

УДК 669.017:629.7.023.22

В. А. БОГУСЛАЕВ¹, П. Д. ЖЕМАНЮК¹, В. Л. ГРЕШТА², Е. Г. СОТНИКОВ¹,
З. В. ЛЕХОВИЦЕР¹, Д. В. ТКАЧ², Л. П. СТЕПАНОВА², А. В. КЛИМОВ²

¹ АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

² Запорожский национальный технический университет, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРСТОЙКОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИХ ЛЕГИРОВАНИИ КОМБИНИРОВАННЫМИ ЛИГАТУРАМИ

В работе проведена оценка характера влияния легирования комбинированными иттрийсодержащими лигатурами, в том числе, с повышенным содержанием Cr, Co и Al на жаростойкость уплотнительных покрытий. Установлено, что высокое сопротивление газовой коррозии оказывали покрытия, в которые была введена комплексная лигатура Co-Ni-Cr-Al-Y и чистый иттрий. Фазовый анализ поверхностного слоя покрытий позволил предположить, что формирование оксидов Y_2O_3 и шпинели $NiCr_2O_4$ повышает защитные свойства оксидной пленки и обеспечивает более высокую ее адгезию с основным материалом покрытия. Кроме того, формирующиеся в процессе высокотемпературных испытаний оксиды имеют плавно изменяющиеся значения температурного коэффициента линейного расширения по отношению к матрице, что предотвращает растрескивание.

Ключевые слова: жаростойкость, уплотнительное покрытие, иттрий, оксиды.

Введение

В авиадвигателестроении планомерно ведутся работы по повышению коэффициента полезного действия газотурбинных двигателей, что, в свою очередь, ведет к увеличению температуры газов в горячем тракте. При этом кроме решений конструкторского характера необходимо реализовать ряд материаловедческих задач, поскольку многие материалы удовлетворительно ведущие себя при температурах до 1000 °С значительно снижают свои эксплуатационные свойства при росте температуры горячего тракта до 1100 °С и выше [1].

Основной целью нанесения на детали турбины уплотнительных покрытий является обеспечение требуемой величины радиального зазора между ротором и статором в процессе эксплуатации [2, 3], причем величина данного зазора должна сохраняться в течение всего межремонтного периода работы газотурбинного двигателя (ГТД). Одной из характеристик, значительно влияющих на эксплуатационную надежность покрытия, является его жаростойкость, поскольку в горячем тракте двигателя возможно интенсивное развитие высокотемпературной газовой коррозии [4, 5]. Кроме того, образование оксидов в уплотнительном покрытии и изменение геометрии покрытия в процессе эксплуатации двигателя может привести к изменению радиального зазора и, соответственно, снижению коэффициента

полезного действия (КПД) авиационного двигателя, а также износу роторной части двигателя вследствие трения о частицы сформировавшихся включений.

Для повышения жаростойкости покрытий системы Ni-Al целесообразно вводить элементы типа Cr, Si, что позволяет формировать оксидную пленку с высокими защитными свойствами [4]. Микролегирование редкоземельными элементами (например, иттрием) позволяет повысить адгезию оксидной пленки. Высокая жаростойкость покрытий должна обеспечиваться формированием оксидов типа Al_2O_3 и Cr_2O_3 , образующих на поверхности плотную пленку [6].

Как было сказано выше, на сегодня, уплотнительные покрытия, применяемые в отечественных ГТД, разработаны для работы в условиях температур до 1000 °С, поэтому необходимость повышения жаростойкости уплотнительных покрытий в условиях температур выше 1100 °С, является актуальной задачей.

Таким образом, целью данной работы является установление характера влияния легирования комбинированными иттрийсодержащими лигатурами в том числе с повышенным содержанием Cr, Co и Al на жаростойкость уплотнительных покрытий как одного из определяющих факторов эксплуатационной надежности деталей и технико-экономических показателей двигателя в межремонтный период в целом.

