

УДК 621.438:621.793

Improving the quality of thermal spray coatings for blades of gas turbines

Повышение качества газотермических покрытий для лопаток газовых турбин

A. A. Vybin¹, A. V. Novikov²
A. A. Быбин¹, A. В. Новиков²

¹ Ufa State Aviation Technical University, Marx Str. 12, Ufa, 450008, Russia

² BPR-TURBO OOO, Yubileinaya Str. 1, Ufa, 450029, Russia

¹ anbybin@yandex.ru, ² info@turbinass.ru

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

² ООО «БПР-ТУРБО», Россия, 450029, Уфа, ул. Юбилейная, 1

¹ anbybin@yandex.ru, ² info@turbinass.ru

ABSTRACT

Methods of controlling the quality of nickel and cobalt based protective coatings on a nickel alloy substrate by the gas-plasma method using a plasma torch with a power of 55 kW are considered. The dependences of some operational characteristics of the studied coatings on the most significant technological parameters were obtained: the speed of the plasma torch and the angle of supply of the gas jet to the substrate. It was shown that varying these parameters allows controlling the amount of oxidized particles, pores and voids in the coating, the content of which determines the cohesive and adhesive properties of the protective layer, which in turn serves as quality criteria for the protective coating. It was found that nickel-based coatings, due to their better plastic deformation ability, have greater cohesive strength than cobalt-based coatings. It was found that the thermal treatment of thermal spray coatings in vacuum provides some compaction of the protective layer and relatively weakly affects its adhesion and cohesion. It was also shown that heat treatment of the studied coatings in the open air is impractical due to the significant oxidation of individual structural components in the sprayed layer and a corresponding decrease in the cohesive properties of the coating as a whole.

KEYWORDS

Thermal spray coatings; coating performance; adhesion; cohesion; technological parameters of the spraying process.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены способы управления качеством защитных покрытий на никелевой и кобальтовой основе, наносимых на подложку из никелевого сплава газоплазменным методом с помощью плазматрона мощностью 55 кВт. Получены зависимости некоторых эксплуатационных характеристик изучаемых покрытий от наиболее значимых технологических параметров: скорости перемещения плазматрона и угла подачи газовой струи к подложке. Показано, что варьирование указанных параметров позволяет управлять количеством окисленных частиц, пор и пустот в покрытии, содержание которых определяет когезионные и адгезионные свойства защитного слоя, служащие в свою очередь критериями качества защитного покрытия. Обнаружено, что покрытия на никелевой основе ввиду лучшей способности пластически деформироваться обладают большей когезионной прочностью, чем покрытия на кобальтовой основе. Установлено, что термическая обработка газотермических покрытий в вакуумной среде обеспечивает некоторое уплотнение защитного слоя и относительно слабо влияет на его адгезию и когезию. Показано также, что термическая обработка изучаемых покрытий на открытом воздухе нецелесообразна ввиду значительного окисления отдельных структурных составляющих в напыленном слое и соответствующего снижения когезионных свойств покрытия в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Газотермические покрытия; эксплуатационные характеристики покрытий; адгезия; когезия; технологические параметры процесса напыления.

Введение

Обеспечение длительной и надежной работы лопаток газовых турбин, эксплуатируемых в энергетике и нефтегазовой отрасли, в ряде случаев возможно только при создании

на поверхности деталей защитного покрытия, наносимого различными методами. В практике производства рабочих и направляющих лопаток турбин для создания защитных покрытий активно применяется плазменный способ,

являющийся разновидностью газотермического метода [1–6]. В основе газотермического метода лежат процессы нанесения покрытий расплавленными частицами, которые при контакте с поверхностью детали формируют слоистый материал из сильно деформированных частиц, соединенных между собой по контактными поверхностям [7–8]. Такие покрытия на основе никеля и/или кобальта способны успешно противостоять действию агрессивного высокотемпературного газового потока и обеспечивать требуемый уровень работоспособности лопаток в целом [9–10].

Качество газотермических покрытий, нанесенных на лопатки плазменным способом, во многом зависят от технологии, принятой на предприятии. Любая технология должна решать два основных и зачастую противоположных вопроса: производительность процесса и качество обработки. При плазменном напылении покрытия на лопатки, относящиеся к наиболее ответственным деталям газовой турбины, производство покрытия должно проводиться не только с высокой скоростью осаждения защитного слоя, но и обеспечивать гарантированную адгезионную и когезионную прочность покрытия с подложкой [11–16].

