

УДК 621.793+621.431.75

ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ НА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОМ ПОДСЛОЕ, ПОЛУЧЕННОЕ МЕТОДОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ, ДЛЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2014 Ю. П. Тарасенко¹, И. Н. Царёва¹, О. Б. Бердник¹,
Я. А. Фель¹, Д. Г. Федорченко²

¹Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород

²ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

В статье обсуждается задача защиты от высокотемпературной газовой коррозии и высокого градиента температур рабочей поверхности турбинных лопаток, изготавливаемых из жаропрочных никелевых сплавов. Улучшение эксплуатационных свойств теплозащитного покрытия достигается за счёт повышения энергетических характеристик процесса плазменного напыления (температура плазменного потока, среднемаховая скорость истечения плазменной струи) на модернизированном оборудовании с использованием плазмотрона ПНК-50. Особое значение в работе уделено изучению высокотемпературной стабильности сплава ЖС6Ф, так как в процессе высокоэнергетического плазменного напыления происходит сопутствующий нагрев подложки. В работе изучены закономерности формирования фазового состава и микроструктуры теплозащитного покрытия диоксида циркония, сформированного на интерметаллидном подслое системы «Ni-Co-Cr-Al-Y», напылённого из порошковой смеси ПНК20Х20Ю13 с разной дисперсностью частиц. Приведены результаты исследований структуры, физико-механических свойств и эффективности теплозащиты покрытия диоксида циркония, сформированного методом высокоэнергетического плазменного напыления и предназначенного для обеспечения теплозащиты турбинных лопаток газотурбинных двигателей. Согласно результатам исследования разработанные покрытия предназначены для защиты от высокого градиента температур при пусковых нагрузках, газовой коррозии и эрозионного износа турбинных лопаток ГТД различного назначения.

Высокоэнергетическое плазменное напыление, теплозащитное покрытие, диоксид циркония, интерметаллидный подслои, высокотемпературная газовая коррозия.

Введение

При длительной эксплуатации с высокими термомеханическими нагрузками в среде горючих газов турбинные лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) подвержены высокотемпературной газовой коррозии и эрозионному износу. В данной работе задача защиты от высокотемпературной газовой коррозии и высокого градиента температур рабочей поверхности турбинных лопаток, изготавливаемых из жаропрочных никелевых сплавов, решается посредством использования теплозащитного покрытия диоксида циркония, сформированного на интерметаллидном подслое системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» методом высокоэнергетического плазменного напыления.

Методика исследований

Улучшение эксплуатационных свойств теплозащитного покрытия достигается за счёт повышения энергетических характеристик процесса плазменного напыления (температура плазменного потока 5000-12000 К, среднемаховая скорость истечения плазменной струи $V=2400$ м/с) на модернизированном оборудовании (на базе установки «Киев-7» с использованием плазмотрона ПНК-50 оригинальной конструкции и повышенной мощности ~50 кВт) [1] с линейной и кольцевой схемой ввода порошка.

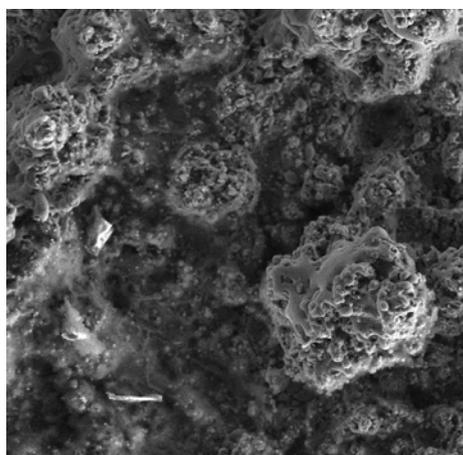
Исследования выполнены на образцах из жаропрочного никелевого сплава ЖС6Ф, используемого при изготовлении рабочих лопаток турбин авиационных ГТД, с учётом микроструктуры и физико-механических свойств основного матери-

ала. В работе использованы методы рентгенографии, электронной микроскопии, измерения плотности, пористости и шероховатости, испытания твёрдости, жаростойкости, эффективности теплозащиты и термоусталости.