1. Материалы и методы исследования

В качестве базового материала для проведения дальнейших исследований было выбрано уплотнительное покрытие КНА-82, которое на сегодняшний день успешно применяется в авиационных двигателях АО «Мотор Сич». В сегодняшних реалиях необходимо повышать рабочие температуры газовой среды выше 1100 °С и дальнейшее применение этих покрытий является нецелесообразным из-за резкого снижения их эксплуатационных характеристик при таких температурах [7, 8]. Поэтому для повышения физико-механических свойств уплотнительного покрытия в шихту, приготавливаемую по серийной технологии вносили лигатуру содержащую иттрий. Было исследовано три различных состава лигатуры, с различным содержанием иттрия: Состав № 1 – Ni-Y; Состав № 2 – Y; Состав № 3 – Co-Ni-Cr-Al-Y. Покрытия наносили газопламенным методом на специально подготовленные образцы. В табл. 1 представлено содержание иттрия в лигатуре и на этапах изготовления и нанесения покрытия.

Таблица 1
Содержание иттрия в (% мас.)

	Лигатура	Шихта	Покрытие
Состав №1	18,4	0,3	0,3
Состав №2	99	2,3	2,1
Состав №3	0,7	0,1	0,1

Для проведения испытаний на жаростойкость, специально подготовленные образцы предварительно обезжировали и взвешивали на аналитических весах. Образцы покрытий различных составов выдерживали в печи на воздухе при температуре 1100 °С с выдержкой в течение 50 и 100 часов. После испытаний образцы взвешивали, что позволило получить относительные показатели жаростойкости на основании сравнительной оценки изменения массы (привеса) до и после испытаний.

Для того чтобы установить особенности структурообразования в покрытиях под действием высоких температур был определен фазовый состав покрытий до начала высокотемпературного воздействия и после выдержки в течение 50 и 100 часов. Определение фазового состава проводили рентгеноструктурным методом в медном излучении на модернизированном дифрактометре ДРОН, оснащенном микропроцессорным модулем. Наличие управляющей специализированной программы позволило эффективно проводить обработку и анализ дифрактограмм, что повысило чувствительность выявления

фаз, присутствующих в небольших количествах в исследуемых образцах.

Монохроматизация дифракционных отражений осуществлялась при помощи монохроматора, установленного перед сцинтилляционным счетчиком для фильтрации β – излучения. Дифрактограммы снимали в диапазоне углов отражения в интервале 11°...75°.

Качественный фазовый состав структурных составляющих проводили по стандартной методике [9] путем сравнения расчетных экспериментальных значений межплоскостных расстояний d_{HKL} со справочными данными [10, 11]. Достоверность полученных результатов подтверждалась анализом соответствующих диаграмм состояния двойных систем [12] с учетом химического состава шихтовых материалов и покрытия.

2. Анализ полученных результатов

Полученные данные показали, что наиболее стойкими к газовой коррозии оказались покрытия, в которые была введена комплексная лигатура Co-Ni-Cr-Al-Y и чистый иттрий (рис. 1). контакта с окислительной средой.

Как видно из рис. 1 сопротивление газовой коррозии покрытий Составов № 2 и № 3 более высокое в сравнении с базовым составом. Установлено, что процессы окисления, вероятно, довольно активно проходят в первые 50 часов испытаний, далее скорость образования продуктов коррозии значительно снижается. Для установления особенностей структурообразования в окислительной среде был проведен фазовый анализ поверхностного слоя покрытий, с целью определения влияния легирующих элементов на интенсивность формирования продуктов высокотемпературной коррозии. Установлено, что в процессе выдержки 50 и 100 часов в покрытиях существенно изменяется фазовый состав в количественном и качественном соотношении. По сравнению с исходным состоянием, уменьшается количество никеля и нитрида бора. Происходит окисление никеля с образованием оксида никеля. Нитрид бора интенсивно окисляется уже при температуре 700 °С с образованием оксида B_2O_3 [16]. Оксид иттрия Y_2O_3 значительно превышает содержание этой фазы в исходном состоянии, при этом линии иттрия ослабевают уже при выдержке 50 часов, т.е. окисление иттрия происходит более ускоренно, чем окисление никеля и нитрида бора. При увеличении содержания хрома (Состав № 3) увеличивается количество двойного оксида $NiCr_2O_4$ при уменьшении количества фазы NiO. После высокотемпературных испы-

