

УДК 621.793.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРУ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Y-Al-O

А. М. ХУСАИНОВА¹, А. Ю. НАЗАРОВ², В. Р. МУХАМАДЕЕВ³

¹ahusainova@bk.ru, ²nazarov_almaz15@mail.ru, ³vener_muhamadeev@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В данной статье были синтезированы покрытия системы Y-Al-O на подложке из молибдена вакуумно-дуговым осаждением при трех различных режимах, для обеспечения различного стехиометрического состава, с последующей термообработкой при 1200°C. Проведенный рентгеноструктурный анализ показал образование таких фаз, как $YAlO_3$, $Y_4Al_2O_9$, $Y_3Al_5O_{12}$, Y_2O_3 . Структура и химический состав покрытий изучена методами растровой электронной микроскопии.

Ключевые слова: покрытия, термобарьерные покрытия, Y-Al-O, вакуумно-дуговое осаждение, фазовый состав, термообработка, YSZ, ГТД, плазменная обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей (ГТД) необходимо увеличивать температуру рабочего газа, что приводит к окислению, газовой коррозии и термоусталостному разрушению деталей, составляющих горячую секцию турбины. [1,2] В большинстве случаев, такие детали изготавливают из никелевых жаропрочных сплавов. Рабочая температура указанных сплавов достигает 1050–1100 °С. [3,4,5,6].

Для защиты наиболее нагруженных деталей ГТД от воздействия высоких температур и агрессивной газовой среды наносят защитные покрытия. Такие покрытия имеют двухслойную структуру: верхний - керамический слой, защищает от воздействия высоких температур, в качестве второго слоя выступает связующее покрытие, которое защищает поверхность детали от окисления и сглаживает разницу термического расширения между верхним слоем, состав которого может состоять из (*PtNiAl*) или *MCrAlY* (15-25 мас. % Cr; 10-15 мас. % Al; 0,2-0,5 мас. % Y; матрица *M-yNi* или *Co*). [7,8] На сегодняшний день в качестве керамического слоя наиболее широкое применение получило покрытие на основе оксида циркония, легированного иттрием (YSZ).

Покрытие на основе YSZ имеет ряд преимуществ перед другими термобарьерными покрытиями: коэффициентом удельной теплопроводности при повышенной температуре $\leq 2,3$ Вт/(м·К) при 1000°C, коэффициент температурного линейного расширения $11 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, что способствует снижению напряжений, в результате воздействия которых происходит откол керамики. Основным недостатком является то, что рабочая температура покрытия 1200°C при более высоких температурах теряет фазовую стабильность, что приводит к спеканию и окислению и последующему разрушению [9,10,11].

Литературный обзор показал, что алюминаты иттрия имеют коэффициент теплопроводности ниже, чем у YSZ, обладают лучшей фазовой стабильностью при температурах выше 1200°C и умеренным коэффициентом теплового расширения, что делает их перспективными вариантами для замены покрытия на основе YSZ [12,13,14].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вакуумно-дуговым методом покрытия напыляли на установке ННВ-6.6 И1 при одновременном осаждении из двух электродуговых испарителей с различными катодами из Y и Al на подложку из молибдена. Были подобраны три режима, для получения различного стехиометрического состава. (таблица 1). Далее образцы подвергались термообработке в вакуумной печи.

Таблица 1

Сравнительный анализ параметров

№ образца	Режим напыления	Режим термообработки
1	$U=180В, I_{Al}=80А, I_Y=60А$	Без термообработки
1.1	$U=180В, I_{Al}=80А, I_Y=60А$	1200°C в течение 1 часа
2	$U=180В, I_{Al}=60А, I_Y=60А$	Без термообработки
2.1	$U=180В, I_{Al}=60А, I_Y=60А$	1200°C в течение 1 часа
3	$U=180В, I_{Al}=60А, I_Y=80А$	Без термообработки
3.1	$U=180В, I_{Al}=60А, I_Y=80А$	1200°C в течение 1 часа

Анализ структуры и химический состав покрытия проводили на растровом электронном микроскопе модели *JEOL-JSM-6490LV*. Фазовый состав исследовали методом рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра *Shimadzu XRD-7000S*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структуры исследуемых образцов были изучены на растровом электронном микроскопе. На образцах до термообработки видна сплошная структура покрытия, а также подслои из Y - Al , наносимый для улучшения адгезии. Только на образце №3 наблюдаются трещины в структуре. На образце №1 наблюдается равномерное распределение иттрия и алюминия, на образцах №1 и №2 количество иттрия больше, на образце №2 количество алюминия к поверхности резко увеличивается. (рис. 1).