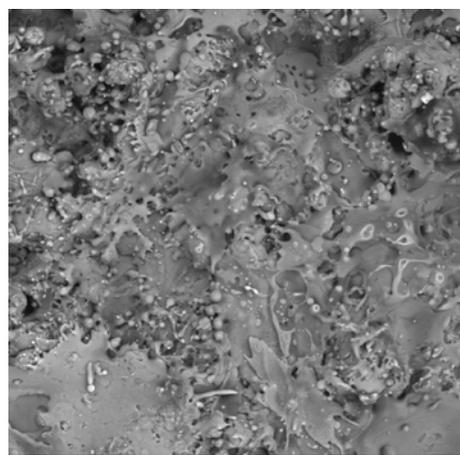
Результаты исследований

В работе изучены закономерности формирования фазового состава и микроструктуры интерметаллидного подслоя системы «Ni-Co-Cr-Al-Y», сформированного из порошковой смеси ПНК20Х20Ю13 с разной дисперсностью частиц: 40/80 мкм и 20/60 мкм. Методом

рентгеноструктурного анализа установлено, что из порошка, имеющего однофазный интерметаллидный состав (β -MeAl), при высокоэнергетическом плазменном напылении формируется двухфазное покрытие интерметаллидного состава: (β -MeAl) + (γ' -Me₃Al) [2]. Уменьшение размерности порошковой смеси закономерно приводит к уменьшению размера и увеличению количества сфероидальных интерметаллидных зёрен, которые образуются при оплавлении граней частиц, проходящих через плазменную струю (рис. 1, 2).

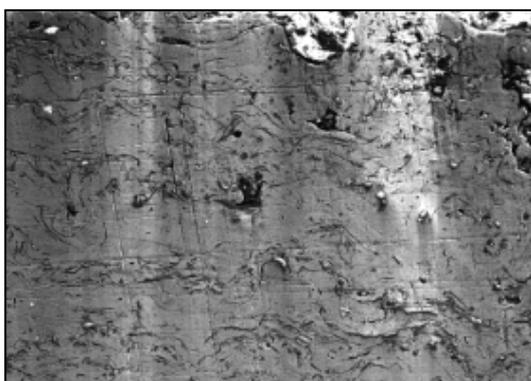


а (X1000)

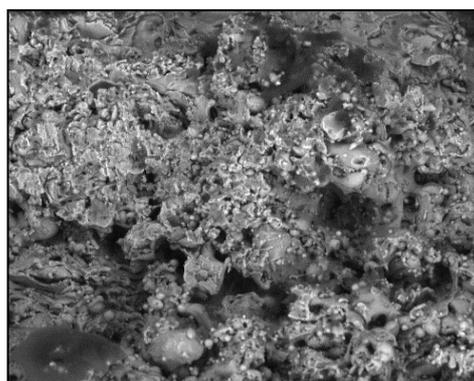


б (X2000)

Рис. 1. Микроструктура поверхности интерметаллидных подслоев, полученных из порошковой смеси ПНК20Х20Ю13-1 с дисперсностью частиц: а - 40/80 мкм, б - 20/60 мкм



а



б

Рис. 2. Поперечное сечение интерметаллидных подслоев, полученных из порошковой смеси ПНК20Х20Ю13-1 с дисперсностью частиц: а - 40/80 мкм, б - 20/60 мкм (X1000)

Сравнительные механические характеристики подслоев, полученных из одной марки порошка, но разной дисперсности, приведены в табл. 1. Оба подслоя имеют хороший комплекс

физико-эксплуатационных свойств. При этом лучшими показателями плотности, твёрдости, шероховатости и жаростойкости обладает подслоя, сформированный из смеси с дисперсностью 20/60 мкм.

Таблица 1. Сравнительные характеристики подслоев «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученных из порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 разной дисперсности

Физико-механические характеристики подслоя	Дисперсность порошка 40/80 мкм	Дисперсность порошка 20/60 мкм
Фазовый состав	$\beta + \gamma'$ (~40 %)	$\beta + \gamma'$ (~30 %)
ρ , кг/м ³	7900	8200
P_o , %	0,7	1,6
H_{100} , ГПа	7,70	7,85
R_a , мкм	~7	~5
Отношение жаростойкости покрытия (500 ч) к жаростойкости основного материала $(\Delta m/m_0)^{500}/(\Delta m/m_0)^{Ma}$, отн.ед.	1,3	2,5

При выполнении работ по оптимизации эффективности теплозащиты рабочей поверхности турбинных лопаток из сплава ЖС6Ф изучены закономерности формирования фазового состава и микроструктуры покрытий ZrO_2 , сформированных на интерметаллидном подслое «Ni-Co-Cr-Al-Y» (с фазовым составом $\beta + \gamma'$) из порошковой смеси ЦрОИ-7 с разной дисперсностью частиц (~90 и ~40 мкм), вводимой в плазменную струю по разным схемам ввода порошка: линейной и кольцевой [3].

Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что из порошка с фазовым составом: тетрагональный - ZrO_2 + остаточный моноклинный - ZrO_2 , при высокоэнергетическом плазменном напылении формируется двухфазное покрытие из тетрагональной и кубической фаз (~10 %) с преобладанием первой. Методом дериватографии установлено, что фазовое превращение происходит при температуре

~840 °С и обусловлено термическим воздействием высокоэнергетического плазменного потока.

Уменьшение размерности порошковой смеси закономерно приводит к уменьшению размера и увеличению количества сфероидальных зёрен, которые образуются при оплавлении граней частиц, проходящих через плазменную струю (рис. 3). Микроструктура поперечного покрытия представлена на рис. 4.

Особенностью микроструктуры двухслойного покрытия является то, что на интерметаллидных зёрнах подслоя формируется микроструктура «ёлочного типа» (рис. 5, а) с размером столбчатых субзёрен ZrO_2 в поперечном сечении ~ 100 - 200 нм (рис. 5, б).

Оптимальный комплекс эксплуатационных свойств получен для покрытия диоксида циркония, сформированного из мелкодисперсной смеси при кольцевой схеме ввода порошка (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительные характеристики покрытий диоксида циркония, полученных из порошковой смеси ЦрОИ-7 различной дисперсности по разным схемам ввода порошковой смеси

Физико-механические характеристики покрытия	Линейный ввод порошка 40/90 мкм	Кольцевой ввод порошка 40 мкм
Общая пористость, %	9,5	4,3
Открытая пористость, %	1,5	1,0
Плотность ρ , кг/м ³	7100	7600
Твёрдость HV, Гпа	9,3	9,8
Шероховатость R_a , мкм	7,0	5,4

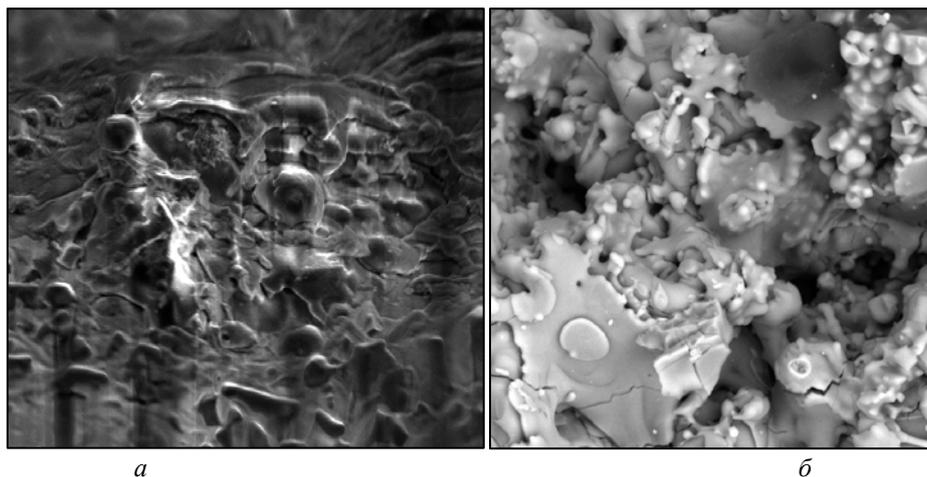


Рис. 3. Микроструктура поверхности покрытий диоксида циркония, полученных из порошковой смеси ЦрОИИ-7 с дисперсностью частиц: а - 40/90 мкм (линейный ввод), б - 40 мкм (кольцевой ввод) (X5000)