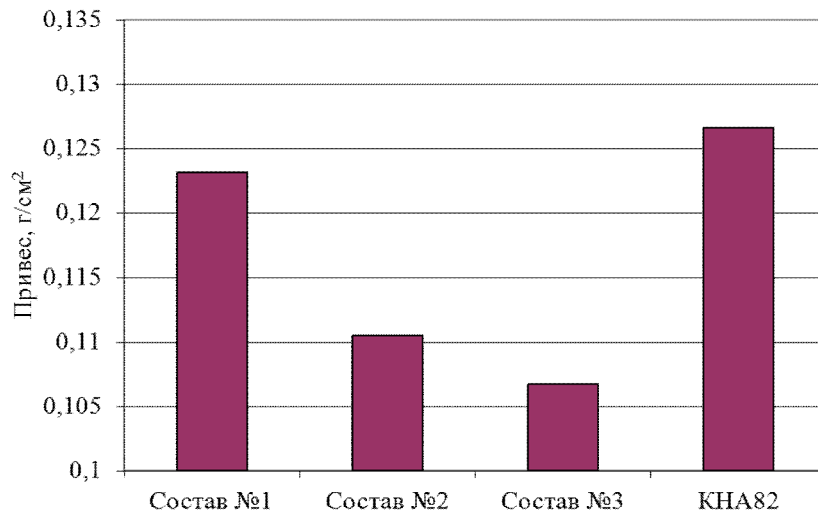


Рис. 1. Изменение массы образцов после 100 часов выдержки при температуре 1100 °С

таний фазы Ni_2Si , NiAl и Ni_5Y сохраняются в покрытии в небольшом количестве, как и в исходном состоянии.

В процессе окисления на поверхности образцов формировалась пленка из оксида NiO , который является стабильным и обладает некоторыми защитными свойствами, т.к. довольно плотный. Эта пленка вероятнее всего является верхним слоем покрытия, а под ней формируются другие оксиды.

Шпинель NiCr_2O_4 является довольно стойкой оксидной фазой и ее формирование на поверхности покрытия должно приводить к снижению скорости газовой коррозии. Однако авторы [4] считают, что они снижают адгезию оксидов с металлическим слоем, что может приводить к ускорению разрушения покрытия. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что данная шпинель в комплексе приводит к увеличению сопротивления покрытия высокотемпературной газовой коррозии. Пленка оксида Al_2O_3 , которая формируется в процессе окисления, обладает высокой плотностью (скорость диффузии катионов через нее достаточно низка) и, тем самым, хорошо защищает поверхность покрытия от дальнейшего негативного воздействия коррозионной среды при повышенной температуре. Причем формирование оксидной пленки такого типа предотвращает схватывание между покрытием и контртелом [13]. Однако, после длительного воздействия агрессивной высокотемпературной среды адгезия оксидных пленок и основного материала покрытия значительно снижается, что приводит к их разрушению и активизации процесса газовой коррозии. Введение в покрытие иттрия позволяет увеличить адгезию с покрытием и пластичность пленки, тем самым, снизив скорость разрушения покрытия. Фор-

мирование оксидов Y_2O_3 улучшает защитные свойства оксидной пленки и обеспечивает ее адгезию с основным материалом покрытия. В работе [4] авторы показали, что наличие оксида Y_2O_3 значительно повышает сопротивление газовой коррозии. Кроме того введение в покрытие иттрия приводит к снижению активности кислорода в поверхностном слое и формированию оксидной пленки Y_2O_3 , которая выполняет роль барьера при окислении.

Кроме того, вклад в разрушение покрытий в процессе длительного теплового разрушения вносит различие температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) фаз образовавшихся в процессе окисления и, вследствие этого, формирование напряжений на поверхности и растрескивания сформированной оксидной пленки. В работе [14] авторы отмечают положительную роль оксидов Y_2O_3 и Al_2O_3 , имеющих плавное изменение значения ТКЛР по толщине, от значений для оксидов на поверхности до значений для матрицы, что предотвращает растрескивание.

Исследование поверхности покрытий после высокотемпературного испытания позволило установить, что в процессе окисления на поверхности формируются частицы различной морфологии и химического состава (рис. 2). Покрытия Составов № 2, № 3 и КНА82 имеют различную морфологию и степень дисперсности оксидных включений. В покрытии КНА82 частицы имеют крупную остроугольную форму с хаотичным некомпактным распределением в напыленном слое. Такая морфология и характер распределения частиц негативно сказывается на работоспособности покрытия, в связи с повышенной вероятностью образования трещин при наличии остроугольных концентраторов напряже-