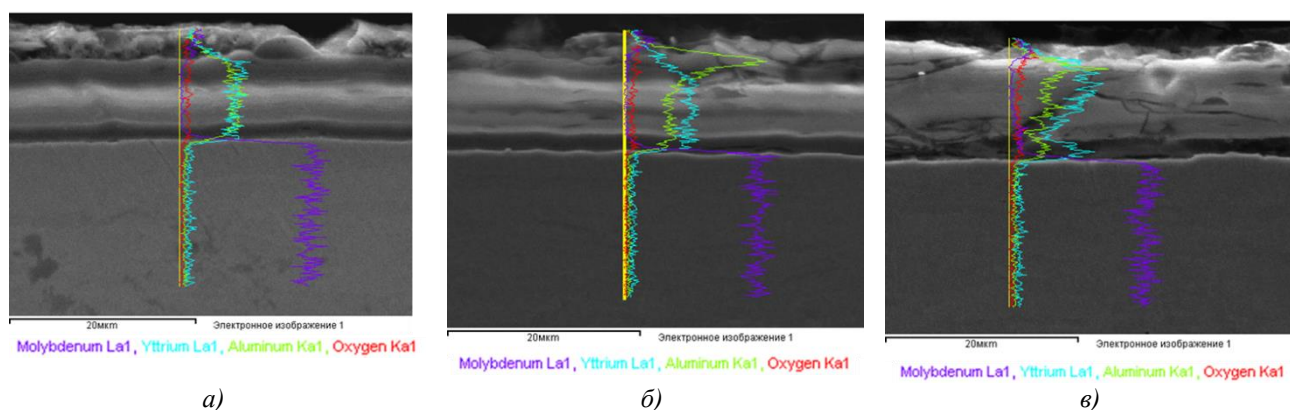


Рис. 1. Структура образцов до термообработки:
а) образец №1; б) образец №2; в) образец №3.

После термообработки при 1200°C покрытие не разрушилось. На образце №3.1 наблюдается диффузионный слой на границе раздела «покрытие подложка, содержащий молибден и иттрий, а также редкие несплошности. На образце №1.1 образовались поры. Распределение элементов по глубине стало равномерным, резких пиков не наблюдается, при одинаковых токах количества алюминия меньше, чем иттрия. При различных токах количество элементов распределилось примерно одинаково (рис. 2).

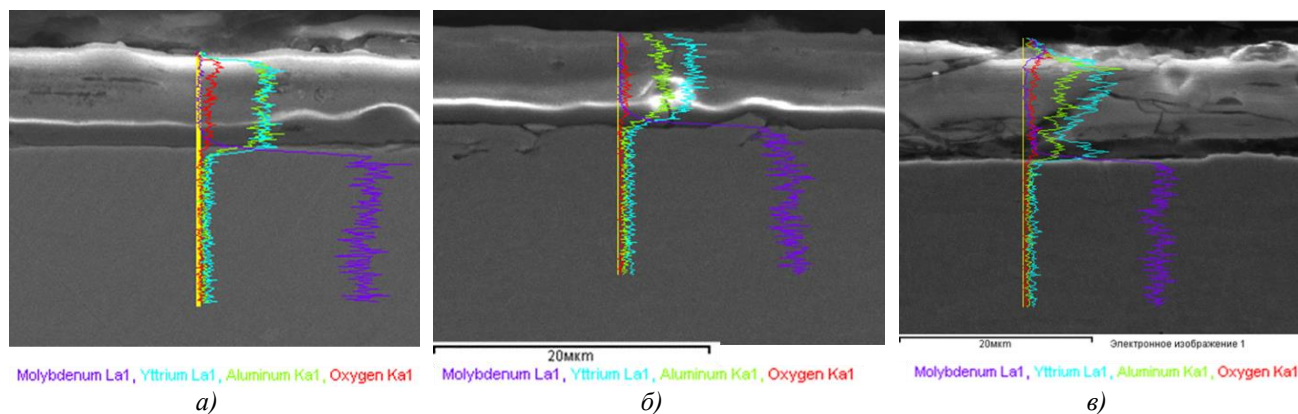


Рис. 2. Структура образцов после термообработки при 1200°C:

а) образец №1.1; б) образец №2.1; в) образец №3.1.

До воздействия температуры покрытия имели аморфную структуру, на дифрактограмме различимы рефлексы алюминия, оксида Y_2O_3 и интерметаллида YAl_2 , который наносили для улучшения адгезии. (рис. 3).