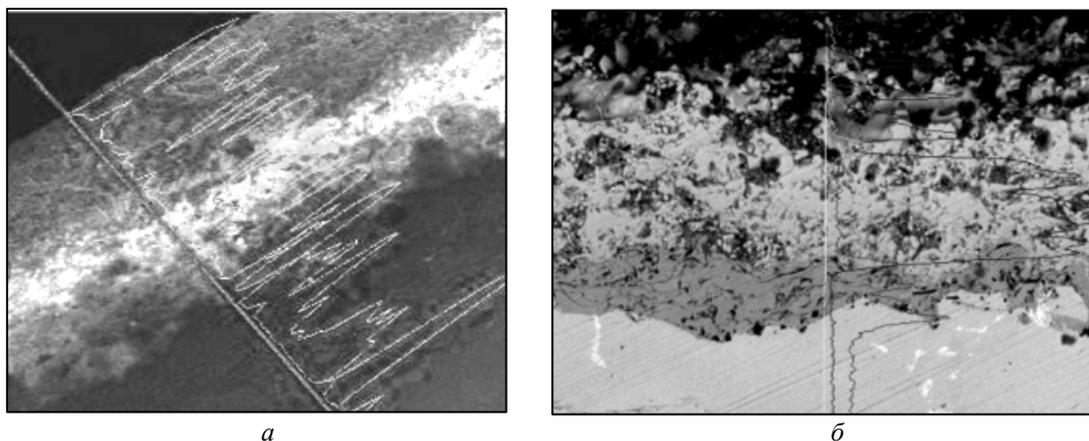


Рис. 4. Поперечное сечение покрытий диоксида циркония, полученных из порошковой смеси ЦрОИИ-7 с дисперсностью частиц: а - 40/90 мкм (линейный ввод), б - 40 мкм (кольцевой ввод) (X2000)

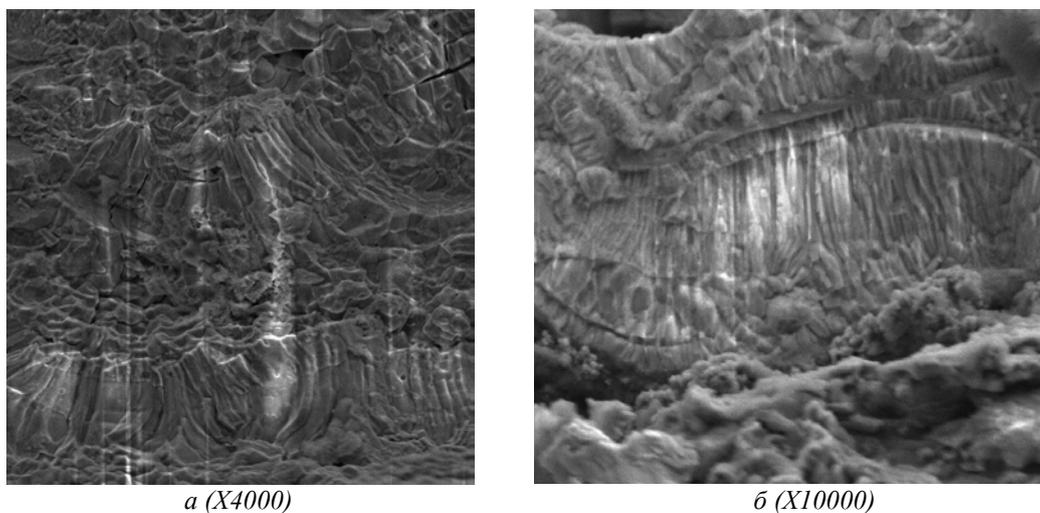


Рис. 5. Микроструктура (а) и субструктура (б) двухслойного теплозащитного покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO₂»

Особое значение в работе уделено изучению высокотемпературной стабильности сплава ЖС6Ф, так как в процессе высокоэнергетического плазменного напыления происходит сопутствующий нагрев подложки.

Свойства жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для изготовления лопаток газовых турбин, определяются термической стабильностью их микроструктуры, размерами, формой и количеством упрочняющей γ' -фазы, прочностными характеристиками γ -твёрдого раствора, оптимальным соотношением параметров кристаллических решёток γ - и γ' -фаз, распределением карбидной фазы. Обычно жаропрочные сплавы упрочняют путём целенаправленного многокомпонентного легирования. Суть многокомпонентного легирования состоит в обеспечении жаропрочности путём совершенствования гетерофазного строения, включающего контролируемое выделение частиц упрочняющей γ' -фазы, обеспечении её термической стабильности, целенаправленном изменении морфологии, параметров кристаллических решёток γ - и γ' - фаз, их влияния на дислокационную структуру сплавов, а также на протекание диффузионных процессов.