1. Методика эксперимента

В работе изучалось влияние технологических параметров процесса плазменного напыления покрытий на основе кобальта CoNiCrAlY и никеля NiCrAlY (скорости перемещения плазмотрона S , м/мин и угла падения плазменной струи α , град.) на их выходные параметры, прямо или косвенно отражающие качество покрытия: толщина слоя покрытия, наносимого за один проход плазмотрона (h_1 , мкм), прочность сцепления покрытия (σ , МПа), шероховатость поверхности покрытия (Rz , мкм), скорость износа покрытия при воздействии на него струи абразивного материала ($V_{и}$, мг/с). Напыление проводилось на установке Artec, входящей в состав роботизированного комплекса для нанесения газотермических покрытий. Мощность плазмотрона составляла 55 кВт. В ка-

честве образцов использовались пластины толщиной до 2 мм из жаропрочного сплава IN738 на никелевой основе.

Отжиг образцов с покрытием проводился на воздухе (камерная печь СНОЛ 500/12ВП, температура 850 °С, выдержка 2 ч) и в вакууме (печь вакуумная Irsen 6100-TITAN, температура 1050 °С, выдержка 4 ч). Испытания на износ проводились на специальной установке, обеспечивающей воздействие на поверхность покрытия струи абразивного материала. В качестве абразивного материала использовался оксид алюминия марки 25А зернистостью F100. При испытаниях давление сжатого воздуха составляло 0,6...0,7 МПа, дистанция между срезом сопла и плоскостью испытуемого образца 200 ± 5 мм, угол атаки струи абразивного материала – 90°. Оценка износа покрытия проводилась гравиметрическим методом с использованием аналитических весов марки ВЛ-124В.

2. Результаты и их обсуждение

Зависимости выходных параметров от технологических приведены на рис. 1. Представленные зависимости позволяют отметить следующее:

- толщина наносимого слоя сильно зависит от скорости перемещения плазмотрона и слабо зависит от наклона падающей струи: при возрастании параметра S от 3,6 до 60 м/мин величина h_1 увеличивается в 6...8 раз при углах атаки от 90° до 45°;

- зависимость шероховатости поверхности носит другой характер: при возрастании S в рассматриваемом диапазоне величина Rz остается практически на постоянном уровне и имеет тенденцию к падению примерно в 1,5 раза при увеличении угла падающей струи от 45° до 90°;

- прочность сцепления покрытия с подложкой зависит от обоих анализируемых параметров, показывая тенденцию к росту в 1,2...1,6 раза при увеличении параметра S и уменьшении величины α от 90° до 45°;

- скорость абразивного износа покрытия увеличивается в 1,4...1,7 раза при росте скорости перемещения плазмотрона и падает в 1,2...1,6 раза при повышении угла α .

