

Received: 14.03.2021

Revised: 16.04.2021

Accepted: 23.04.2021

DOI: 10.17804/2410-9908.2021.2.006-021

EROSION RESISTANCE OF A COMBINED MULTILAYER COATING PROTECTING CRITICAL PARTS OF MODERN GAS TURBINE ENGINES



B. N. Guzanov^{1, a)}, N. B. Pugacheva^{2, b)}, T. M. Bykova^{2, c)}*



¹Russian State Vocational Pedagogical University,



11 Mashinostroiteley St., Ekaterinburg, 620012, Russian Federation

²Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

a)  <http://orcid.org/0000-0001-5698-0018>  guzanov_bn@mail.ru;

b)  <http://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  nat@imach.uran.ru;

c)  <http://orcid.org/0000-0002-8888-6410>  tatiana_8801@mail.ru

*Corresponding author. E-mail: tatiana_8801@mail.ru

Address for correspondence: 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

Tel.: +7 (343) 362 30 43; fax: +7 (343) 374 53 30

Comprehensive studies of the chemical composition, microstructure, and thickness of a combined multilayer coating on a heat-resistant nickel alloy are presented. The distribution pattern of chemical elements over the coating thickness for all the layers, namely the inner aluminosilicated layer, the plasma sublayer, and the outer heat-insulating layer, has been established. Surface roughness was determined at all the stages of coating application and after testing.

The results of comparative tests of corrosion-erosion resistance and resistance to burn-through of a diffusion aluminosilicide coating, a two-layer heat-insulating coating, and a combined multilayer coating are presented. High heat-shielding properties of a combined multilayer coating on a heat-resistant nickel alloy have been discovered.

Keywords: steel, coating, microstructure, roughness, microhardness, erosion resistance.

Acknowledgment

The research used the facilities of the Plastometriya shared access center at the IES UB RAS. It was performed according to the state assignment on theme No. AAAA-A18-118020790145-0.

References

1. Babkin V.I., Tskhovrebov M.M., Solonin V.I., Lanshin A.I. Development of aviation gas turbine engines and the creation of unique technologies. *Engine*, 2013, No. 2 (86), pp. 2–7. (In Russian).
2. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Reinforcing Protective Coatings in Mechanical Engineering]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2004, 244 p. ISBN: 5-7691-1405-3. (In Russian).
3. Kositsyn S.V. *Splavy i pokrytiya na osnove monoaluminida nikelya* [Alloys and Coatings Based on Nickel Monoaluminide]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2008, 377 p. (In Russian).
4. Muboyadzhan S.A., Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P. *Kompleksnyye zashchitnye pokrytiya turbinykh lopatok aviatsionnykh GTD* [Complex protective coatings for turbine blades of aircraft GTE]. Ekaterinburg, Izd. "Kvist" Publ., 2008, 208 p. ISBN: 5-900474-60-7. (In Russian).
5. Movchan B.A., Malashenko I.S. *Zharostoykie pokrytiya, osazhdaemye v vakuume* [Vacuum-Deposited Heat-Resistant Coatings]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1983, 232 p.

6. Budinovsky S.A., Muboyadzhyan S.A., Gayamov A.M., Matveev P.V. Development of Ion-Plasma Refractory Metallic Layers of Heat-Insulating Coatings for Cooled Turbine Rotor Blades. *Metal Science and Heat Treatment*, 2014, vol. 55, pp. 652–657. DOI: 10.1007/s11041-014-9684-2.
7. Tarasenko Yu.P., Tsareva N.N., Berdnik O.B. The structure and physical-mechanical properties of the heat-resistant Ni-Co-Cr-Al-Y intermetallic coating obtained using rebuilt plasma equipment. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, No. 5, pp. 641–650. DOI: 10.1134/S0869864314050138.
8. Pugacheva N.B., Mazaeva E.S. Protective properties of high-temperature combined coatings. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, 2001, No. 4, pp. 82–89.
9. Guzanov B.N., Obabkov N.V., Migacheva G.N. Development and research of multi-layer composite coatings high temperature. *Sciences of Europe*, 2017, No. 16 (16), pp. 261–26.
10. Sivakumar R., Mordike B.L. High temperature coatings for gas turbine blades: a review. *Surface and Coatings Technology*, 1989, vol. 37, No. 2, pp. 139–160. DOI: 10.1016/0257-8972(89)90099-6.
11. Guzanov B.N., Kositsin S.V., Salamatov E.S. Laser treatment of heat-resistant protective coatings. *Protective Coatings on Metals*, 1990, No. 24, pp. 76–80.
12. Matveev P.V., Budinovskiy S.A. Influence of vacuum annealing on structure of ion-plasma coatings made with double aluminizing technology. *Proceedings of VIAM*, 2016, No. 3 (39), pp. 8. DOI: 10.18577 / 2307-6046-2016-0-3-8-8. (In Russian).
13. Kadyrmetov A.M. Research of plasma spray application and strengthening of coatings and ways of quality management of plasma coatings. *Scientific journal KuBGU*, 2012, No. 81 (7), pp. 1–18. (In Russian).
14. Pugacheva N.B. Modern trends in the development of heat-resistant coatings based on iron, nickel and cobalt aluminides. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, No. 3, pp. 51–82. DOI: 10.17804 / 2410-9908.2015.3.051-082.
15. Stecura S. Optimization of the NiCrAl-Y/ZrO-Y₂O₃ thermal barrier system. *NASA Technical Memorandum*, NASA/TM-86905, 1985, 26 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19850007569.pdf> (24.01.2019).
16. Hille T.S., Turteltaub S., Suiker A.S.J. Oxide growth and damage evolution in thermal barrier coatings. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, No. 78, iss. 9, pp. 2139–2152. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.04.003.
17. Zhu D., Miller R.A. Thermal Conductivity and Sintering Behavior of Advanced Thermal Barrier Coatings. *NASA / TM-2002-211481*, 2002, 15 p.
18. Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P., Konakova I.P., Moroz E.V. Design of integrated protective coatings for single-crystal turbine blades modern cooled GTE. *Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2012, No. 3–1 (34), pp. 211–215. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-3-1(34)-211-216. (In Russian).
19. Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Alekseev V.D., Slukin E.Yu. Features of creating combined heat-resistant coatings for high-temperature parts. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, No 3, pp. 12–19. DOI: 10.15593/2224-9877/ 2020.3.02. (In Russian).
20. Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Slukin E.Yu., Bykova T.M. Technology of obtaining composite conglomerate powders for plasma spraying of high-temperature protective coatings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, No 1, pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-6-20. (In Russian).
21. Lepesh G.V., Moiseev E.N. Assessment of methods for protecting the metal surface from high-temperature erosion. *Technical and technological problems of service*, 2017, No. 3 (41), pp. 20–31. (In Russian).
22. Markova T.V., Kryzhanovskaya I.M. Sherokhovatost' poverkhnostey: Metodicheskie ukazaniya [Roughness of surfaces: Methodology instructions]. St. Petersburg, Izd-vo SPbGTU Publ., 2006, 32 p. (In Russian).

Подана в журнал: 14.03.2021

УДК 621.793:620.197



DOI: 10.17804/2410-9908.2021.2.006-021



ЭРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОМБИНИРОВАННОГО МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОВО-ТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



Б. Н. Гузанов^{1, а)}, Н. Б. Пугачева^{2, б)}, Т. М. Быкова^{2, в)*}

¹Российский государственный профессионально-педагогический университет,
11, ул. Машиностроителей, г. Екатеринбург, 620012, Российская Федерация

²Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

а)  <http://orcid.org/0000-0001-5698-0018>  guzanov_bn@mail.ru;

б)  <http://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  nat@imach.uran.ru;

в)  <http://orcid.org/0000-0002-8888-6410>  tatiana_8801@mail.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: tatiana_8801@mail.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 362–30–43; факс: +7 (343) 374–53–30

Представлены комплексные исследования химического состава, микроструктуры и толщины комбинированного многослойного покрытия на жаропрочном никелевом сплаве. Установлен характер распределения химических элементов по толщине покрытия, всех слоев: внутреннего алюмосилицированного слоя, плазменного подслоя и внешнего теплоизоляционного. Определена шероховатость поверхности на всех стадиях нанесения покрытия и после испытаний.

