в 1,5–3 раза большей термоциклической стойкостью (рис. 2) и большим потенциалом запаса жаростойкости (рис. 3) по сравнению с другими испытываемыми составами ТЗП, что напрямую свидетельствует об увеличении ресурса работы как самого ТЗП так и основного материала детали.

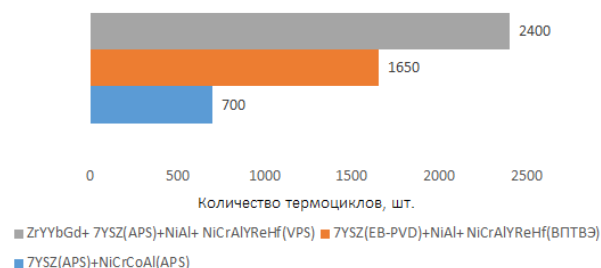


Рис. 2. Результаты сравнительных термоциклических испытаний

Для оценки влияния технологии нанесения и состава ТЗП на коэффициент теплопроводности выполнено измерение температуропроводности образцов с новым составом

ТЗП и одним из составов, используемых на АО «ОДК-Пермские моторы», методом лазерной вспышки в диапазоне температур от 20 до 1000°С (рис. 4). В качестве образцов применяли круглые образцы диаметром 10 мм, толщиной 2 мм из суперсплава на основе никеля.

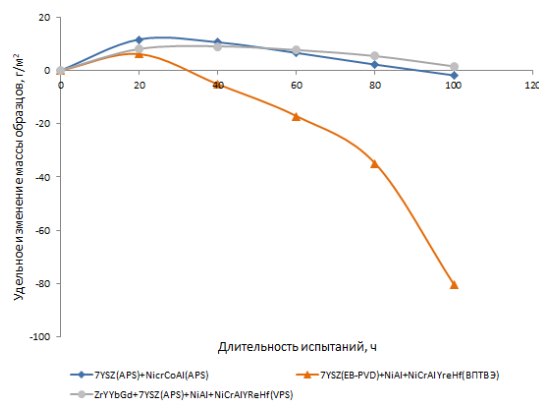


Рис. 3. Результаты сравнительных испытаний на изотермическую жаростойкость

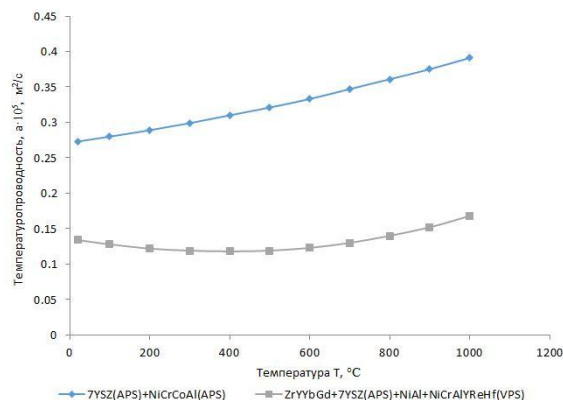


Рис. 4. Результаты измерения температуропроводности

Из полученных результатов измерения температуропроводности образцов с разными составами и технологиями нанесения ТЗП, следует, что нанесение новой четырехслойной композиции ТЗП (ZrYYbGd+7YSZ+NiAl+NiCrAlYReHf), направленное на повышение термоциклической стойкости приводит к существенному увеличению (на 50 % и более) эффективности теплозащитных свойств, по сравнению с двухслойной композицией ТЗП (7YSZ(APS)+NiCrCoAl(APS)).

Новый состав ТЗП успешно протестирован в составе ГТУ на базе двигателя ПС90-А, наработка составила около 10 тыс. часов. Применение разработанного состава ТЗП позволяет значительно повысить ресурс деталей горячей части ГТД и ГТУ, а также обеспе-

чить работоспособность деталей на новых и перспективных изделиях с повышенной рабочей температурой. На сегодняшний день, в условиях АО «ОДК-Пермские моторы», новый состав ТЗП применяется при изготовлении ГТУ и ГТД на базе двигателей ПС90-А.