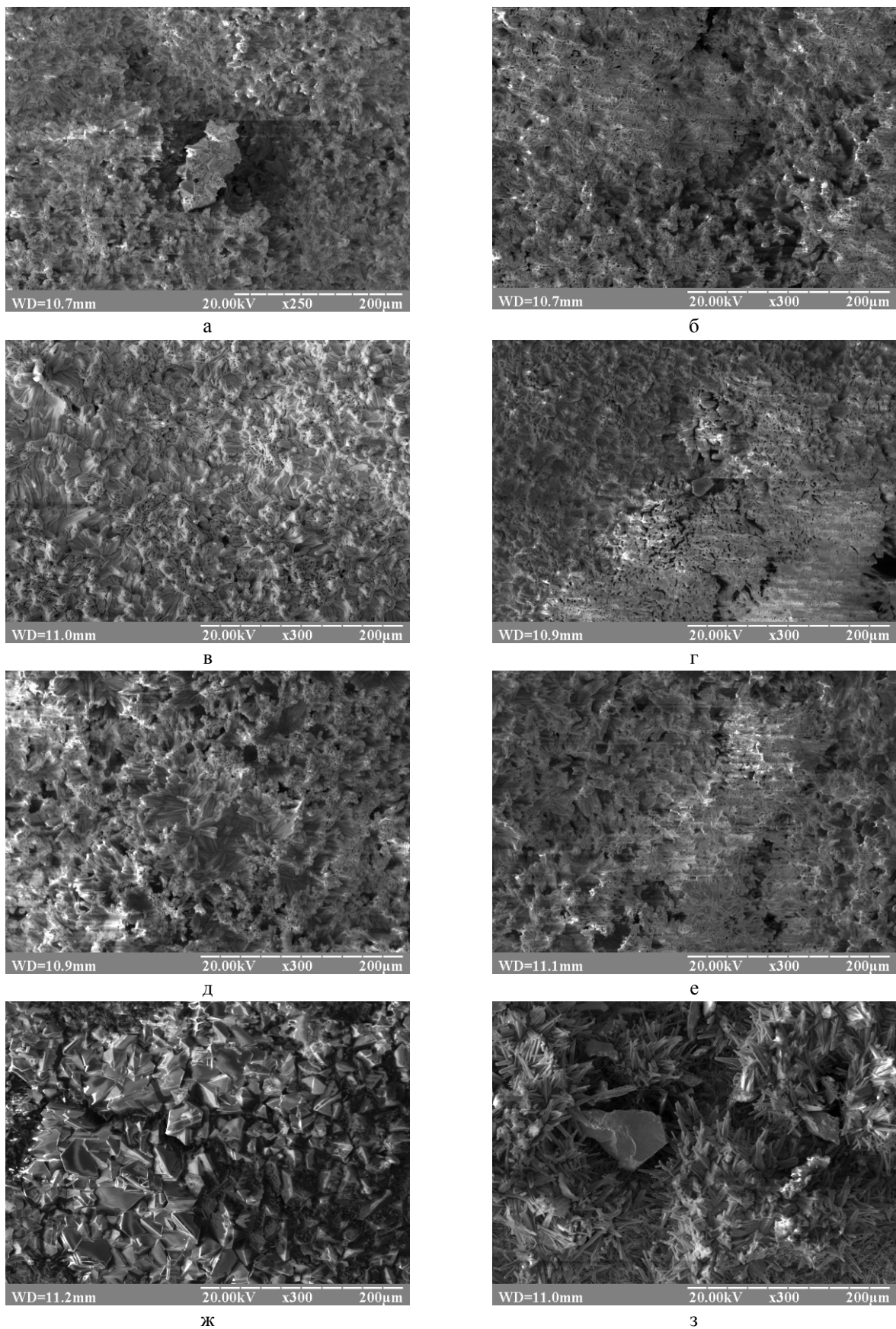


Рис. 2. Внешний вид покрытия после выдержки 100 ч при температуре 1100 °С:
 а, б – Состав № 1; в, г – Состав № 2; д, е – Состав № 3; ж, з – КНА82

ний и нарушения сплошности оксидной пленки по причине неплотного прилегания частиц оксидной фазы.

Применение лигатуры в Составах № 2 и № 3, по видимому, способствует формированию в слое в процессе нанесения покрытия большого количества центров, которые являются подложкой для образования мелкодисперсных оксидных включений уже в процессе длительной выдержки при 1100 °С с компактным расположением в слое.