Приведены результаты сравнительных испытаний эрозионной стойкости диффузионного алюмосилицидного покрытия, двухслойного теплоизоляционного покрытия и комбинированного многослойного покрытия. Установлены высокие теплозащитные свойства комбинированного многослойного покрытия на жаропрочном никелевом сплаве.

Ключевые слова: сталь, покрытие, микроструктура, шероховатость, микротвердость, эрозионная стойкость.

1. Введение

Постоянное повышение температуры газового потока на входе в газовые турбины является основной тенденцией развития современного газотурбостроения. Это неизбежно приводит к увеличению уровня термических напряжений ответственных элементов конструкций в условиях жесткого температурно-силового напряжения и тем самым оказывает негативное влияние на надежность и ресурс газотурбинной установки (ГТУ) в целом. Стремление повышать КПД силовых и маршевых энергетических установок привело к значительному возрастанию температуры продуктов сгорания топлива перед турбиной, что составляет от 1000 до 1315 °С, при этом скорость потока горячих газов достигла значения примерно 300 м/сек. [1]. Все это определило возникновение ряда проблем, образовавшихся в процессе совершенствования современных ГТУ, среди которых приоритетным направлением считается обеспечение требуемой надежности и долговечности.

Рабочие и сопловые лопатки ГТУ работают в максимально сложных условиях воздействия. Это, главным образом, циклически-меняющиеся рабочие температуры и напряжения, вызывающие термомеханическую усталость и коррозионно-эрозионные разрушения поверхностного слоя скоростным газовым потоком. Для повышения надежности газовых турбин

все более широко применяют новые жаропрочные сплавы. В них за счет применения качественно новых технологий направленной кристаллизации, оптимально подобранных систем легирования и последующей термической обработки удается решить проблему увеличения сопротивляемости деформациям и разрушению лопаток при действии высоких температур и напряжений. Актуальным остается применение термобарьерных защитных покрытий для надежной защиты от разрушения контактных поверхностей под действием газовой коррозии и эрозии.

Основными направлениями создания новых высокотемпературных покрытий прежде всего являются оптимизация химического состава новых композиций [2–4], а также разработка новых технологических процессов [5–7], основанных на использовании принципиально новых физических эффектов при создании многослойных комбинированных покрытий [8–10] и специальных технологий их последующей финишной обработки [11–13]. В основном используют жаростойкие покрытия системы Me-Cr-Al, где в качестве Me используют Fe, Ni и Co, а для газовой турбины двигателей (ГТД) применяют систему Ni-Cr-Al [14]. Несмотря на высокую жаростойкость сплавов системы Ni-Cr-Al этого оказалось недостаточно для турбинных лопаток. В настоящее время требуются покрытия, которые способны длительно работать при температуре металла до 1300 °С под нагрузкой, обеспечивая надежную теплозащиту. Наиболее приемлемым для этих целей можно считать разработку и применение термобарьерных металлических и металлокерамических многослойных защитных покрытий [15–17].

В настоящее время накоплены обширные литературные данные по использованию многослойных покрытий на основе интерметаллидов NiAl и CoAl, это позволяет сформулировать общие закономерности их повреждений и определить возможные пути повышения долговечности. Но несмотря на многолетний опыт эксплуатации выбор защитного термобарьерного покрытия для турбинных лопаток конкретных ГТД весьма затруднен и должен быть индивидуальным для каждого двигателя [18]. Кроме того, необходимо учитывать, что современную систему защиты с заданным ресурсом в условиях совместного коррозионно-эрозионного воздействия скоростного потока газообразных продуктов сгорания топлива на контактную поверхность лопаточного аппарата турбины возможно получить только с использованием комбинаций разных технологий, в частности термодиффузионной и плазменной, которые дополняют друг друга в качестве самостоятельных элементов защиты.

С учетом сказанного для защиты соплового аппарата маршевого реактивного газотурбинного двигателя было разработано комбинированное теплозащитное трехслойное покрытие [19]. Покрытие состоит из трех последовательно нанесенных слоев с использованием различных технологий и специально разработанных порошковых смесей. Первый термодиффузионный алюмосилицированный слой (ДП) должен обеспечивать высокую жаро- и коррозионную стойкость и диффузионную стабильность всего покрытия в целом. Второй плазменный слой Ni-Cr-Al-Y (ПМ) является функциональным подслоем, который обладает достаточно высокой термостойкостью и обеспечивает хорошую адгезию керамического внешнего слоя с контактной поверхностью. Внешний третий керамический слой на основе оксидов $ZrO_2 + Y_2O_3$ (ПК) исполняет роль теплозащитного покрытия, т. е. снижает температуру поверхности сплава лопатки, в то же время на должном уровне, сопротивляясь эрозионному воздействию запыленного скоростного потока газообразных продуктов сгорания топлива.

Ранее выполненные исследования стойкости покрытия к высокотемпературному окислению (ВТО) и высокотемпературной коррозии (ВТК) [2, 14] показали, что только последовательно сформированное трехслойное покрытие регламентированного состава и толщины позволило получить градиентную комбинированную композицию, которая обладает высокими защитными свойствами, особенно ярко проявляющимися в условиях коррозионного воздействия сульфата и хлорида натрия.

Оценивая надежность и ресурс работы защитной композиции, необходимо учитывать, что сопловые и рабочие лопатки ГТД эксплуатируются в сложных условиях, когда окисление и коррозия поверхностных слоев контактных поверхностей подобных рабочих элементов турбины сопровождается интенсивным эрозионным воздействием скоростного газового потока продуктов сгорания жидкого, газообразного либо твердого порошкового топлива [10, 13]. Эрозионное питтинговое разрушение тонкого поверхностного слоя лопаток, особенно на входных кромках может значительно ускорять процессы окисления, вызывая растрескивание и осыпание окалины и тем самым провоцируя ускорение разрушения [21]. В связи с этим важным является проведение испытаний эрозионной стойкости защитных покрытий.

Цель данной работы заключалась в сравнительном анализе эрозионной стойкости и характера повреждений каждого из последовательно нанесенных слоев комбинированного трехслойного покрытия.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Методы нанесения покрытий

Покрытия были нанесены на жаропрочный никелевый сплав марки ЭП975 ИД (ЖС6УД-ИД), который используется для изготовления дисков и лопаточного аппарата газотурбинных двигателей.

Химический состав сплава ЭП975 ИД, мас. %:

C	Cr	Co	W	Al	Ti	Nb
0,1–0,16	7,5–9	14,1–17,0	9,5–11,0	4,5–5,1	2,0–2,7	1,0–2,0
Fe	Mo	Ce	Si	S	P	Ni
до 1	0,8–1,5	до 0,03	до 0,4	до 0,01	до 0,015	Остал.

Покрытия были получены последовательным нанесением: первый слой – термодиффузионное покрытие Al-Si-P3M, второй – плазменный слой Ni-Cr-Al-Y и третий – внешний керамический слой $ZrO_2+Y_2O_3$. Термодиффузионное покрытие Al-Si-P3M наносили в порошковой смеси следующего состава: 98 мас. % порошка сплава 49Fe-28Al-17Si-6P3M и 2 мас. % активатора AlF_3 при температуре 950 °С в течение 6 ч в герметичном контейнере с плавким затвором. Для придания необходимой шероховатости и очистки поверхности от пленок окислов перед нанесением второго слоя проводили подготовку поверхности образцов и лопаток. Поверхность обрабатывали путем обдува электрокорундом плавленным белым, размер частиц 315–500 мкм. После струйно-абразивной обработки образцы и лопатки обдували сухим сжатым воздухом для удаления дисперсных частиц абразива.