ЖС6Ф – литейный сплав на никелевой основе с высокой жаропрочностью (элементный состав: Ni- 50,3%, Fe- 12,2%, W-11,9%, Co- 4,9%, Cr-4,9%, Al-5,4%, Ti-1,1%, Nb-1,4%, V-1,1%, Zr-0,06%, C-0,12%, B-0,015%, Hf-следы). Максимальная рабочая температура сплава составляет 1050 °С. Легирование сплава алюминием и хромом обеспечивает формирование упрочняющих интерметаллидной и карбидной фаз, повышая его жаропрочность. Введение гафния усиливает карбидную ликвацию, способствует образованию в поверхностном слое карбидов Me_6C . Наличие ванадия и титана способствует дополнительному улучшению жаропрочных свойств.

По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что основной фазовой составляющей сплава ЖС6Ф яв-

ляется твёрдый раствор упрочняющих интерметаллидной, карбидной фаз и легирующих элементов в никеле (γ -Ni). Крупные выделения карбидной фазы расположены преимущественно по границам зёрен (рис.6).



Рис. 6. Микроструктура сплава ЖС6Ф (X250)

С целью изучения температурной стабильности сплава использовали метод релаксационных испытаний, позволяющий определять предел текучести (σ_T) и предел микропластичности (σ_0). Установлено увеличение предела микропластичности сплава ЖС6Ф на 42 % (с 250 до 355 МПа) и снижение предела текучести на 10 % (с 730 до 653 МПа) в результате высокотемпературного воздействия.

По результатам проведённых испытаний эксплуатационных свойств разработанного теплозащитного покрытия достигнуто увеличение жаростойкости поверхности лопатки из сплава ЖС6Ф в 4 раза, снижение температуры на стенке лопатки из этого сплава на 125 °С (рис. 7, 8) и увеличение термоциклической долговечности (до образования трещины на выходной кромке лопатки) на 34 %.

Заключение

Разработанные покрытия предназначены для защиты от высокого градиента температур при пусковых нагрузках, газовой коррозии и эрозионного износа турбинных лопаток ГТД различного назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке и сотрудничестве с ОАО «КУЗНЕЦОВ».