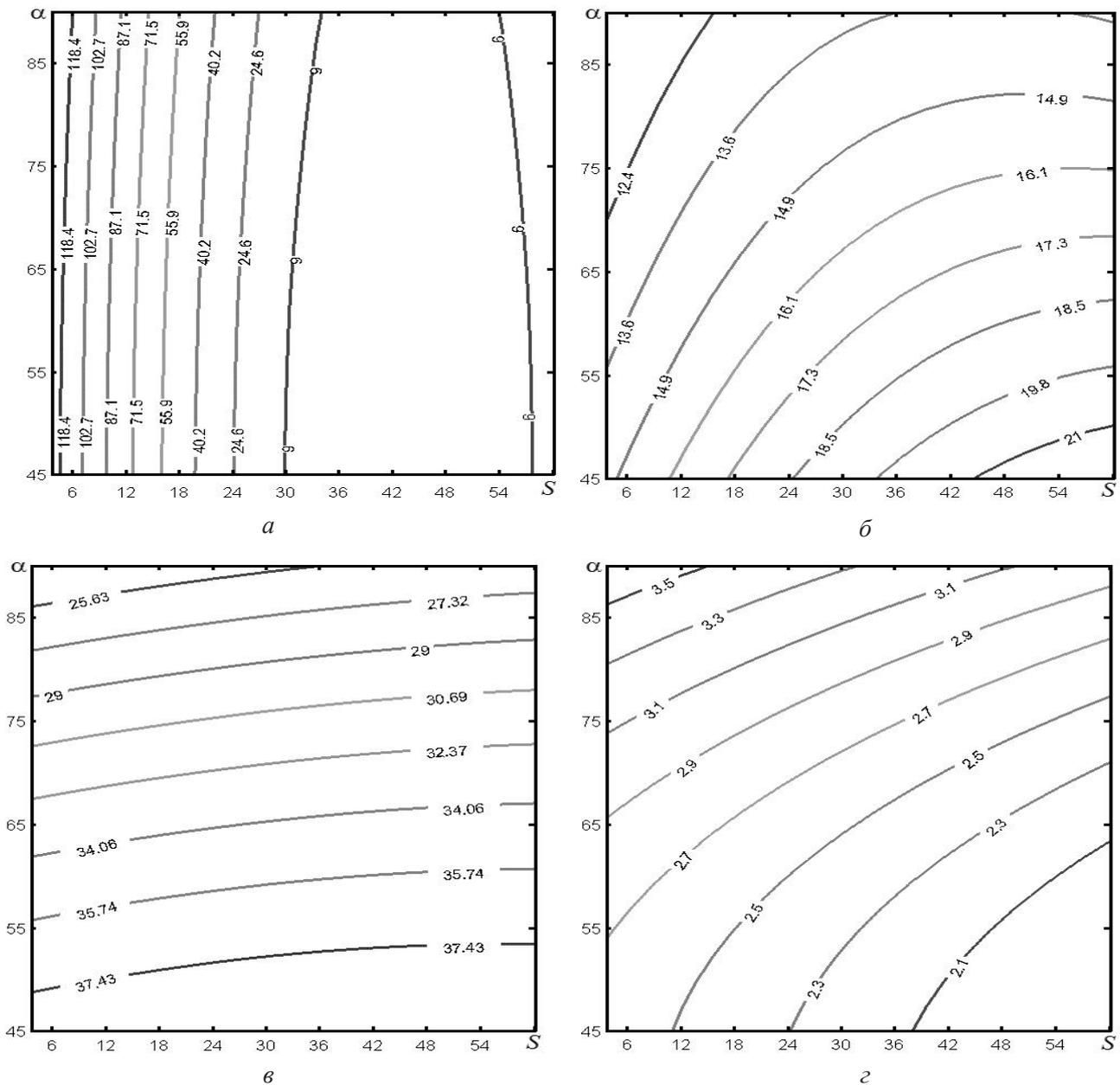


Рис. 1. Зависимость эксплуатационных параметров газотермических покрытий от технологических параметров процесса нанесения (S – скорость перемещения плазматрона, м/мин; α – угол падения плазменной струи, град.): a – толщина слоя покрытия за один проход плазматрона (h_p , мкм); $б$ – прочность сцепления покрытия (σ , МПа); $в$ – шероховатость поверхности покрытия (Rz , мкм); $д$ – скорость износа покрытия (V_w , мг/с)

Fig. 1. The dependence of the operational parameters of thermal spray coatings on the technological parameters of the deposition process (S – plasma torch moving speed, m/min; α – plasma jet incidence angle, deg.): a – coating layer thickness in one pass of the plasma torch; (h_p , μm); b – coating adhesion strength (σ , MPa); c – surface roughness of the coating (Rz , μm); d – coating wear rate (V_w , mg/s)

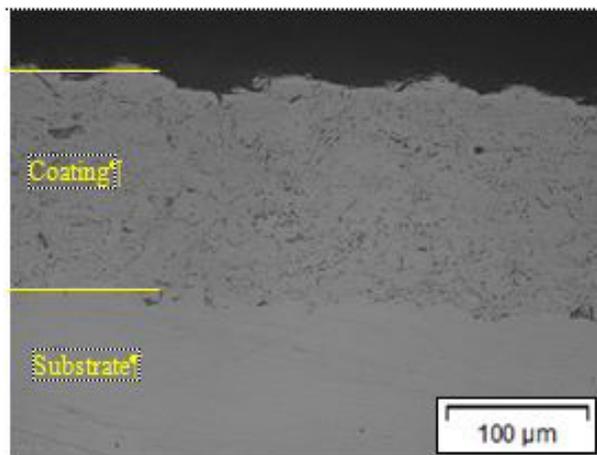
Полученные зависимости объясняются динамикой нагрева поверхности жаропрочного сплава газовой струей, генерируемой плазматроном. Так по данным работ [1, 4] при газотермическом напылении наблюдаются процессы передачи тепла от нагретого потока газа к обтекаемой подложке, реализуемые за счет механизма газокINETической теплопроводности. При этом в случае обте-