Второй и третий слой наносили с помощью плазменного порошкового напыления в камере низкого давления на установке 15-ВБ-01 по режиму: $I = 200A$, $L = 110$ мм; $Q_{Ar} = 0,6$ л/с; $Q_{N_2} = 0,3$ л/с; $Q_{Tp} = 0,15$ л/с. По данному режиму в подслое обеспечивается минимум пористости – 4–5 % и максимальное значение прочности сцепления с алюмосилицированным слоем (не ниже 30 МПа) и с керамическим слоем $ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$ (не ниже 10 МПа). Плазменный металлический подслой наносили с использованием гранулированного порошка Ni-22Cr-16Al-1Y, получаемого по специально разработанной технологии [20]. Для плазменного напыления теплозащитного слоя использовали порошок ЦИ-8 ($ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$). Перед напылением порошок ЦИ-8 классифицировали на ситах с выделением фракции 40–100 мкм и прокаливали в муфельной печи при температуре 800 °С в течение 3 ч.

2.2. Методы исследования структуры и состояния поверхности

Микроструктуру и микрорентгеноспектральный анализ распределения элементов в покрытиях выполняли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU

при увеличениях до 2 тыс. с помощью системы энергодисперсионного (ЭДС) микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD детектором с программным обеспечением INCA. На этом же микроскопе оценивали состояние поверхности образцов с покрытиями после испытаний на прожиг. Шероховатость поверхности образцов с покрытиями и после их испытаний на прожиг оценивали с помощью трехмерно отображающего анализатора поверхности Wyko NT-1100 – оптического интерферометрического профилометра с программным комплексом Veeco. Микротвердость измеряли на приборе LEICA VMHT AUTO при нагрузке 50 г по требованиям ГОСТ 2999–75, ГОСТ 9450–76 и ГОСТ Р ИСО 6507-1–2007. На этом же приборе с помощью программного обеспечения Materials Workstation определяли пористость покрытия методом количественной металлографии на нетравленных поверхностях шлифов.

Все исследования проведены на оборудовании Центра коллективного пользования Института машиноведения УрО РАН.

2.3. Методы исследования эрозионной стойкости

Испытания эрозионной стойкости образцов с покрытиями проведены в условиях воздействия высокотемпературного газового потока на аэродинамическом стенде с разогревом газа в ВЧД-плазматроне кафедры экспериментальной физики Физико-технологического института УрФУ. Схема установки представлена на рис. 1.

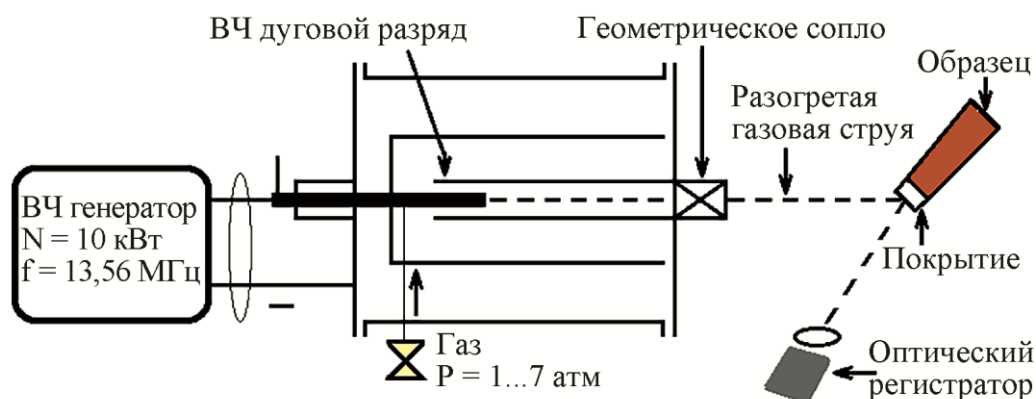


Рис. 1. Схема установки аэродинамического стенда с разогревом газа в ВЧД-плазматроне

Параметры газовой струи приведены в табл. 1. Образцы устанавливали на оси потока под углом к оси, что повышало качество визирования поверхности образца оптическим регистратором. Расстояние от среза сопла устанавливали на основании тарировочных данных и определяли необходимым значением температуры на поверхности образца при испытании. Регулировку температуры проводили как изменением расстояния от среза сопла, так и дополнительной подачей холодного газа через дренажные отверстия в камере смешивания перед соплом.

Таблица 1 – Основные параметры газовой струи

1	Газовая среда	Воздух
2	Давление в камере плазматрона	До 0,5 атм
3	Температура газа в струе плазмы	2000–2500 °С
4	Скорость струи на срезе сопла	700±100 м/с
5	Диаметр струи	8 мм

В процессе испытания на стенде фиксировалось время, когда происходило образование первых капель расплавленного металла или продуктов эрозионного разрушения на исследуемой поверхности. В этом случае образец сразу же выводили из зоны нагрева высокотемпературной струи и после охлаждения с использованием различных металлофизических методов анализировали состояние торцевой поверхности в зоне нагрева.

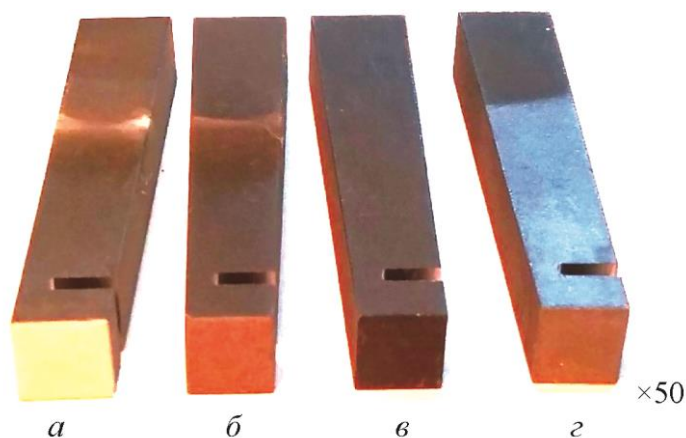


Рис. 2. Внешний вид образцов перед испытаниями на высокотемпературном аэродинамическом стенде: *a* – ДП+ПМ+ПК; *б* – ДП+ПМ; *в* – ДП; *г* – сплав без покрытия

На расстоянии 1 см от исследуемой торцевой поверхности выполнен технологический надрез. Это позволяет сконцентрировать тепловую энергию, передаваемую от высокотемпературного газового потока в исследуемом объеме металла и значительно уменьшить потери за счет теплопроводности. В результате организуется высокоскоростной ударный режим нагрева, в определенной степени имитирующий запуск газотурбинного двигателя.

3. Результаты исследования и обсуждения

Микроструктура и характер распределения химических элементов по слоям комбинированного многослойного покрытия на лопатке газотурбинного двигателя представлена на рис. 3. После термодиффузионного алюмосилицирования на поверхности образцов из никелевого сплава сформировалось покрытие толщиной 50 мкм, состоящее из алюминидов NiAl микротвердостью 900 HV 0,05. Шероховатость поверхности Ra составила 9 мкм (рис. 4 *a* и табл. 3). Алюмосилицированное покрытие обеспечивает защиту от высокотемпературного окисления и коррозии.