Заключение

Таким образом, для повышения жаростойкости необходимо использовать покрытия содержащие иттрий. Нанесение покрытия с использованием Составов № 2 и № 3, которое способствует формированию мелкодисперсных включений оксидной фазы Y_2O_3 и шпинели $NiCr_2O_4$ должно приводить к повышению эксплуатационной надежности деталей ГТД в связи с обеспечением более высокой жаростойкости и адгезионной прочности сцепления покрытия с матрицей.

Литература

1. Каблов, Е. Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века [Текст] / Е. Н. Каблов // Перспективные материалы. – 2000. – № 3. – С. 27-40
2. Бондарчук, П. В. Разработка методики расчёта системы управления радиальными зазорами в турбине ГТД [Текст] / П. В. Бондарчук, А. Ю. Тисарев, М. В. Лаврушин // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3 (34). – С. 272-278.
3. Иноземцев, А. А. Вопросы оптимизации радиальных зазоров ТВД авиационного ГТД [Текст] / А. А. Иноземцев, С. В. Бажин, М. А. Снитко // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 2. – С. 149-154.
4. Абраимов, Н. В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин [Текст] / Н. В. Абраимов. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с.
5. Никитин, В. И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин [Текст] / В. И. Никитин. – Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. – 272 с.
6. Влияние жаростойкого покрытия на деградацию микроструктуры сплава ЖС6У [Текст] / Н. И. Афанасьев, Л. С. Бушнев, М. К. Касымов и др. // Изв. вузов. Сер. Физика. – 1986. – № 12. – С. 109-111.
7. Разработка состава теплозащитного покрытия на детали газотурбинных двигателей, работающих в условиях высоких температур [Текст] / Е. Г. Сотников, З. В. Леховицер, В. Л. Грешта и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10 (127). – С. 6–10.

8. Исследование фазового состава жаростойких уплотнительных покрытий, применяемых в ГТД [Текст] / В. Л. Грешта, Д. В. Ткач, А. В. Климов и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 8 (135). – С. 113–121.

9. Русаков, А. А. Рентгенография материалов [Текст] / А. А. Русаков. – М. : Атомиздат, 1977. – 480 с.

10. Миркин, Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов [Текст] / Л. И. Миркин. – М. : Гос. изд-во физ. мат. литературы, 1961. – 863 с.

11. Миркин, Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов [Текст] : справочник / Л. И. Миркин. – М. : Машиностроение, 1979. – 134 с.

12. Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст] : справ. ; под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1996. ; в 3 т. : Т.1-3 –Т.1 - 992 с., Т.2 – 1024 с., Т.3. – кн.1. – 872 с., Т.3. – кн.2. – 448 с.

13. Влияние состава покрытий на основе интерметаллидов никеля на механизмы их изнашивания в условиях высокотемпературных трибоиспытаний [Текст] / А. П. Уманский, Е. Н. Полярус, А. Д. Костенко и др. // Проблемы трибологии. – 2012. – № 3. – С. 123-127

14. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД [Текст] / В. А. Барвинок, И. Л. Шитарев, В. И. Богданович и др. // Вестник СГАУ. – Вып. 3 (19). – 2009. – С. 11-28

15. Андриенко, А. Г. Исследование влияния соотношения тантала и рения на высокотемпературную коррозионную стойкость жаропрочного никелевого сплава ЖС-32 [Текст] / А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов и др. // Современная электрометаллургия. – 2009. – № 4. – С. 36-39.

16. Войтович, Р. Ф. Окисление карбидов и нитридов [Текст] / Р. Ф. Войтович. – К. : Наук. думка, 1981. – 192 с.

References

1. Kablov, E. N. Osnovnyie napravleniya razvitiya materialov dlya aviakosmicheskoy tehniky XXI veka [The main directions of development of materials for aerospace equipment of the XXI century]. *Perspektivnyie materialyi.*, 2000, no. 3, pp. 27-40.
2. Bondarchuk, P. V., Tisarev, A. Yu., Lavrushin M. V. Razrabotka metodiki raschYota sistemyi upravleniya radialnyimi zazorami v turbine GTD [Development of a methodology for calculating the control system for radial clearances in the turbine]. *Vestnik SGAU*, 2012, no. 3 (34), pp. 272-278.
3. Inozemtsev, A. A., Bazhin, S. V., Snitko, M. A. Voprosyi optimizatsii radialnyih zazorov TVD aviatsionnogo GTD [Questions of optimization of radial

clearances of the TSE of aviation GTE]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2012, no. 2, pp. 149-154.