кания плоских пластин при падении струи на подложку под углом 45° за счет плавного обтекания поверхности преимущественно реализуется ламинарный характер течения газа в погранслое, а при прямом ударе – турбулентный. В случае турбулентного характера течения газа тепловая нагрузка на подложку до 5 раз интенсивнее, что вызывает больший разогрев образцов и, как следствие, повыше-

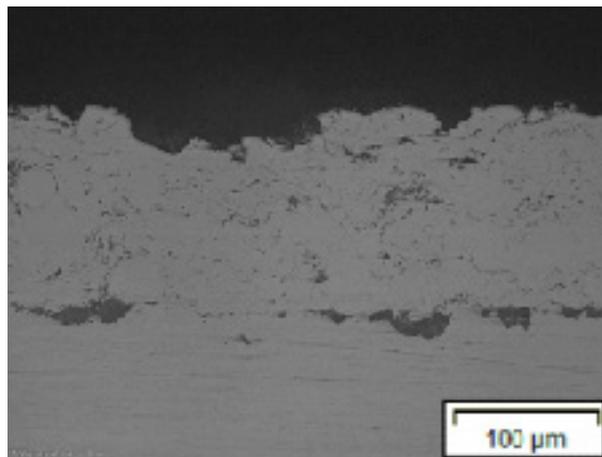
ние доли окисленных частиц в структуре напыляемого покрытия, о чем свидетельствуют результаты металлографического анализа (рис. 2). Кроме того, турбулентный характер течения газа в погранслое приводит к образованию на границе покрытия с подложкой значительного количества пор и пустот, которые негативно сказываются на прочности сцепления покрытия с основным материалом.

Доля окисленных частиц в покрытии зависит и от длительности воздействия на поверхность газовой струи: при более высокой скорости перемещения плазматрона поверхность разогревается меньше, в результате чего доля окисленных частиц закономерно снижается. Снижение доли окисленных частиц приводит к повышению качества газотермического покрытия: наблюдается рост его адгезионной и когезионной прочности [10, 14, 17]. Однако снижение доли окисленных частиц за счет уменьшения угла атаки не может являться кардинальным методом повышения качества покрытия, т.к. в этом случае происходит увеличение шероховатости его поверхности, что в ряде случаев приводит к необходимости введения дополнительной обработки по сглаживанию неровностей.

Оценка когезионной прочности газотермических покрытий выполнялась косвенным методом путем расчета скорости износа покрытия при воздействии на него струи абразивного материала [15, 16, 18]. В ходе таких испытаний была получена зависимость динамики скорости износа (рис. 3).



а



б

Рис. 2. Структура газотермического покрытия на основе кобальта, нанесенного по различным режимам: а – $S=18$ м/мин, $\alpha=45^\circ$; б – $S=3,6$ м/мин, $\alpha=90^\circ$

Fig. 2. The structure of the thermal spray coating based on cobalt deposited in various modes: а – $S=18$ м/мин, $\alpha=45^\circ$; б – $S=3,6$ м/мин, $\alpha=90^\circ$

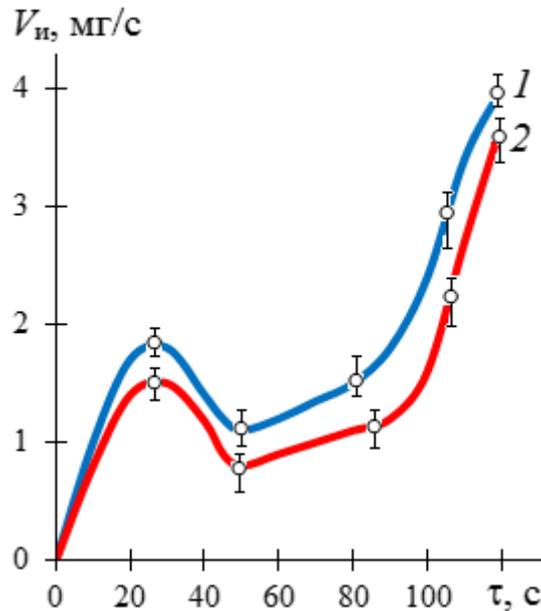


Рис. 3. Динамика скорости износа газотермических покрытий на основе кобальта (1) и никеля (2)