Второй напыленный металлический подслой толщиной 100–120 мкм. Микротвердость порядка 600 HV 0,05. Подслой состоит из алюминидов NiAl и твердого раствора на основе Ni. Шероховатость поверхности составила 6 мкм (рис. 4 *б* и табл. 3). Подслой обеспечивает плавный переход от металлического покрытия к керамическому.

Внешний керамический слой, обеспечивающий защиту поверхности изделия от воздействия высоких температур, состоит из оксида циркония ZrO₂ и оксида иттрия Y₂O₃. Толщина покрытия составила около 70 мкм. Шероховатость поверхности керамического слоя составила Ra = 2,47 мкм (рис. 4 *в* и табл. 3).

Общая толщина покрытия составила 0,17–0,27 мм. При этом толщина образцов увеличилась на 0,15–0,2 мм, поскольку первый алюмосилицированный слой не увеличивает толщину лопаток. После диффузионного алюмосилицирования изменяется химический и фазовый состав их поверхностного слоя, а алюмосилицидное покрытие формируется внутри материала лопаток, не приводя к увеличению их размеров.

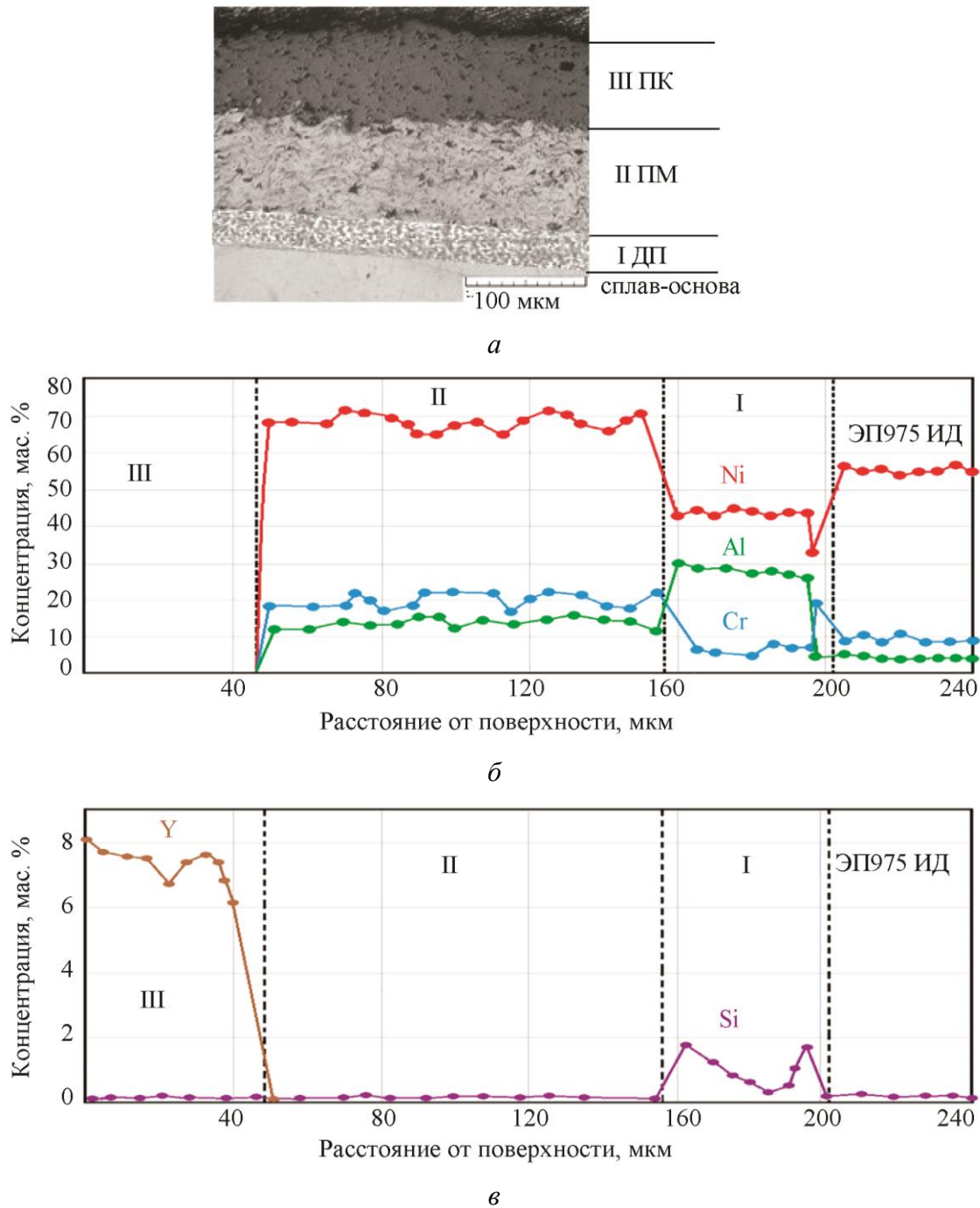


Рис. 3. Микроструктура (а) и распределение элементов (б, в) в комбинированном многослойном покрытии на лопатке газотурбинного двигателя из никелевого сплава ЭП975ИД

В исходном состоянии на границе 1 и 2-го слоев отмечалась небольшая пористость. При количественном микрорентгеноспектральном анализе в точке обнаружено, что поры на границе диффузионного и плазменного металлических слоев заполнены оксидами, главным образом хрома, причем в порах содержится до 60 мас. % хрома, около 5 мас. % алюминия и 1 мас. % иттрия.

При исследовании поверхности образцов после нанесения каждого слоя покрытия максимальная шероховатость поверхности зафиксирована для первого алюмосилицированного слоя (рис. 4 а и табл. 2). После термодиффузионного алюмосилицирования ше-

роховатость поверхности образцов осталась на исходном уровне. Плазменное напыление 2-го слоя привело к небольшому снижению шероховатости (рис. 4 б и табл. 2). Вероятно, это обусловлено механизмом формирования металлического подслоя. В плазменной струе гранулы напыляемого порошка Ni-22Cr-16Al-1Y находятся в пластичном состоянии размягченного металла, близкого расплаву. Эти частицы летят к поверхности образцов с большой скоростью. Ударяя о поверхность образца, они пластически деформируются, приобретая форму, близкую пластине. Температура частиц практически соответствует температуре плавления, поэтому происходит диффузионное взаимодействие частиц с поверхностью жаропрочного никелевого сплава, что обеспечивает адгезионное сцепление слоев. Таким образом, после напыления второго слоя исходная шероховатость поверхности образцов залечивается, а шероховатость 2-го слоя определяется размером и формой осевших деформированных частиц Ni-22Cr-16Al-1Y. После напыления керамического слоя шероховатость поверхности еще уменьшилась. В отличие от частиц металлического порошка Ni-22Cr-16Al-1Y напыляемые частицы $ZrO_2+Y_2O_3$ не деформируются в струе плазмы. Ударяясь о поверхность образцов с высокой кинетической энергией, керамические частицы проникают в слой Ni-Cr-Al-Y, обеспечивая хорошее адгезионное сцепление. Шероховатость поверхности после нанесения керамического слоя минимальна (рис. 4 в и табл. 2)