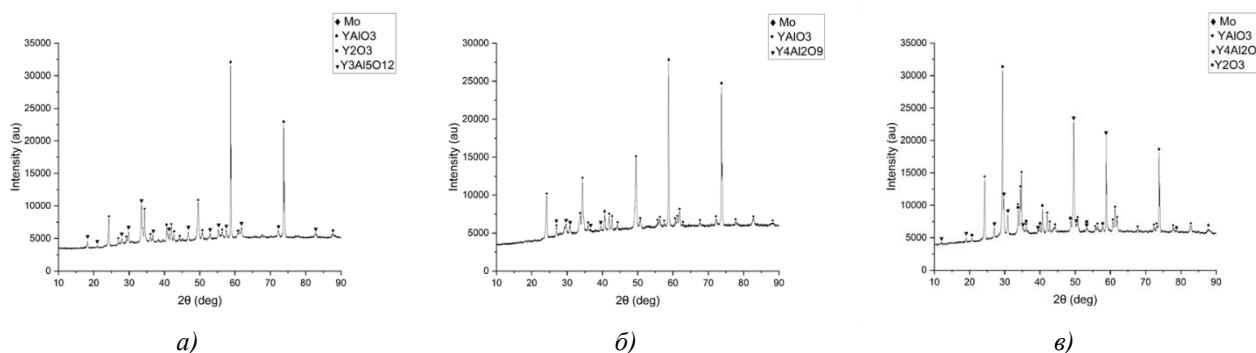


Рис. 3. Фазовый состав:

а) образец №1.1; б) образец №2.1; в) образец №3.1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе методом вакуумно-дугового осаждения были синтезированы покрытия на основе системы $Y-Al-O$ при различных режимах. Был проведен рентгенофазовый анализ, по результатам которого можно сказать, что после осаждения покрытия имели аморфную структуру, на дифрактограмме видны пики: Al , Y_2O_3 , YAl_2 . После термообработки покрытия полностью кристаллизовались и образовались следующие фазы: $YAlO_3$, $Y_4Al_2O_9$, $Y_3Al_5O_{12}$, Y_2O_3 . На образце с покрытием, полученным при первом режиме напыления, наблюдается рефлексы сложного оксида $Y_3Al_5O_{12}$. На полученных РЭМ изображениях до термообработки покрытия, полученные при 1 и 2 режиме имеют сплошную структуру, без трещин, а на образце с покрытием, полученным при 3 режиме, наблюдаются трещины. После термообработки покрытия не отслоились, но на образце № 1 образуются поры, а на образце №3 покрытие становится сплошным, без трещин и отслоений, а также наблюдает диффузия подслоя покрытия в подложку. Также наблюдается равномерное распределение элементов по глубине.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чубаров Д.А., Будиновский С.А. Влияние высокотемпературных испытаний на микроструктуру керамического слоя теплозащитного покрытия // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 1(145). – С. 30-34. [D.A. Chubarov, S.A.

Budinovskiy. The effect of high-temperature tests on the microstructure of the ceramic layer of a heat-protective coating / *Hardening technologies and coatings*, 2017. 1(145). pp. 30-34.]

2. **Зоричев А. В.** Применение перспективных керамических теплозащитных покрытий рабочих лопаток турбины авиационных газотурбинных двигателей // *Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук*. – 2018. – Т. 12, № S1. – С. 41-44. [A.V. Zorichev. Application of advanced ceramic heat-protective coatings of turbine blades of aviation gas turbine engines / *Actual problems of humanities and socio-economic sciences*, 2018. v. 12, № s1. pp. 30-34.]

3. **Ситников И.В., Максимов Д.А., Батраков В.Н., Боронников Ю.А.** Разработка жаростойкого термобарьерного покрытия для деталей ГТД и ГТУ // *Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника* – 2022. – № 68. – С. 5-10. [I.V. Sitnikov, D.A. Maksimov, V.N. Batrakov, Yu.A. Boronnikov. Development of heat-resistant thermal barrier coating for GTE and GTU parts / *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*. 2022. 68. pp. 5-10]

4. **Zhang, Zhiwei & Fu, Qiang & Wang, Jun & Yang, Rong & Xiao, Pan & Ke, Fujui & Lu, Chunsheng.** Atomistic modeling for the extremely low and high temperature-dependent yield strength in a Ni-based single crystal superalloy // *Materials Today Communications*. 27.

5. **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. <https://doi.org/10.3390/app10165476>.