Fig. 3. The dynamics of the wear rate of thermal spray coatings based on cobalt (1) and nickel (2)

Из представленных данных видно, что скорость износа не является линейной функцией от времени, что вызвано различиями в строении покрытия по его толщине. Верхние слои, унос которых происходит в начальные моменты воздействия абразивного материала, являются более рыхлыми и обладают слабой когезией. Внутренние слои покрытия характеризуются большей плотностью и их разрушение требует большего времени, в результате чего скорость износа закономерно снижается. По мере приближения к подложке скорость уноса нижних слоев покрытия вновь возрастает и достигает своего максимума в момент полного срабатывания покрытия.

Анализ зависимостей на рис. 3 также показал, что покрытие на никелевой основе обладает большей когезионной прочностью, чем покрытие на кобальтовой основе. Полученные результаты могут быть объяснены большей вязкостью никелевого покрытия и его способностью пластически деформироваться без разрушения при воздействии частиц абразивного материала.

Дополнительным технологическим фактором, оказывающим значительное влияние на качество газотермических покрытий, является термическая обработка, выполняемая для снижения уровня остаточных напряжений в покрытии, для упрочнения слоев покрытия и формирования диффузионной зоны на границе с подложкой [19, 20]. О влиянии среды, в которой проводился отжиг, судили по скорости износа покрытий при воздействии на них струи абразивного материала. Перед испытаниями на износ образцы с покрытием после соответствующего вида термической обработки подвергались исследованию микроструктуры напыленного слоя. Металлографический анализ покрытия после термообработки на воздухе показал, что структура покрытия по сравнению с исходным состоянием (без термической обработки) претерпевает некоторые изменения: наблюдается проявление более четкого слоистого характера покрытия и увеличение доли окисленных частиц (рис. 4).

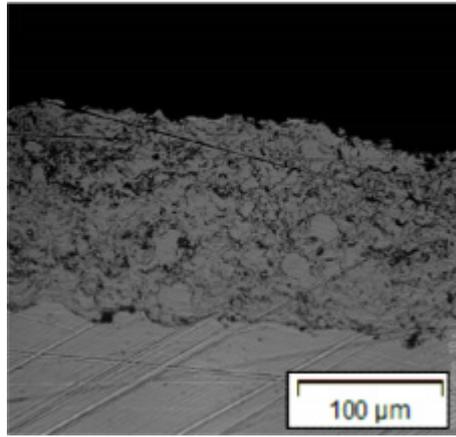
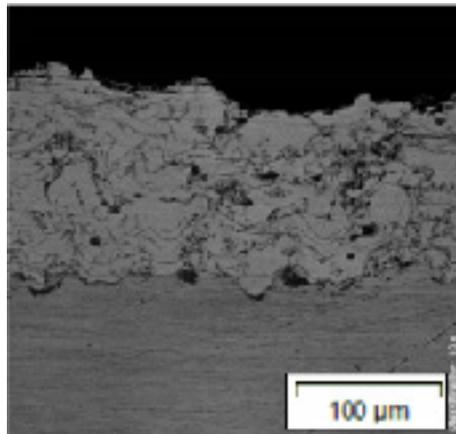
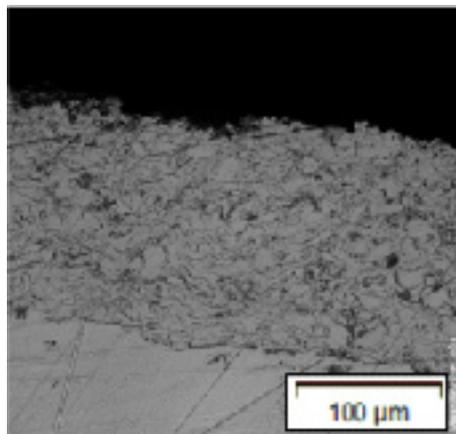
*a**б**в*