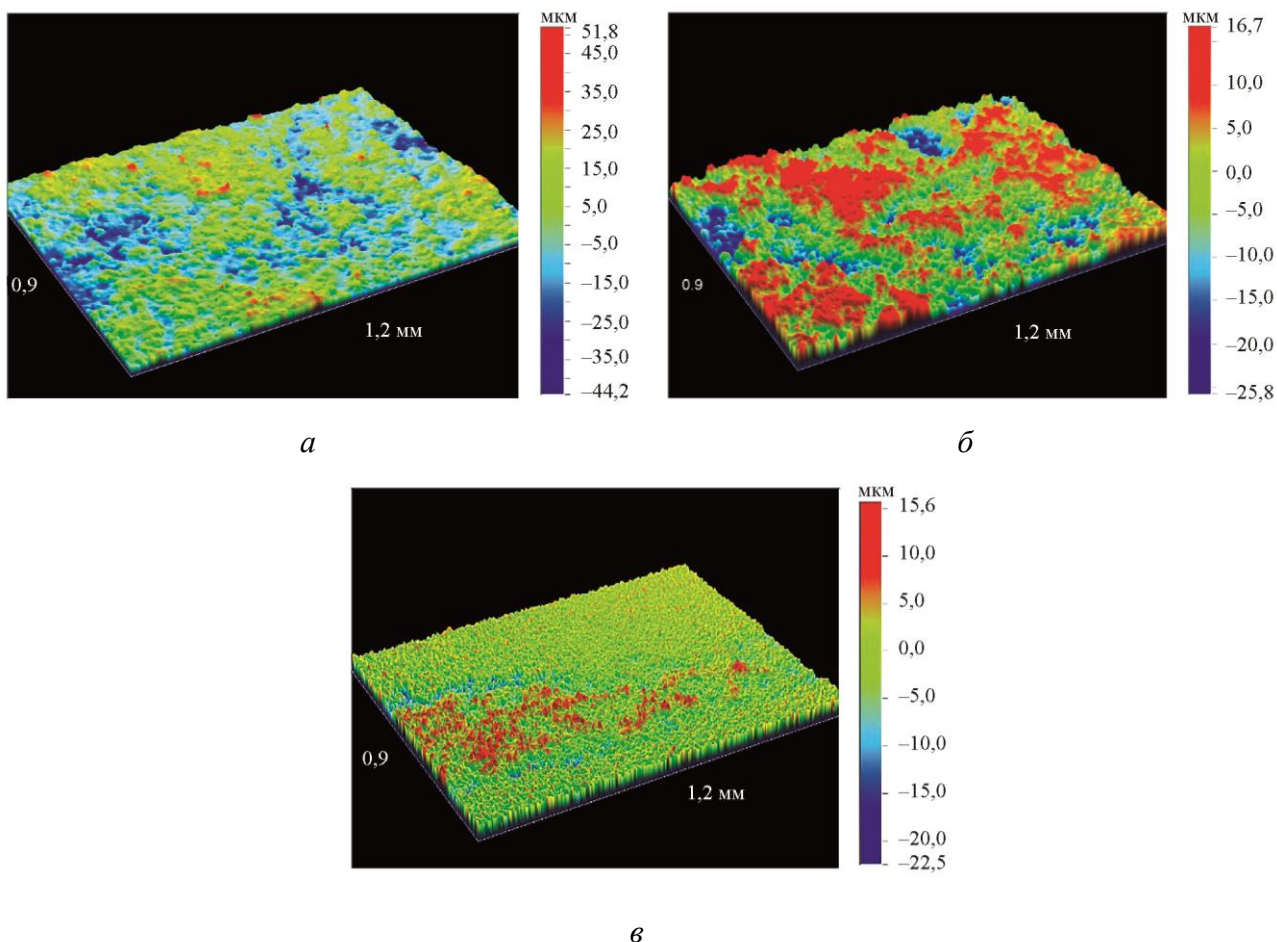


Рис. 4. Профиль поверхности образцов в исходном состоянии:
а – ДП; б – ДП+ПМ; в – ДП+ПМ+ПК

Таблица 2 – Результаты исследования шероховатости поверхностей в исходном состоянии

Образец	Средняя шероховатость R_a , мкм	Средняя квадратичная шероховатость R_q , мкм	Максимальная высота поверхности R_t , мкм
ДП	9,02	11,29	95,54
ДП+ПМ	6,32	7,74	42,45
ДП+ПМ+ПК	2,45	3,36	38,07

Для повышения адгезии всех трех слоев комбинированного покрытия был проведен дополнительный отжиг в вакууме при температуре $T = 1050$ °С в течение 2 ч. В результате тепловой выдержки произошло выравнивание химического состава во всех слоях покрытия, в частности уменьшилось различие содержания алюминия в диффузионном и плазменном металлических слоях. Кроме того, на границе между этими слоями поры практически полностью исчезли, а там, где они сохранились, в них увеличилось количественное содержание алюминия и иттрия, что свидетельствует об образовании оксида Al_2O_3 , модифицированного иттрием, с высокими защитными свойствами.

С целью сравнительного анализа высокотемпературных защитных свойств каждого слоя были проведены испытания на прожиг трех типов покрытий, параметры которых в исходном состоянии приведены в табл. 3. Каждое из нанесенных на образцы покрытий отражает одно (ДП), двух (ДП+ПМ) и трехслойное (ДП+ПМ+ПК) состояние исследуемого многослойного комбинированного покрытия.

Таблица 3. Параметры исследуемых защитных покрытий в исходном состоянии

Тип покрытия	Вид слоя	Толщина слоя, мкм	Содержание элементов, мас. %					
			Cr	Al	Ni	Si	Zr	Y
ДП	Al-Si-PЗМ	40–55	6–8	26–30	47–52	1–2	–	–
ДП+ПМ	Al-Si-PЗМ	40–55	6–8	26–28	47–52	1–2	–	–
	Ni-Cr-Al-Y	110–120	γ : 29–31 β : 9–11	γ : 4–6 β : 18–20	γ : 63–65 β : 70–72	–	–	–
ДП+ПМ+ПК	Al-Si-PЗМ	40–55	6–8	26–30	47–52	1–2	–	–
	Ni-Cr-Al-Y	110–120	γ : 29–31 β : 9–11	γ : 4–6 β : 18–20	γ : 63–65 β : 70–72	–	–	<1
	$ZrO_2+8Y_2O_3$	50	–	–	–	–	65–70	6–7

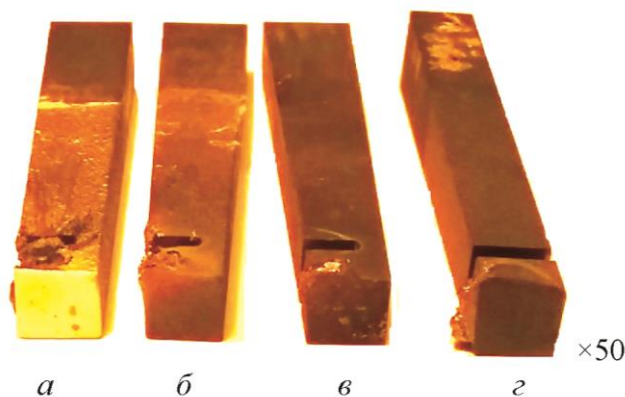


Рис. 5. Образцы после испытания на высокотемпературном аэродинамическом стенде:
а – ДП+ПМ+ПК; б – ДП+ПМ; в – ДП; з – сплав без покрытия