### Библиографический список

1. Коломыйцев П.Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. – М.: Металлургия, 1991.
2. Береговский В.В., Арутюнова И.В. Влияние жаростойкого подслоя термобарьерных покрытий на механическую усталость жаропрочных сплавов // Мир современной науки. – 2012. – № 4 (13). – С. 46–50.
3. Панков В.П., Шаталов А.И., Соловьев В.А. Структурные изменения в жаростойких покрытиях лопаток турбин при эксплуатации // Наука Парк. – 2014. – № 2-2 (22). – С. 51–55.
4. Панков В.П., Шаталов А.И., Соловьев В.А. Комбинированные жаростойкие покрытия лопаток турбин газотурбинного двигателя // Наука Парк. – 2014. – № 2-2 (22). – С. 56–61.
5. Панков В.П. Исследования комбинированных жаростойких покрытий лопаток турбин газотурбинных двигателей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 3 (135). – С. 26–30.
6. Панков В.П. Исследования сплавов и покрытий лопаток турбин газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 5(137). – С. 36–40.
7. Панков В.П., Бабаян А.Л., Куликов М.В., Косой В.А., Варламов Б.С. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей // Ползуновский вестник. – 2021. – № 1. – С. 161–172. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.023.
8. Джон Шайбель, Кирк Фик, Шейн Элбел, Джеффри С. Смит. Испытания термобарьерных покрытий компонентов горячего тракта ГТУ с низкой проводимостью // Газотурбинные технологии. – 2021. – № 3 (178). – С. 26–32.
9. Балдаев Л.Х., Балдаев С.Л., Мазилин И.В., Ахметгареева А.М., Иванов А.С. Применение термобарьерных покрытий для лопаток современных газотурбинных установок на примере ГТД-110М // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. – № 2 (33). – С. 70–72.
10. Оковитый В.В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий // Наука и техника. – 2015. – № 5. – С. 26–32.
11. Hui Mei, Yanan Liu, Laifei Cheng Comparison of oxidation resistance of NiCoCrAlTaY-coated and uncoated Mar-M247 superalloys in the air at 1150 C // J Mater Sci (2012) 47:2278–2283.
12. Sumana Ghosh Microstructure and Mechanical Properties of a Glass-Ceramic Bond Coated TBC System // Procedia Materials Science 6 (2014) 425–429.
13. L. Wang, X.H. Zhong, Y.X. Zhao, S.Y. Tao, W. Zhang, Y. Wang, X.G. Design and optimization of coating structure for the thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying via finite element method // SuneJournal of Asian Ceramic Societies 2 (2014) 102–116.
14. Lei Jin, Peizhong Li, Haibin Zhou, Wei Zhang, Guodong Zhou, Chun Wang Improving thermal insulation of TC4 using YSZ-based coating and SiO<sub>2</sub> aerogel // Progress in Natural Science: Materials International 25 (2015) 141–146.
15. Leilei Sun, Hongbo Guo, Hui Peng, Shengkai Gong, Huibin Xu Phase stability and thermal conductivity of ytterbia and yttria co-doped zirconia // Progress in Natural Science: Materials International 2013; 23 (4): 440–445.

### References

1. Kolomytsev, P.T. (1991). High-temperature protective coatings for nickel alloys. Moscow: Metallurgy. (In Russ.).
2. Beregovsky V.V., Arutyunova I.V. (2012). Influence of heat-resistant sublayer of thermal barrier coatings on mechanical fatigue of heat-resistant alloys. *World of Modern Science*, 4 (13), 46-50. (In Russ.).
3. Pankov, V.P., Shatalov, A.I. Soloviev, V.A. (2014). Structural changes in heat-resistant coatings of turbine blades during operation. *NaukaPark*, 2–2 (22), 51–55. (In Russ.).
4. Pankov, V.P., Shatalov, A.I. Soloviev, V.A. (2014). Combined heat-resistant coatings of turbine blades of a gas turbine engine. *NaukaPark*, 2–2 (22), 56–61. (In Russ.).