Рис. 4. Микроструктура газотермического покрытия на основе никеля до (*a*) и после термической обработки на воздухе (*б*) и в вакууме (*в*)

Fig. 4. The microstructure of the nickel-based thermal spray coating before (*a*) and after heat treatment in air (*b*) and in vacuum (*c*)

В отличие от воздуха вакуумная среда обеспечивает некоторое уплотнение покрытия и формирование диффузионной зоны на границе с подложкой. При этом окисления частиц в покрытии не наблюдается, хотя в морфологии покрытия также проявляется более слоистый характер. Такие структурные изме-

нения в покрытии обуславливают и разную скорость износа покрытий (рис. 5), которые за время испытаний сохранили свою сплошность: отслоений, вспучиваний и сколов при воздействии абразивной струи на поверхность покрытий не обнаружено.

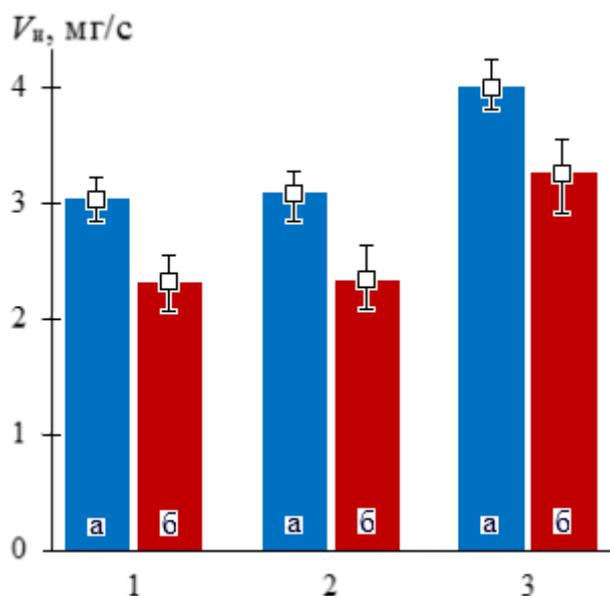


Рис. 5. Влияние среды термической обработки на скорость износа газотермических покрытий на основе кобальта (а) и никеля (б): 1 – исходное состояние (без термической обработки); 2 – термическая обработка в вакууме; 3 – термическая обработка на воздухе

Fig. 5. The influence of the heat treatment medium on the wear rate of thermal spray coatings based on cobalt (a) and nickel (б): 1 – initial state (without heat treatment); 2 – heat treatment in vacuum; 3 – heat treatment in air

Из представленных на рис. 5 данных видно, что термообработка в вакууме практически не оказывает влияния на когезионные свойства газотермических покрытий: скорость износа остается на том же уровне. Термическая обработка покрытия на воздухе приводит к ухудшению когезии: скорость износа возрастает в 1,3...1,4 раза.

Данная тенденция характерна для газотермического покрытия и на основе кобальта, и на основе никеля. При этом износ покрытия на никелевой основе остается меньше, чем износ покрытия на кобальтовой основе при любом термическом воздействии на покрытие. Выявленная закономерность связана с разной плотностью исследуемых покрытий: покрытие на основе никеля обладает плотностью 6,7 г/см³, а покрытие на основе кобальта – 5,7 г/см³. Как следует из данных работ [18, 21], более плотные покрытия обладают хорошей адгезионной и когезионной прочностью, а следовательно, являются и более износостойкими.

Заключение

Таким образом, оптимизация процесса газотермического напыления покрытий на никелевой и кобальтовой основе позволила установить наиболее эффективные режимы

нанесения защитных слоев по критериям максимальной адгезии и когезии покрытия к подложке. За счет управления скоростью перемещения плазмотрона и углом подачи газовой струи к подложке достигнуты условия, при которых происходит формирование покрытия требуемой толщины с заданным набором эксплуатационных свойств. Установлено, что термическая обработка покрытий в вакуумной среде как метод повышения их качества оказывает относительно слабое влияние и не может служить управляющим технологическим параметром. Применение термической обработки в воздушной среде не рекомендуется в связи с образованием значительного объема окисленных частиц, снижающих стойкость покрытия к воздействию абразива. Показано, что в целом износостойкость газотермических покрытий на основе никеля выше, чем покрытий на основе кобальта. Данная закономерность обусловлена большей плотностью никелевых покрытий.