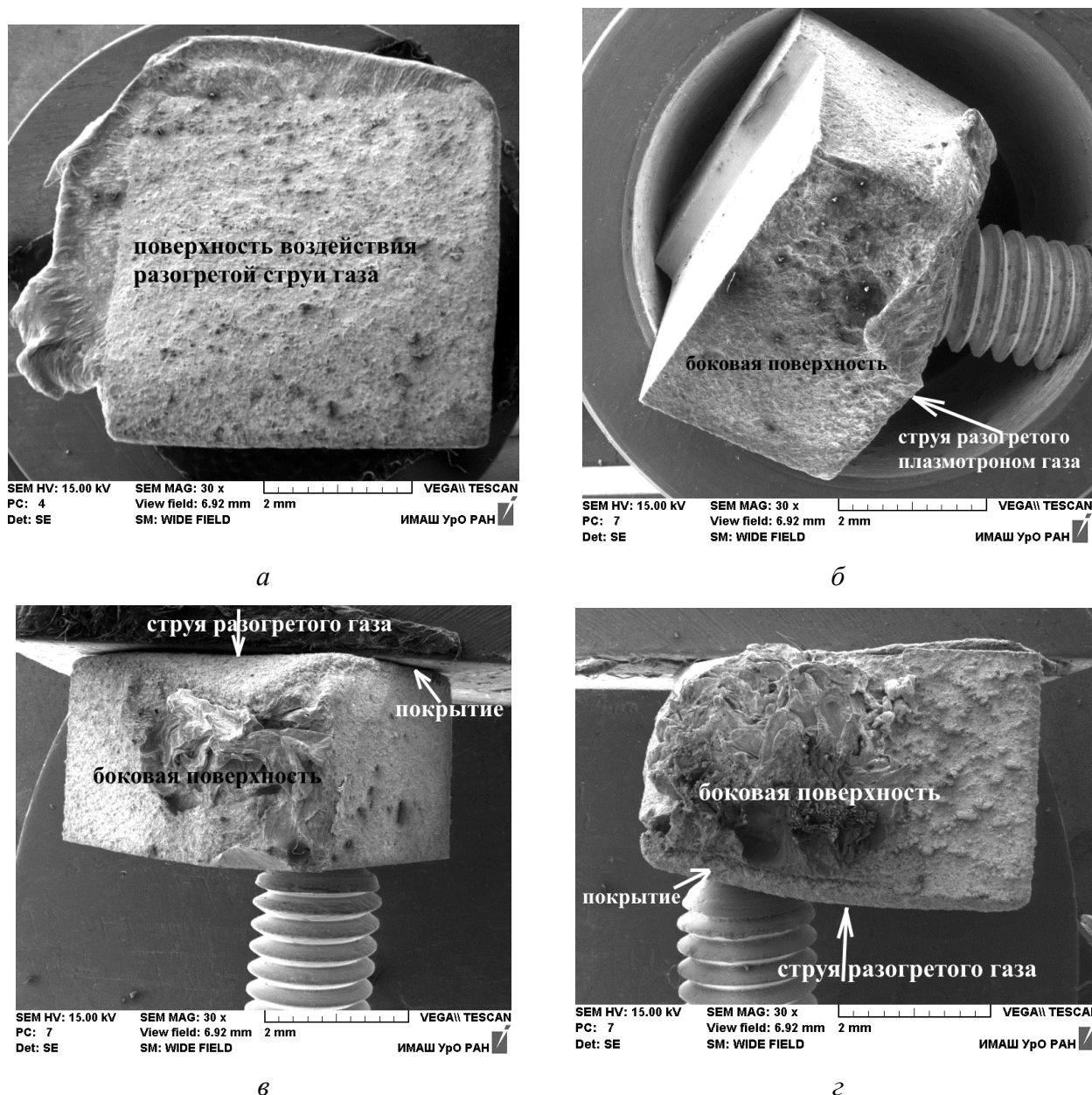
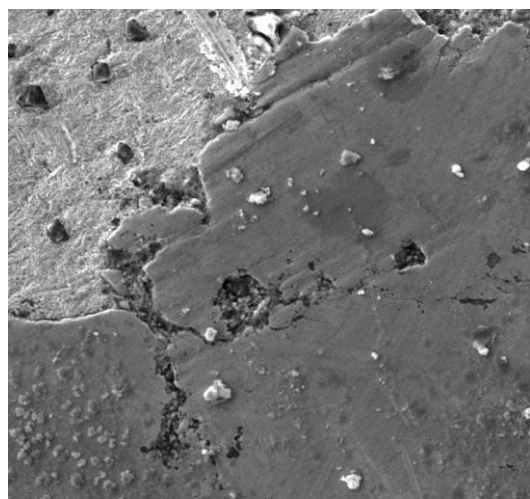


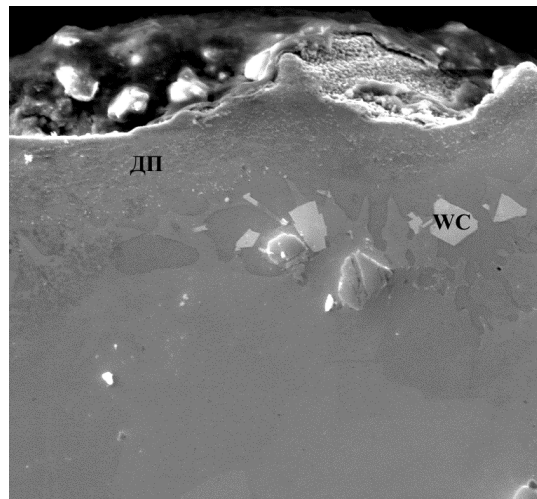
Рис. 6. Рельеф поверхности образцов после испытаний на прожиг:
а – без покрытия; *б* – ДП; *в* – ДП + ПМ; *г* – ДП + ПМ + КП

После испытания на аэродинамическом стенде уже при визуальном осмотре (рис. 5) видно, что только образец с комбинированным трехслойным покрытием (ДП+ПМ+ПК) сохранил свой первоначальный вид и практически не подвергся разрушению (рис. 5 *а*). Поскольку поток разогретого плазматроном газа попадает на поверхность образцов под углом, происходит частичное расплавление поверхностного слоя, который выдувается на боковые поверхности, образуя натек в виде грата (рис. 6). При анализе торцевых поверхностей образцов после испытаний на высокотемпературном аэродинамическом стенде с использованием растрового электронного микроскопа было обнаружено, что, как и ожидалось, максимальные разрушения претерпел образец без покрытия (рис. 6 *а*). Кроме эрозионного повреждения зафиксировано развитие окислительных процессов. Образовавшиеся оксиды NiO, Cr₂O₃ и шпинели NiAl₂O₄, NiCr₂O₄ проникают по границам γ -зерен вглубь никелевого сплава (рис. 7 *а*). Образец после термодиффузионного алюмосилицирования (ДП) сохранился лучше, часть покрытия провзаимодействовала с кислородом воздуха с образованием оксида Al₂O₃, других оксидов на

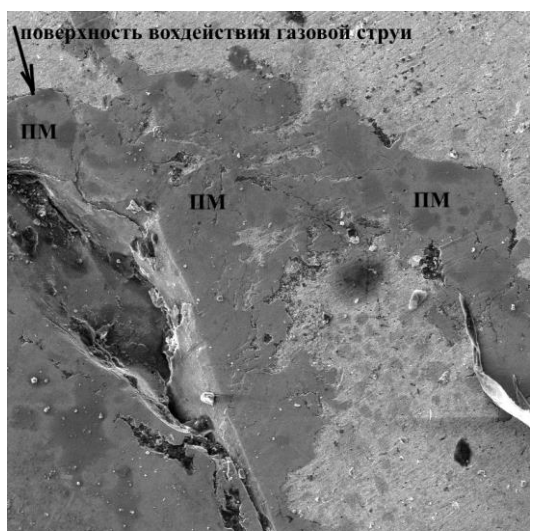
поверхности не обнаружено. Металл основы под покрытием оплавился (рис. 6 б и 7 б). Образец с двухслойным покрытием после термодиффузионного алюмосилицирования и последующего напыления металлического подслоя (ДП+ПМ) окислился с образованием оксидов Al, Cr и Ni, причем на части поверхности образовались эвтектики (рис. 6 в и 7 в). Образец с трехслойным комбинированным покрытием сохранился лучше всех, на торцевой поверхности практически везде обнаруживается только слой керамики с единичными локальными участками оксидов никеля, алюминия и хрома (рис. 6 г и 7 г). Трехслойное покрытие (ДП+ПМ+ПК) выдержало максимальную температуру 1300 °С при наибольшем времени воздействия газового потока (рис. 8).