5. Pankov, V.P. (2016). Research of combined heat-resistant coatings of turbine blades of gas-turbine engines. *Strengthening technologies and coatings*, 3 (135), S. 26-30. (In Russ.).
6. Pankov, V.P. (2016). Investigation of alloys and coatings of turbine blades of gas turbine engines during operation. *Strengthening technologies and coatings*, 5 (137), 36–40. (In Russ.).
7. Pankov V.P., Babayan A.L., Kulikov M.V., Kossoy V.A., Varlamov B.S. (2021). Heat-protective coatings for turbine blades of aircraft gas turbine engines. *Polzunovskiy vestnik*, 1, 161-172. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.023.
8. John Scheibel, Kirk Fick, Shane Elbel, Jeffrey S. Smith. (2021). Testing of thermal barrier coatings for the components of the hot section of a gas turbine with low conductivity. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 3 (178), 26-32. (In Russ.).
9. Baldaev L.Kh., Baldaev S.L., Mazilin I.V., Akhmetgareeva A.M., Ivanov A.S. (2016) Application of thermal barrier coatings for blades of modern gas turbine plants on the example of GTD-110M. *Reliability and safety of power engineering*, 2 (33), 70-72.
10. Okovityy V.V. (2015) The choice of oxides for the stabilization of zirconium dioxide in the production of heat-shielding coatings. *Science and technology*, 5, 26-32.
11. Hui Mei, Yanan Liu, Laifei Cheng (2012) Comparison of oxidation resistance of NiCoCrAlTaY-coated and -uncoated Mar-M247 superalloys in the air at 1150 C. *J Mater Sci*, 47, 2278–2283.
12. Sumana Ghosh (2014) Microstructure and Mechanical Properties of a Glass-Ceramic Bond Coated TBC System. *Procedia Materials Science*, 6, 425 – 429.
13. L. Wang, X.H. Zhong, Y.X. Zhao, S.Y. Tao, W. Zhang, Y. Wang, X.G. Design and optimization of coating structure for the thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying via finite element method // *SuneJournal of Asian Ceramic Societies* 2 (2014) 102–116.
14. Lei Jin, Peizhong Li, Haibin Zhou, Wei Zhang, Guodong Zhou, Chun Wang Improving thermal insulation of TC4 using YSZ-based coating and SiO<sub>2</sub> aerogel // *Progress in Natural Science: Materials International* 25 (2015) 141–146.
15. Leilei Sun, Hongbo Guo, Hui Peng, Shengkai Gong, Huibin Xu Phase stability and thermal conductivity of ytterbia and yttria co-doped zirconia // *Progress in Natural Science: Materials International* 2013; 23 (4): 440–445.

#### Об авторах

**Ситников Илья Владимирович** (Пермь, Россия) – ведущий инженер технологического бюро нанесения покрытий, отдел главного сварщика, АО «ОДК-Пермские моторы» (614010, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 93, корпус 61, e-mail: sitnikov-iv@pmz.ru); аспирант кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: stu459@mail.ru).

**Максимов Дмитрий Аркадьевич** (Пермь, Россия) – главный сварщик, АО «ОДК-Пермские моторы» (614010, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 93, корпус 61, e-mail: maksimov-da@pmz.ru).

**Батраков Владимир Николаевич** (Пермь, Россия) – заместитель главного сварщика, АО «ОДК-Пермские моторы», (614010, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 93, корпус 61, e-mail: batrakov-vn@pmz.ru).

**Боронников Юрий Андреевич** (Пермь, Россия) – начальник технологического бюро нанесения покрытий, отдел главного сварщика, АО «ОДК-Пермские моторы» (614010, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 93, корпус 61, e-mail: boronnikov-yua@pmz.ru).

#### About the authors

**Sitnikov Ilya Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) - Leading Engineer, Coating Technological Bureau, Chief Welder Department, JSC «UEC-Perm Motors» (614010, Perm, Komsomolsky Av., 93, building 61, e-mail: sitnikov-iv@pmz.ru); Post-graduate student of the Department of Welding Production, Metrology and Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky Av., 29, e-mail: stu459@mail.ru).

**Dmitry Arkadievich Maksimov** (Perm, Russian Federation) – Chief Welder, JSC «UEC-Perm Motors» (614010, Perm, Komsomolsky Av., 93, building 61, e-mail: maksimov-da@pmz.ru).

**Batrakov Vladimir Nikolaevich** (Perm, Russian Federation) – Deputy Chief Welder, JSC «UEC-Perm Motors», (614010, Perm, Komsomolsky Av., 93, building 61, e-mail: batrakov-vn@pmz.ru).

**Boronnikov Yury Andreevich** (Perm, Russian Federation) – Head of the Coating Technological Bureau, Chief Welder Department, JSC «UEC-Perm Motors» (614010, Perm, Komsomolsky Av., 93, building 61, e-mail: boronnikov-yua@pmz.ru).

Получено 06.09.2021