4. Abraimov, N. V. *Vysokotemperaturnnye materialy i pokryitiya dlya gazovykh turbin* [High-temperature materials and coatings for gas turbines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 336 p.

5. Nikitin, V. I. *Korroziya i zaschita lopatok gazovykh turbin* [Corrosion and protection of gas turbine blades]. Leningrad, Mashinostroenie Publ. Leningradskoe otdelenie, 1987. 272 p.

6. Afanasev, N. I. Bushnev, L. S., Kasyimov M. K. Vliyanie zharostoykogo pokryitiya na degradatsiyu mikrostrukturyi splava ZhS6U [The influence of heat-resistant coating on the degradation of the microstructure of the ZhS6U alloy]. *Izv. vuzov. Ser. Fizika*, 1986, no. 12, pp. 109-111.

7. Sotnikov, E. G., Lehovitser, Z. V., Gresha, V. L., Klimov, A. V., Tkach, D. V. Razrabotka sostava teplozaschitnogo pokryitiya na detali gazoturbinnnykh dvigateley, rabotayuschih v usloviyakh vysokih temperatur [Development of the composition of a heat-shielding coating on a part of gas turbine engines operating at high temperatures]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 10 (127), pp. 6-10.

8. Gresha, V. L., Tkach, D. V., Klimov, A. V., Sotnikov, E. G., Lehovitser, Z. V., Stepanova, L. P. Issledovanie fazovogo sostava zharostoykikh uplotnitelnykh pokryitiy, primenyaemykh v GTD [Investigation of the phase composition of heat-resistant sealing coatings used in GTE]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2016, no. 8. (135), pp. 113-121.

9. Rusakov, A. A. *Rentgenografiya materialov* [Radiography of materials]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. 480 p.

10. Mirkin, L. I. *Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristallov* [Handbook of X-ray diffraction analysis of polycrystals]. Moscow, Gos. izdvo fiz. mat. literatury, 1961. 863 p.

11. Mirkin, L. I. *Rentgenostrukturnyy kontrol mashinostroytelnykh materialov. Spravochnik*. [X-ray structural inspection of machine-building materials. Directory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 134 p.

12. Lyakisheva, N. P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskikh sistem* [Diagrams of the state of double metal systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996. vol. 1, 992 p., vol. 2, 1024 p., vol. 3, no. 1. 872 p., vol. 3, no. 2. 448 p.

13. Umanskiy, A. P., Polyarus, E. N., Kostenko, A. D., Terentev, A. E. Vliyanie sostava pokryitiy na osnove intermetallidov nikelya na mekhanizmy ih iznashivaniya v usloviyakh vysokotemperaturnnykh triboispytaniy [Effect of the composition of coatings on the basis of nickel intermetallics on the mechanisms of their wear during high-temperature tribological tests]. *Problemi tribologiyi*, 2012, no. 3, pp. 123-127

14. Barvinok, V. A., Shitarev, I. L., Bogdanovich, V. I. Sbratyvaemye, iznosostoykie i teplozaschitnye pokryitiya dlya detaley gazovogo trakta turbiny, kompressora i kamery sgoraniya GTD [Wearable, wear-resistant and heat-shielding coatings for parts of the gas path of the turbine, compressor and combustion chamber GTD]. *Vestnik SGAU*, 2009, no. 3 (19), pp. 11-28/

15. Andrienko, A. G., Gayduk, S. V., Kononov, V. V., Malashenko, I. S. Issledovanie vliyaniya sootnosheniya tantala i reniya na vysokotemperaturnuyu korrozionnuyu stoykost zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS-32 [Investigation of the influence of the ratio of tantalum and rhenium on the high-temperature corrosion resistance of the high-temperature nickel alloy ZhS-32]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2009, no. 4, pp. 36-39

16. Voitovich, R. F. *Okyslenye karbydov y nytrydov* [Oxidation of carbides and nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 192 p.