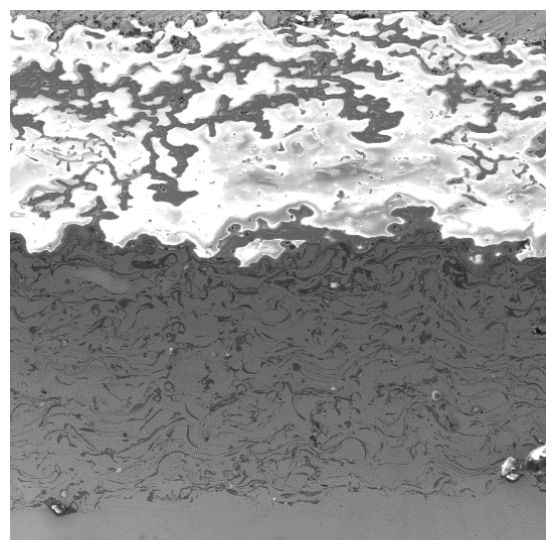
а



б



в



г

Рис. 7. Микроструктура поверхности после воздействия газового потока:
а – без покрытия; *б* – ДП; *в* – ДП + ПМ; *г* – ДП + ПМ + ПК

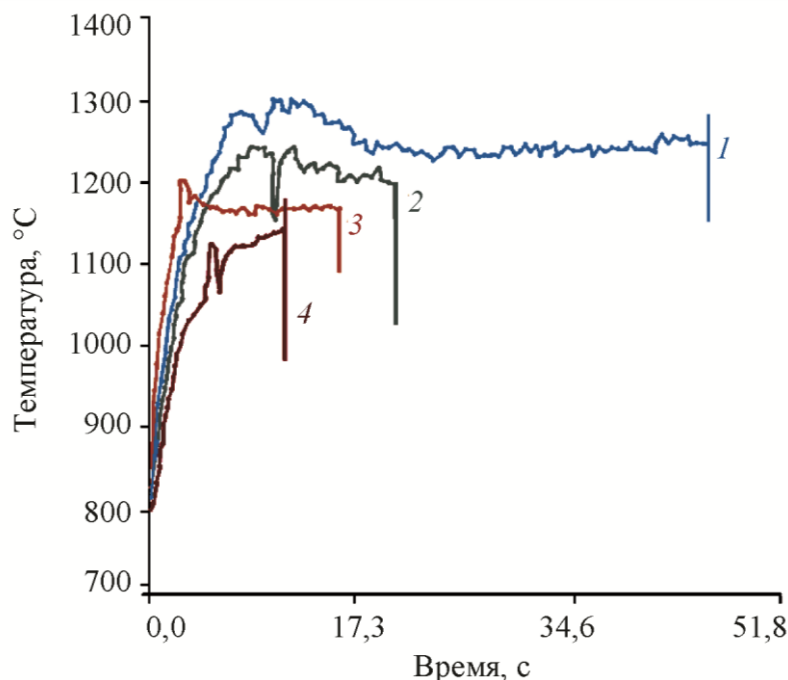


Рис. 8. Влияние состава покрытий на стойкость образцов из никелевого сплава в условиях испытаний на высокотемпературном аэродинамическом стенде:
1 – ДП+ПМ+ПК; 2 – ДП+ПМ; 3 – ДП; 4 – сплав без покрытия

Важным показателем качества напыленных покрытий является шероховатость поверхности, которая в процессе эксплуатации деталей должна, по-возможности, сохраняться и не превышать допустимых значений [22]. Это особенно важно для деталей, которые находятся в динамическом контакте с окружающей средой. Эрозионное воздействие, если не приводит к разрушению контактной поверхности, не должно значительно изменять микрорельеф поверхности деталей. Только в этом случае будет сохраняться ламинарное обтекание лопаток потоком газа, и не будут возникать из-за турбулентности локальные участки с критическим превышением температуры, что наиболее опасно для деталей в условиях интенсивного температурно-силового воздействия.

Исследование рельефа поверхности и шероховатости образцов после испытания на аэродинамическом стенде показало, что высокотемпературный скоростной поток газа не привел к значительному изменению шероховатости поверхности, а рельеф возрос в наиболее поврежденных участках не более чем на 20 % (рис. 9 и табл. 4).

Таблица 4 – Результаты исследования шероховатости поверхности после испытаний на высокотемпературном аэродинамическом стенде

Образец	Средняя шероховатость R_a , мкм	Средняя квадратичная шероховатость R_q , мкм	Максимальная высота поверхности R_t , мкм
Без покрытия	3,44	4,39	34,57
ДП	6,01	7,46	42,48
ДП+ПМ	7,46	9,31	68,83
ДП+ПМ+ПК	7,02	9,49	70,46

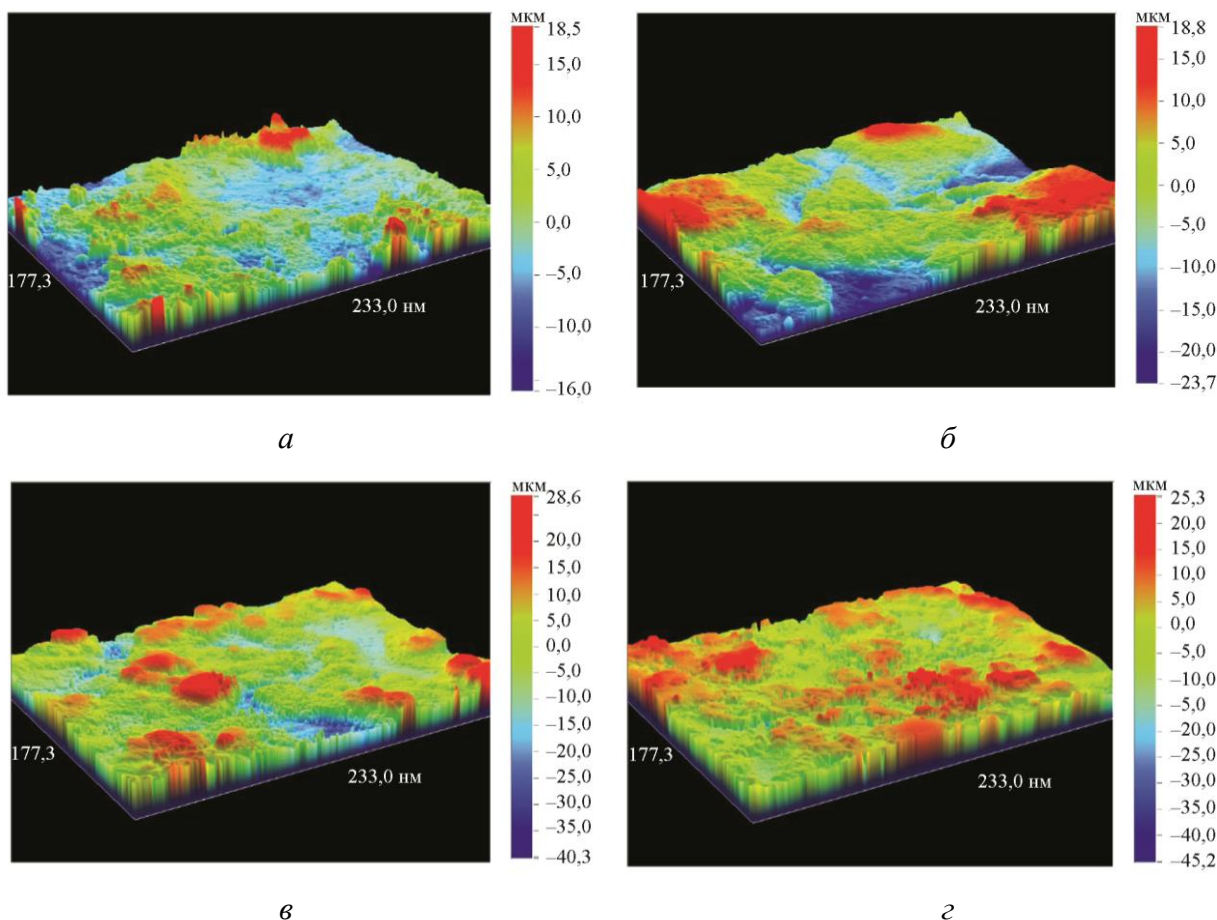


Рис. 9. Профиль поверхности образцов после испытаний на высокотемпературном аэродинамическом стенде: *а* – без покрытия; *б* – ДП; *в* – ДП+ПМ; *г* – ДП+ПМ+ПК