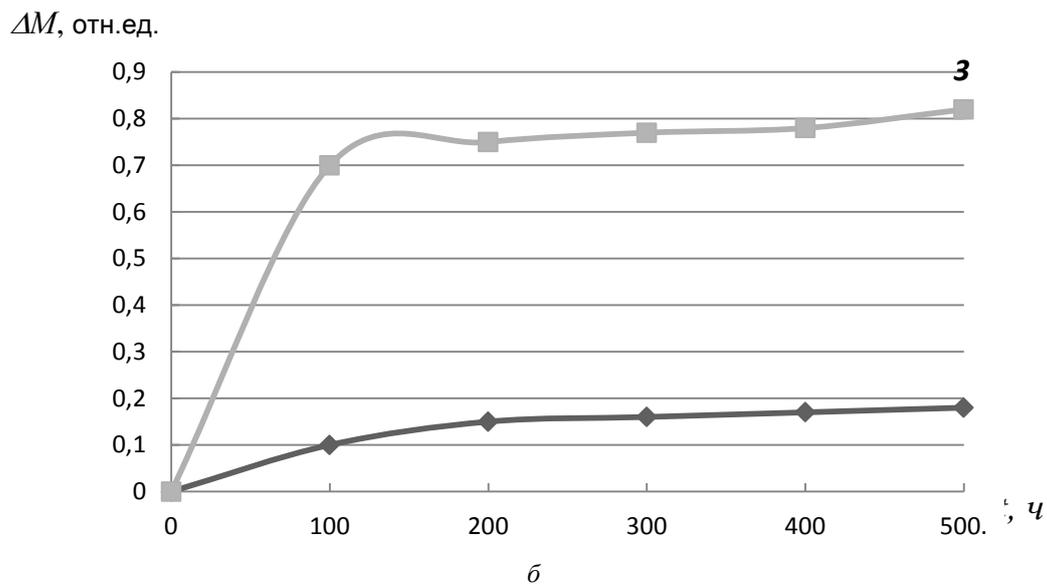
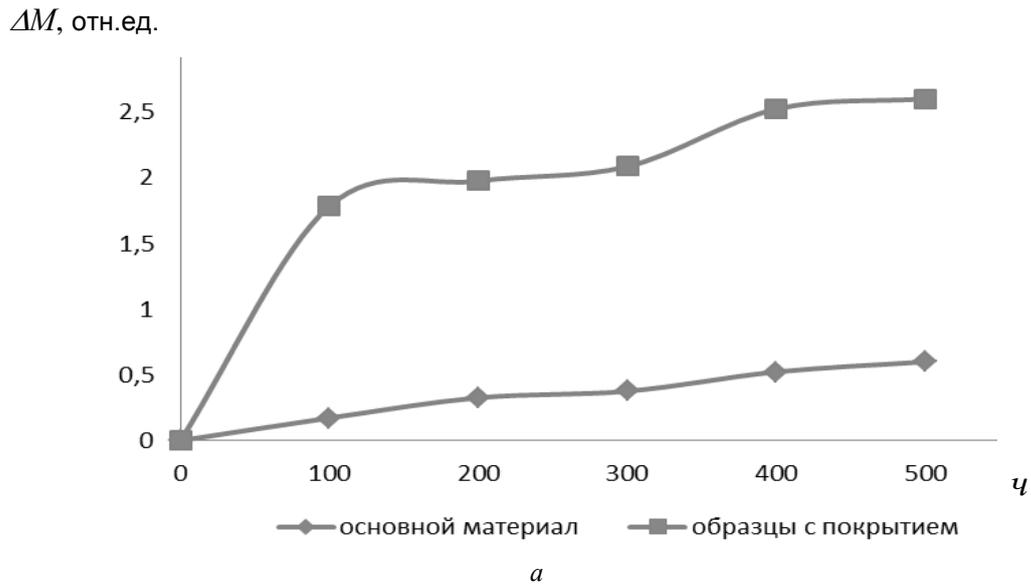


Рис. 7. Относительное изменение массы образцов из сплава ЖС6Ф до и после нанесения интерметаллидного подслоя «Ni-Co-Cr-Al-Y» (а) и теплозащитного покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO₂» (б) от времени изотермической выдержки:
 кривая 1 – сплав ЖС6Ф; кривая 2 – ЖС6Ф + подслоя «Ni-Co-Cr-Al-Y»;
 кривая 3 – ЖС6Ф + ТЗП «Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO₂»

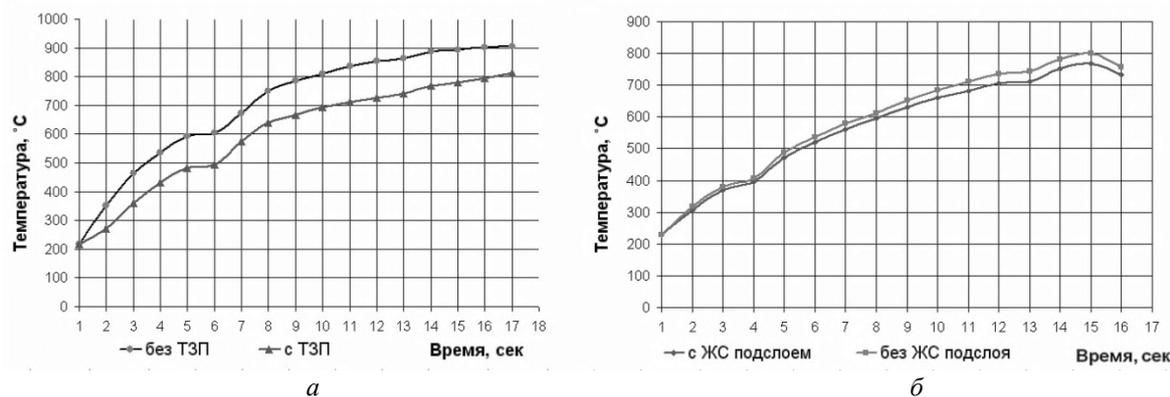


Рис. 8. Результаты оценки эффективности тепловой защиты металла с помощью ТЗП (а) и жаростойкого подслоя (б)

Библиографический список

1. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Засыпкин И.М. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. Новосибирск: Наука, 1981. 219 с.

2. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с наночастицами. М.: МИСиС, 2008. 327 с.

3. Тарасенко Ю.П., Царёва И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А., Разов Е.Н. Разработка высокоэнергетического плазменного метода нанесения теплозащитных покрытий диоксида циркония на турбинные лопатки ГТД // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. Н. Новгород: Изд-во общества Интел-сервис, 2013. № 22 (1). С. 11-30.

Информация об авторах

Тарасенко Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Царёва Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Бердник Ольга Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук,

г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Фель Яков Абрамович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Федорченко Дмитрий Геннадьевич, генеральный конструктор ОАО «Кузнецов», г. Самара. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

HEAT-SHIELDING ZIRCONIUM DIOXIDE COATING ON AN INTERMETALLIC SUBSTRATE OBTAINED BY THE METHOD OF HIGH-ENERGY PLASMA SPRAYING FOR GAS-TURBINE ENGINE TURBINE BLADES

© 2014 Y. P. Tarasenko¹, I. N. Tsareva¹, O. B. Berdnik¹,
Ya. A. Fel¹, D. G. Fedorchenko²

¹Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

²“KUZNETSOV” Open Joint-Stock Company, Samara, Russian Federation

The paper discusses the task of protecting the working surface of turbine blade made of heat-resistant nickel alloys against high-temperature gas corrosion and high temperature gradient. Improvement of the performance characteristics of a heat-shielding coating is achieved by increasing the energy characteristics of the plasma spraying process (temperature of the plasma flow, mass-average velocity of the plasma jet) with the help of up-to-date ЖС6Ф equipment using a ПНК-50 plasma torch. Special attention is given to the study of high-temperature stability of the alloy as the process of high-energy plasma spraying is associated with the heating of the substrate. The patterns of forming the phase composition and microstructure of the zirconium dioxide coating formed on the intermetallic substrate of the “Ni-Co-Cr-Al-Y” system, sprayed using the ПНК20Х20Ю13 powder mixture with particles of various dispersion are analyzed. The results of research of the structures, physical and mechanical properties as well as the efficiency of a zirconium dioxide heat-shielding coating, formed by high-energy plasma spraying and designed to provide thermal protection of turbine blades of gas turbine engines are presented. The results of the investigation showed that the coatings developed are designed to protect various-application gas turbine blades against the starting load high-temperature gradient, gas corrosion and erosive wear.

High-energy plasma spraying, heat-shielding coating, nickel alloy, zirconium dioxide, intermetallic substrate, high-temperature gas corrosion.

References

1. Zhukov M.F., An'shakov A.S., Zasyarkin I.M. Elektrodugovye generatory s mezhelektrodnymi vstavkami [Arc generators with interelectrode inserts]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981. 219 p.
2. Kolobov Y.R., Kablov E.N., Kozlov E.V. et. all. Struktura i svoystva intermetallidnykh materialov s nanofaznym uprochneniem [Structure and properties of intermetallic materials with nanophased hardening]. Moscow: MISiS Publ., 2008. 327 p.
3. Tarasenko Y.P., Tsareva I.N., Berdnik O.B., Fel Y.A., Razov E.N. Razrabotka vysokoenergeticheskogo plazmennogo metoda naneseniya teplozashchitnykh pokrytiy dioksida tsirkoniya na turbinnye lopatki GTD // Sbornik nauchnykh trudov «Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya». No. 22 (1). Nizhniy Novgorod: Intelservis Publ., 2013. P. 11-30. (In Russ.)

About the authors

Tarasenko Yuri Pavlovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of

plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Tsareva Irina Nikolaevna, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian

Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru.
Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Berdnik Olga Borisovna, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Fel Yakov Abramovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Sen-

ior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Fedorchenko Dmitry Gennadevich, Candidate of Science (Engineering), General Designer of the JSC “KUZETSOV”, Samara, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: strengthening and recovery technologies, plasma coatings, material physics, tribology, physics of plasma.