6. **Robert Vaßen, Maria Ophelia Jarligo, Tanja Steinke, Daniel Emil Mack, Detlev Stöver.** Overview on advanced thermal barrier coatings // *Surface and Coatings Technology*, Volume 205, Issue 4, 2010, Pages 938-942.

7. **Qiaomu Liu, Shunzhou Huang, Aijie He,** Composite ceramics thermal barrier coatings of yttria stabilized zirconia for aero-engines, *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 35, Issue 12, 2019, Pages 2814-2823.

8. **Feuerstein A., Knapp J., Taylor T., Ashary A., Bolcavage A., and Hitchman N.** Technical and Economical Aspects of Current Thermal Barrier Coating Systems for Gas Turbine Engines by Thermal Spray and EB-PVD: A Review, *J. Therm. Spray Technol.*, 2008, 17(2), p 199-213.

9. **Mengchuan Shia, Zhaolu Xuea, Zhenya Zhangc, Xiaojuan Jid, Eungsun Byonc, Shihong Zhanga,b.** Effect of spraying powder characteristics on mechanical and thermal shock properties of plasma-sprayed YSZ thermal barrier coating // *Surface & Coatings Technology* Volume 395, 2020, 125913.

10. **Kadir Mert Doleker, Abdullah Cahit Karaoglanli, Yasin Ozgurluk, Akira Kobayashi.** Performance of single YSZ, Gd₂Zr₂O₇ and double-layered YSZ/Gd₂Zr₂O₇ thermal barrier coatings in isothermal oxidation test conditions // *Vacuum*, Volume 177, 2020

11. **Xiaolong Chen, Yiwei Sun, Dexin Chen, Jie Li, Wei Li, Dahai Zeng, Duoli Wu, Binglin Zou, Xueqiang Cao.** A comparative investigation on the corrosion degradation of plasma sprayed YSZ and LnMgAl₁₁O₁₉ (Ln = Nd, Sm, Gd) coatings exposed to the molten V₂O₅ + Na₂SO₄ salt mixture at 1100 °C // *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 39, Issue 13, 2019.

12. **Zhan, Xun & Li, Zhen & Liu, Bin & Wang, Jingyang & Zhou, Yanchun & Hu, Zijun. (2012).** Theoretical Prediction of Elastic Stiffness and Minimum Lattice Thermal Conductivity of Y₃Al₅O₁₂, YAlO₃ and Y₄Al₂O₉. *Journal of the American Ceramic Society*. 95. 1429. 10.1111/j.1551-2916.2012.05118.x.

13. **Matzen, Caren & Mack, Daniel & Guillon, Olivier & Vaßen, Robert. (2019).** YAlO₃—A Novel Environmental Barrier Coating for Al₂O₃/Al₂O₃—Ceramic Matrix Composites. *Coatings*. 9. 609. 10.3390/coatings9100609.

14. **Almomani, Mohammed Ali et al.** Thermal shock resistance of yttrium aluminium oxide Y₃Al₅O₁₂ thermal barrier coating for titanium alloy. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 14 (2020): 6514-6525.

ОБ АВТОРАХ

ХУСАИНОВА Алина Мансуровна, магистрант кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия.

НАЗАРОВ Алмаз Юнирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия.

МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович, старший преподаватель кафедры «Механики и цифрового проектирования» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия.

METADATA

Title: Investigation of the effect of heat treatment on the phase composition and coating structure of the Y-Al-O system.

Authors: A. M. Khusainova¹, A. Yu. Nazarov², V. R. Mukhamadeev³

Affiliation: Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ahusainova@bk.ru, ²nazarov_almaz15@mail.ru, ³vener_muhamadeev@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (30), pp. 109-113, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: In this article, coatings of the Y-Al-O system on a molybdenum substrate were obtained by vacuum arc deposition under three different modes to ensure different stoichiometric composition, followed by heat treatment at 1200°C. X-ray diffraction analysis was performed, which showed that the following phases were formed: YAlO₃, Y₄Al₂O₉, Y₃Al₅O₁₂, Y₂O₃. The structure and chemical composition of the coatings were studied using a scanning electron microscope.

Key words: coatings, thermal barrier coatings, Y-Al-O, vacuum arc deposition, phase composition, heat treatment, YSZ, GTE, plasma treatment.

About authors:

KHUSAINOVA Alina Mansurovna, master's student of Department of Mechanical Engineering of Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.

NAZAROV Almaz Yunirovich, Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.

MUKHAMADEEV Vener Rifkatovich, Senior Lecturer at the Department of Mechanics and Digital Design, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.