Таким образом, многослойное покрытие полностью сохранилось на поверхности образца после испытаний на прожиг, тогда как все остальные покрытия окислились с образованием оксидов Al_2O_3 , NiO , Cr_2O_3 и шпинелей $NiAl_2O_4$ и $NiCr_2O_4$. По сравнению с образцами без покрытия, диффузионным алюмосилицидным покрытием (ДП) и двухслойным покрытием (ДП+ПМ), трехслойное покрытие (ДП+ПМ+ПК) способно сохраняться после воздействия температур $1300\text{ }^\circ\text{C}$. Это связано с термобарьерным эффектом, обеспечиваемым наличием внешнего керамического слоя $ZrO_2+Y_2O_3$, который снижает температуру металлической составляющей покрытия и сплава-основы не менее чем на $300\text{ }^\circ\text{C}$.

3. Выводы

Результаты исследований показали, что трехслойное покрытие характеризуется максимальными защитными свойствами по сравнению с термодиффузионным алюмосилицидным покрытием и двухслойным покрытием, состоящим из диффузионного слоя Al-Si-РЗМ и плазменно напыленного покрытия Ni-Cr-Al-Y. Трехслойное покрытие состоит из трех слоев: первый слой – диффузионное алюмосилицидное покрытие, обеспечивающее защиту от высокотемпературного окисления и коррозии, толщиной 50 мкм, второй металлический подслоя, обеспечивающий плавный переход от металлического покрытия к керамическому, толщиной 100–120 мкм и третий керамический слой, обеспечивающий снижение температуры лопаток во время эксплуатации, толщиной 70–100 мкм. Общая толщина покрытия составляет 170–270 мкм. Показано, что наносимые плазменным распылением второй и третий слои достаточно плотные, пористость составила менее 5 об. %. Каких-либо отслоений по

границе первого и второго слоя не обнаружено, зафиксированы лишь единичные микропоры, заполненные оксидом алюминия. Результаты испытаний на прожиг в аэродинамическом стенде показали, что покрытие способно выдерживать без разрушения температуру 1300 °С.

Благодарность

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН в соответствии с государственным заданием по теме № АААА-А18-118020790145-0.

Литература

1. Развитие авиационных ГТД и создание уникальных технологий / В. И. Бабкин, М. М. Цховребов, В. И. Солонин, А. И. Ланшин // Двигатель. – 2013 – № 2 (86) – С. 2–7.
2. Гузанов Б. Н., Косицын С. В., Пугачева Н. Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 244 с. – ISBN: 5-7691-1405-3.
3. Косицын С. В. Сплавы и покрытия на основе моноалюминидов никеля. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2000. – 277 с. – ISBN: 5-7691-1810-1.
4. Мубояджан С. А., Лесников В. П., Кузнецов В. П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. – Екатеринбург : «Квист», 2008. – 208 с. – ISBN: 5-900474-60-7.
5. Мовчан Б. А., Малашенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев : Наукова думка, 1983. – 232 с.
6. Development of Ion-Plasma Refractory Metallic Layers of Heat-Insulating Coatings for Cooled Turbine Rotor Blades / S. A. Budinovskiy, S. A. Muboyadzhyan, A. M. Gayamov, P. V. Matveev // Metal Science and Heat Treatment. – 2014. – Vol. 55. – P. 652–657. – DOI: 10.1007/s11041-014-9684-2.
7. Tarasenko Yu. P., Tsareva N. N., Berdnik O. B. The structure and physical-mechanical properties of the heat-resistant Ni-Co-Cr-Al-Y intermetallic coating obtained using rebuilt plasma equipment // Thermophysics and Aeromechanics. – 2014 – Vol. 1, No. 5. – P. 641–650. – DOI: 10.1134/S0869864314050138.
8. Pugacheva N. B., Mazaeva E. S. Protective properties of high-temperature combined coatings // Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov. – 2001. – No. 4. – P. 82–89.
9. Guzanov B. N., Obabkov N. V., Migacheva G. N. Development and research of multi-layer composite coatings high temperature // Sciences of Europe. – 2017. – No. 16 (16). – P. 261–265.
10. Sivakumar R., Mordike B. L. High temperature coatings for gas turbine blades: a review // Surface and Coatings Technology. – 1989. – Vol. 37, iss. 2. – P. 139–160. – DOI: 10.1016/0257-8972(89)90099-6.
11. Гузанов Б. Н., Косицын С. В., Саламатов Е. С. Лазерная обработка жаростойких защитных покрытий // Защитные покрытия на металлах. – 1990. – Вып. 24. – С. 76–80.
12. Матвеев П. В., Будиновский С. А. Влияние режима вакуумного отжига на структуру ионно-плазменных покрытий, полученных по технологии двойного алитирования // Труды ВИАМ. – 2016. – № 3 (39). – С. 8. – DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-8-8.
13. Кадырметов А. М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 81 (07). – С. 1–18.
14. Пугачева Н. Б. Современные тенденции развития жаростойких покрытий на основе алюминидов железа, никеля и кобальта // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2015. – No. 3. – С. 51–82. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082.
15. Stecura S. Optimization of the NiCrAl-Y/ZrO-Y₂O₃ thermal barrier system // NASA Technical Memorandum. – NASA/TM-86905. – 1985. – 26 p. – URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19850007569.pdf> (24.01.2019).

16. Hille T. S., Turteltaub S., Suiker A. S. J. Oxide growth and damage evolution in thermal barrier coatings // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2011. – No. 78. iss. 9. – P. 2139–2152. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.04.003.
17. Zhu D., Miller R. A. Thermal Conductivity and Sintering Behavior of Advanced Thermal Barrier Coatings, NASA/ TM-2002-211481. – 2002. – 15 p.
18. Конструирование комплексных защитных покрытий для монокристаллических охлаждаемых турбинных лопаток современных ГТД / В. П. Лесников, В. П. Кузнецов, И. П. Конакова, Е. В. Мороз // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2012. – № 3–1 (34). – С. 211–215.
19. Особенности создания комбинированных теплостойких покрытий для деталей высокотемпературного назначения / Б. Н. Гузанов, Н. Б. Пугачева, В. Д. Алексеев, Е. Ю. Слукин // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 12–19. – DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.02.
20. Технология получения композиционных конгломератных порошков для плазменного напыления высокотемпературных защитных покрытий / Б. Н. Гузанов, Н. Б. Пугачева, Е. Ю. Слукин, Т. М. Быкова // *Обработка металлов (Технология. Оборудование. Инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 6–20.
21. Лепеш Г. В., Моисеев Е. Н. Оценка способов защиты поверхности металла от высокотемпературной эрозии // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2017. – № 3 (41). – С. 20–31.
22. Маркова Т. В., Крыжановская И. М. Шероховатость поверхности : методические указания. – СПб : Изд-во СПбГТУ, 2006. – 32 с.