Список литературы

1. Dorfman M. R. Thermal Spray Coatings // Handbook of Environmental Degradation of Materials. 2018. P. 469–488.
2. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. Thermal Spray Fundamentals From Powder

- to Part. Springer: New York, NY, 2014. P. 1566. DOI: 10.1016/b978-0-323-52472-8.00023-x.
3. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 360 с.
 4. Балдаев Л. Х. Газотермическое напыление. М: Маркет ДС, 2007. 344 с.
 5. Смыслов А. М. Технология защитно-упрочняющей обработки деталей ГТД. Уфа: УГАТУ, 2008. 233 с.
 6. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. 2nd ed. Wiley: Southern Gate, 2008. P. 656.
 7. Neumin V. M., Ignatova S. A. The use of thermal spraying technology for coatings and surfacing in the electric power industry // Safety and Reliability of Power Industry. 2016. V. 1, No. 32. P. 68–73.
 8. Балдаев Л. Х. Газотермическое напыление порошковых материалов для получения защитных покрытий с заданными свойствами // Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Курск: КГТУ, 2010. 32 с.
 9. Dokukina I. A. Increase of operational characteristics of details at the expense of depositions plasma thermal spray coatings cluster structure // Bulletin of the Samara State Aerospace University. 2012. V. 5, No. 36. P. 49–54.
 10. Niranatlumpong P., Ponton C. B., Evans H. E. The Failure of Protective Oxides on Plasma-Sprayed NiCrAlY Overlay Coatings // Oxidation of Metals. 2000. V. 53, No. 3/4. P. 241–258. DOI: 10.1023/a:1004549219013.
 11. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А. Ф. Ильющенко и др. Минск: Беларус. навука, 2011. 357 с.
 12. Chesov Yu. S., Zverev E. A. A technique of wear-resistant plasma coating spraying // Scientifac Bulletin of NSTU. 2014. V. 55, No. 2. P. 156–165.
 13. Assessment of influence of parameters of process gas-thermal dusting of coverings on their properties by using methods of mathematical planning / M. A. Ageev, et. al. // Bulletin of Polotsk State University. Series B. 2017. No. 3. P. 35–40.
 14. Effect of thermal treatments on adhesive properties of a NiCr thermal sprayed coating / J. Lesage et. al. // Thin Solid Films. 2000. V. 377–378. P. 681–686. DOI: 10.1016/s0040-6090(00)01450-4.
 15. Tribology of NiCrAlY+Al₂O₃ composite coatings by plasma spraying with hybrid feeding of dry powder + suspension / G. Bolelli et. al. // Wear. 2015. V. 344–345. P. 69–85. DOI: 10.1016/j.wear.2015.10.014.
 16. Irissou E., Dadouche A., Lima R. S. Tribological Characterization of Plasma-Sprayed CoNiCrAlY-BN Abradable Coatings // Journal of Thermal Spray Technology. 2014. V. 23, No. 1–2. P. 252–261. DOI: 10.1007/s11666-013-9998-4.
 17. Marginean G., Utu D. Cyclic oxidation behaviour of different treated CoNiCrAlY coatings // Applied Surface Science. 2012. V. 258, Iss. 20. P. 8307–8311. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.05.050.
 18. Vopneruk A. A., Valiev R. M., Bazilevsky A. A. The use of thermal spray coatings to protect against abrasive wear // Armaturostroenie. 2010. V. 4, No. 67. P. 68–72.
 19. Verdian M. M. Finishing and Post-Treatment of Thermal Spray Coatings // Comprehensive Materials Finishing. 2017. V. 3. P. 191–206. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09200-6.
 20. Salavati S., Coyle T. W., Mostaghimi J. The Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Thermally Sprayed Sandwich Structure Beams // Journal of Thermal Spray Technology. 2016. V. 25, No. 1–2. P. 105–112. DOI: 10.1007/s11666-015-0304-5.
 21. Porosity and Its Significance in Plasma-Sprayed Coatings / J. G. Odhiambo et. al. // Coatings. 2019. V. 9, No. 7. P. 460. DOI: 10.3390/coatings9070460.