Поступила в редакцию 14.03.2017, рассмотрена на редколлегии 9.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. машин и технологий литейного производства, проректор по научной работе В. В. Наумик, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЖАРОСТІЙКОГО ТЕПЛОЗАХИСНІ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ЇХ ЛЕГУВАННЯ КОМБІНОВАНІ ЛІГАТУРИ

В. О. Богуслаєв, П. Д. Жеманюк, В. Л. Грешта, Є. Г. Сотніков, З. В. Леховіцер, Д. В. Ткач, Л. П. Степанова, О. В. Климов

У роботі проведена оцінка характеру впливу легування комбінованими лігатурами, що містять ітрії, в тому числі, з підвищенням вмістом Cr, Co і Al на жаростійкість ущільнювальних покриттів. Встановлено, що високий опір газовій корозії мали покриття, в які була введена комплексна лігатура Co-Ni-Cr-Al-Y і чистий ітрії. Фазовий аналіз поверхневого шару покриттів дозволив припустити, що формування оксидів Y_2O_3 і шпінелі $NiCr_2O_4$ підвищує захисні властивості оксидної плівки і забезпечує більш високу її адгезію з основним матеріалом покриття. Крім того, оксиди, що формуються в процесі високотемпературних випробувань мають значення температурного коефіцієнта лінійного розширення, що плавно змінюються по відношенню до матриці, що запобігає розтріскуванню.

Ключові слова: жаростійкість, ущільнювальні покриття, ітрії, оксиди.

**RESEARCH OF HEAT-RESISTANT HEAT PROTECTIVE SEALING COATINGS
WHEN ALLOYING THEM WITH COMBINED LIGATURES**

*V. A. Boguslaev, P. D. Zhemanyuk, V. L. Greshta, E. G. Sotnikov, Z. V. Lekhovitser,
D. V. Tkach, L. P. Stepanova, A. V. Klimov*

In the paper the nature of the effect of alloying with combined yttrium-containing ligatures, including the ones with high content of Cr, Co, and Al, on the heat resistance of sealing coatings has been assessed. It has been found out that high resistance to gas corrosion is provided by the coatings into which the complex Co-Ni-Cr-Al-Y master alloy and pure yttrium were introduced. Phase analysis of the surface layer of the coatings suggested that the formation of Y_2O_3 oxides and $NiCr_2O_4$ spinel increases the protective properties of the oxide film and ensures its higher adhesion to the base coating material. Besides, the oxides formed during the high-temperature test have smoothly varying values of the temperature coefficient of linear expansion with respect to the matrix, which prevents cracking.

Keywords: heat resistance, sealing coating, yttrium, oxides.

Богуслаев Вячеслав Александрович – д-р техн. наук, проф., президент АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Жеманюк Павел Дмитриевич – канд. техн. наук, технический директор АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Грешта Виктор Леонидович – канд. техн. наук, проф. каф. физического материаловедения Запорожского национального технического университета, Украина.

Сотников Евгений Георгиевич – начальник цеха №3 АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Леховицер Зоя Васильевна – канд. техн. наук, доцент, начальник бюро отдела главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Ткач Дарья Владимировна - канд. техн. наук, доц. каф. физического материаловедения Запорожского национального технического университета, Украина, e-mail: odarka_ua@hotmail.com.

Степанова Любовь Петровна - канд. техн. наук, доц., доц. каф. физического материаловедения Запорожского национального технического университета, Украина.

Климов Александр Владимирович - канд. техн. наук, декан инженерно-физического факультета Запорожского национального технического университета, Украина.

Boguslaev Vyacheslav Alexandrovich – Doctor of Technical Science, President of JSC "MOTOR SICH", Zaporizhzhya, Ukraine.

Zhemanyuk Pavel Dmitrievich – Candidate of Technical Science, Technical Director of JSC "MOTOR SICH", Zaporizhzhya, Ukraine.

Greshta Viktor Leonidovich – Candidate of Technical Science, Professor of Dept. of Physical materials science, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine.

Sotnikov Eugene Georgievich – head of the shop №3 JSC "Motor Sich", Zaporizhzhya, Ukraine.

Lekhovitser Zoya Vasilevna – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head Office department chief metallurgist JSC "Motor Sich", Zaporizhzhya, Ukraine.

Tkach Daria Vladimirovna – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Physical materials science, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, e-mail: odarka_ua@hotmail.com

Stepanova Lyubov Petrovna – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Physical materials science, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine.

Klimov Aleksandr Vladimirovich – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Dean of Engineering Physics Faculty, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine.