

УДК 621.4-027.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ПОДСЛОЯ ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД

© 2014 Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царёва, О. Б. Бердник,
Я. А. Фель, Л. А. Кривина

Институт проблем машиностроения Российской Академии наук,
г. Нижний Новгород

В работе приведены результаты исследований структуры и физико-механических свойств жаростойкого интерметаллидного покрытия системы «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученного методом высокоэнергетического плазменного порошкового напыления (с применением плазмотрона оригинальной конструкции) и используемого в качестве подслоя при формировании теплозащитного покрытия диоксида циркония. Получено покрытие с интерметаллидным фазовым составом (β -NiAl + γ' -Ni₃Al) и сфероидальной микроструктурой зёрен. Покрытие имеет плотность $\rho = 8200 \text{ кг/м}^3$, микротвёрдость $H_{\mu} = 7,85 \text{ ГПа}$ и шероховатость по параметру $R_a = 5 \text{ мкм}$. По результатам испытаний эффективности теплозащиты стенки турбинной лопатки из сплава ЖС6Ф с помощью теплозащитного покрытия ZrO₂ с подслоем «Ni-Co-Cr-Al-Y» снижение температуры металла составило 398 К. Покрытие предназначено для защиты от высокотемпературной газовой коррозии рабочей поверхности лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД) различного назначения в виде подслоя для теплозащитного покрытия диоксида циркония, а также в качестве самостоятельного жаростойкого покрытия. Разработанное плазменное жаростойкое покрытие системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» апробировано в качестве подслоя теплозащитного покрытия диоксида циркония для продления срока службы рабочих лопаток (из жаростойкого никелевого сплава ЖС6Ф) турбины авиационного газотурбинного двигателя серии НК.

Высокоэнергетическое плазменное напыление, интерметаллидные фазы, сфероидальные зерна, пористость, микротвёрдость, жаростойкость, турбинные лопатки.

Введение

Повышение надёжности и ресурса турбинных лопаток газотурбинных двигателей является приоритетным направлением современного двигателестроения. Совершенствование технологического оборудования для плазменного напыления открывает новые возможности для создания теплозащитных покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами, предназначенных для защиты рабочей поверхности турбинных лопаток газотурбинных двигателей, работающих в условиях воздействия рабочих газов при высоких температурах. Тенденция повышения температуры эксплуатации (до 1273 – 1473 К) турбинных лопаток ужесточает требования, предъявляемые к высокотемпературной стойкости теплозащитных покрытий. В свою очередь, служебные свойства теплозащитных покрытий определяются не только совокупностью их физико-механических характеристик, но и каче-

ством подслоя, на котором сформирован рабочий слой на основе диоксида циркония. Керамическое покрытие несёт основную нагрузку по обеспечению эффективной теплозащиты, особенно на стадии запуска двигателя, характеризующейся высоким градиентом температуры. Кроме того, при увеличении срока службы может происходить растрескивание и отслоение теплозащитного покрытия. На этой стадии эксплуатации подслоя начинает выполнять функцию защитного покрытия и должен надёжно сберегать рабочую поверхность лопаток от высокотемпературной газовой коррозии. Поэтому научно-техническая задача по разработке надёжного подслоя является не менее важной по сравнению с задачей формирования теплозащитного покрытия.

Однако эксплуатационная практика свидетельствует о недостаточной жаростойкости покрытий, получаемых методом плазменного напыления на стандарт-

ном оборудовании [1, 2, 3]. Метод плазменного напыления основан на использовании тепловой и кинетической энергии плазменной струи ($T = 1073-3273$ К, $V = 200-350$ м/с) [1], генерируемой плазмотроном. Напыляемый материал в виде порошковой смеси вводится в плазменную струю, где он нагревается, плавится, ускоряется и, попадая на напыляемую поверхность, образует покрытие. В данной работе при разработке жаростойкого подслоя использован метод высокоэнергетического плазменного напыления, осуществляемый на модифицированном оборудовании за счёт использования плазмотрона ПНК-50 оригинальной конструкции, который в своём составе имеет секционированную межэлектродную вставку для стабилизации параметров плазменной струи и отличается от серийно выпускаемых плазмотронов повышенными энергетическими характеристиками (мощность плазмотрона ~ 50 кВт, температура плазменного потока – $5000-12000$ К, средне-массовая скорость истечения плазменной струи $V = 2400$ м/с) [4].

Методика исследований

Объектами исследований являлись:

1. Порошковая смесь марки ПНХ20К20Ю13-1 с дисперсностью частиц 20/60 мкм.

2. Жаростойкий интерметаллидный подслоя системы «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученный из порошковой смеси ПНХ20К20Ю13-1 (20/60) на образцах из жаропрочного никелевого сплава ЖС6Ф, используемого в авиационном двигателе-строении, с помощью плазмотрона ПНК-50.

Нанесение жаростойкого покрытия проводилось методом высокоэнергетического плазменного порошкового напыления на модернизированном оборудовании (на базе установки «Киев-7») с использованием плазмотрона ПНК-50 оригинальной конструкции и повышенной мощности (50 кВт) при технологических параметрах напыления: ток дуги $I_d = 180$ А, рабочее напряжение $U = 260$ В, расход

плазмообразующего газа (воздух) = $0,0035$ кг/с, расход транспортирующего газа (аргон) = $0,00027$ кг/с.

Дериватографические исследования порошковой смеси ПНХ20К20Ю13-1 (20/60) и жаростойкого подслоя выполнены на дериватографе NETZSCH STA 449F1.

Фазовый состав порошковой смеси и подслоя исследовали методом рентгено-структурного анализа на дифрактометре «Дрон-3М» с применением $Cu-K_{\alpha}$ -излучения в геометрии по Бреггу–Брентано.

Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе «VEGA//TESCAN».

Плотность и пористость подслоя определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898-89 с использованием аналитических весов VIBRA.

Измерения микротвёрдости проводили на поперечных шлифах по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1 Н.

Испытания на жаростойкость проводили на образцах из жаростойкого никелевого сплава ЖС6Ф без покрытия и на аналогичных образцах с жаростойким подслоем системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» по методике, разработанной в ВВИА им. Н.Е. Жуковского. Образцы подвергали изотермической выдержке в печи на воздухе при температуре 1123 К в течение 500 часов. Жаростойкость оценивали по относительному изменению массы образцов методом взвешивания на аналитических весах VIBRA через каждые 50 часов. Изменение массы образцов определяли по формуле:

$$\Delta M = (M - M_0) / M_0, \quad (1)$$

где M_0 – масса образца в исходном состоянии; M – масса образца в момент испытания.

По результатам испытаний строили (усреднённые по 4 образцам) графические зависимости относительного изменения массы от времени испытания $\Delta M(t)$.

Испытания на термоусталость проведены в ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» на установке с высокочастотным генератором ВЧГ4-10/0,44 при максимальной температуре в цикле 1323 К на лопатках без покрытия и с теплозащитным покрытием, сформированным на жаростойком подслое. Испытания на термоусталость проводились при высокочастотном разогреве на частоте 0,44 МГц со средней скоростью разогрева 353...373 К/с, близкой к условиям эксплуатации турбинных лопаток. Термоциклическую долговечность определяли по моменту растрескивания покрытия в наиболее термонапряженной зоне. При определении эффективности теплозащиты использовали факел пламени от горения углеводородного топлива. Образец состоял из двух продольных половинок лопатки, на внутреннюю поверхность одной из которых было нанесено теплозащитное покрытие с подслоем. Реальное снижение температуры металла лопатки до и после

нанесения на его поверхность покрытия с подслоем оценивалось с помощью термомпар.

Результаты исследований

С целью улучшения эксплуатационных свойств жаростойкого подслоя для его создания была выбрана порошковая смесь марки ПНХ20К20Ю13-1 с дисперсностью частиц 20/60 мкм (химический состав: Co – 22,3 %; Cr – 18,8 %; Al – 14,0 %; Fe – 0,14 %; Y – 0,09 %; Si – 0,51; Nb – 0,14; C – 0,15 %; Ca – 0,06 %; Mn – 0,01 %; S – 0,006 %; Ni – остальное). На рис. 1 представлены фотографии порошковой смеси. Порошинки неправильной формы состоят из отдельных частиц. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что фазовый состав порошковой смеси представляет собой интерметаллидное соединение NiAl (β -фаза) с небольшим количеством γ' -Ni₃Al фазы (табл. 1).

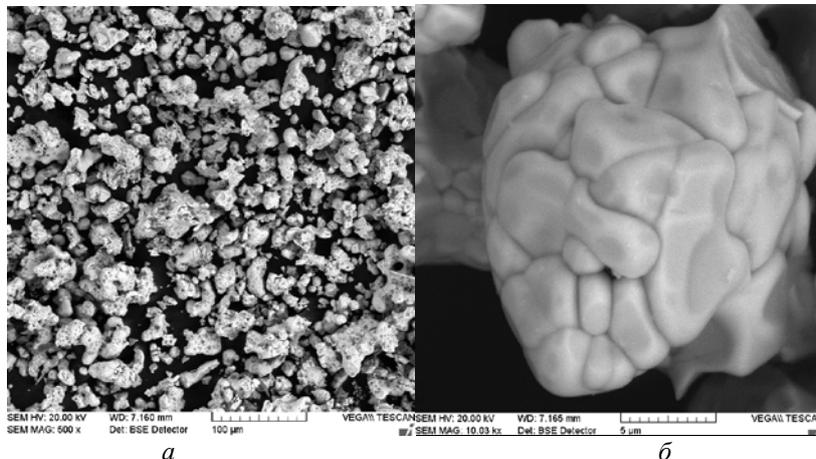


Рис. 1. Вид порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 (20/60): а – (Х500), б – (Х10 000)

При высокоэнергетическом плазменном напылении формируется покрытие интерметаллидного состава ($\beta+\gamma'$). В результате высокотемпературного воздействия плазменного потока в подслое увеличивается количество γ' -фазы (табл. 1). Дериватографические исследования показали, что фазовое превращение происходит при температуре 1113 К (рис. 2, а). Микроструктура покрытия имеет слоистое строение (рис. 3, а). При анализе по-

перечного шлифа подслоя сквозной пористости и микротрещин не обнаружено, имеются отдельные поры размером до ~10 мкм. Открытая пористость составляет 1,6 %. На поверхности покрытия наблюдается сфероидизация зерен (рис. 3, б). При полёте частиц порошка в потоке плазмы в результате высокотемпературного воздействия происходит оплавление их граней и формирование морфологии сфероидального типа. Во внутренних сло-

ях подслоя также видны хаотично распределённые сфероидальные зерна разной дисперсности (от 1 до 5 мкм) (рис. 4, а). Анализ элементного состава сфероидальных включений даёт основание утверждать, что по фазовому составу это ин-

терметаллидное соединение, окаймлённое оксидом хрома (рис. 4, б).

Интерметаллидный подслоя имеет плотность $\rho = 8200 \text{ кг/м}^3$, микротвёрдость $H_{\mu} = 7,85 \text{ ГПа}$ и шероховатость по параметру $R_a = 5 \text{ мкм}$.

Таблица 1. Результаты рентгеноструктурного анализа порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 (20/60) и жаростойкого покрытия

Материал	2θ , град	d, нм	I, %	(hkl)	Фаза
Порошковая смесь ПНХ20К20Ю13	30,865	0,2898		(100)	β -NiAl
	43,632	0,2072	9	(111)	γ' -Ni ₃ Al
	44,334	0,2045	100	(110)	β-NiAl
	50,928	0,1793	2	(200)	γ' -Ni ₃ Al
	54,996	0,1669	2	(111)	β -NiAl
	64,817	0,1438	7	(200)	β -NiAl
	82,214	0,1173	16	(211)	β -NiAl
	98,628	0,1017	3	(220)	β -NiAl
Покрытие, полученное из порошковой смеси	30,444	0,2942	8	(100)	β -NiAl
	36,196	0,2487	8	(110)	γ' -Ni ₃ Al
	43,632	0,2072	69	(111)	γ' -Ni ₃ Al
	44,474	0,2039	100	(110)	β-NiAl
	50,787	0,1797	25	(200)	γ' -Ni ₃ Al
	65,097	0,1433	10	(200)	β -NiAl
	74,778	0,1270	14	(210)	β -NiAl
	82,214	0,1173	18	(211)	β -NiAl
90,772	0,1083	11	(311)	γ' -Ni ₃ Al	
Покрытие после испытаний жаростойкости	25,322	0,3520	5	(100)	γ' -Ni ₃ Al
	30,936	0,2887	8	(100)	β -NiAl
	34,802	0,2578	17	(110)	γ' -Ni ₃ Al
	43,534	0,2078	100	(111)	γ'-Ni₃Al
	50,894	0,1793	43	(200)	γ' -Ni ₃ Al
	52,141	0,1756	13	(111)	β -NiAl
	57,256	0,1609	20	(210)	γ' -Ni ₃ Al
	64,615	0,1444	12	(211)	γ' -Ni ₃ Al
	67,859	0,1381	11	(220)	γ' -Ni ₃ Al
	75,094	0,1266	27	(210)	β -NiAl
	91,060	0,1080	24	(311)	γ' -Ni ₃ Al
96,549	0,1083	8	(222)	γ' -Ni ₃ Al	

Результаты испытаний интерметаллидного подслоя на жаростойкость приведены в виде графических зависимостей на рис. 5. Кривая основного материала (сплав ЖС6Ф) находится в положительной области, что свидетельствует об увеличении привеса в процессе изотермической выдержки. На поверхности сплава образуются стабильные оксиды, которые при испытаниях не разрушаются и не от-

слаиваются. Образцы с интерметаллидным подслоем системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» показали стабильное поведение при высокотемпературном окислении (рис. 5). Кривая для подслоя имеет монотонный возрастающий вид, что свидетельствует об отсутствии отслоений покрытия. Окисление, как правило, происходит на защищенных торцах образцов.

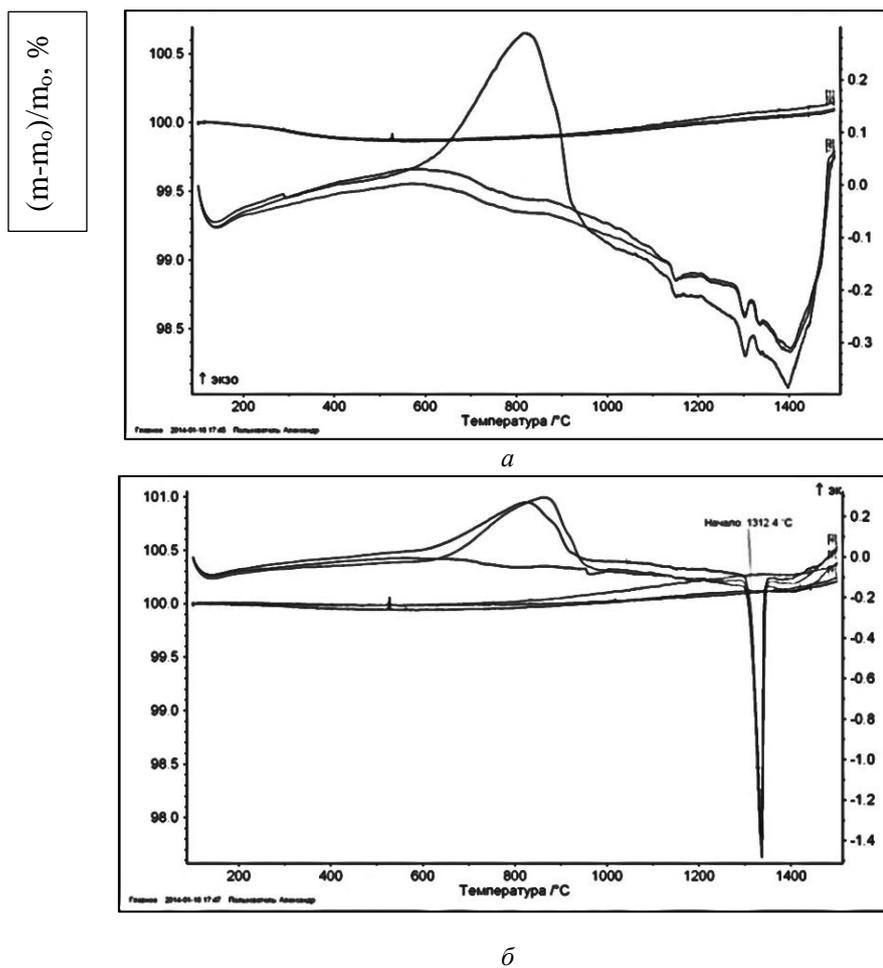


Рис. 2. Дериватограмма порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 (20/60) (а) и интерметаллидного подслоя, полученного из неё (б)

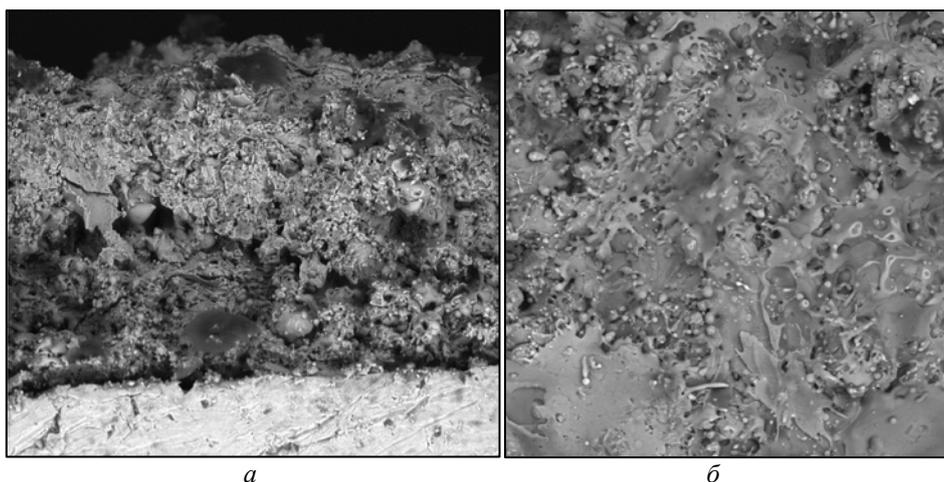
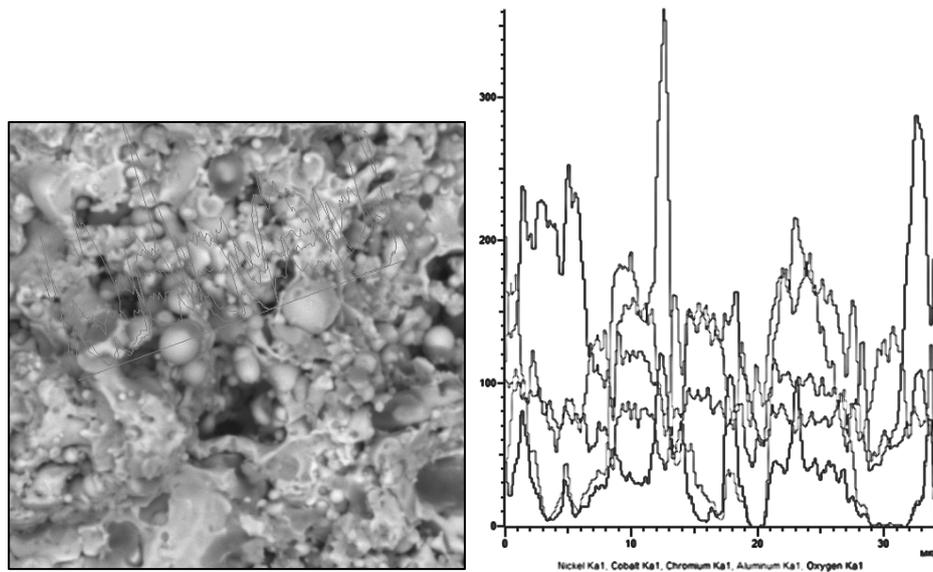


Рис. 3. Микроструктура поперечного шлифа (а) и поверхности (б) интерметаллидного подслоя, полученного из порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 (20/60): а – (X1000), б – (X5000)



а б
Рис. 4. Микроструктура поперечного шлифа (а) (X2000) и распределение элементного состава (б) в интерметаллидном подслое



Рис. 5. Относительное изменение массы образцов из сплава ЖС6Ф до и после нанесения интерметаллидного подслоя «Ni-Co-Cr-Al-Y» от времени изотермической выдержки

Микроструктура и внешний вид подслоя после испытаний на жаростойкость представлены на рис. 6, а. Трещин, сквозных пор и отслоений в покрытии не обнаружено. Исследование элементного состава (рис. 6, б) показало, что наиболее интенсивные рефлексы кислорода зафиксированы в поверхностных слоях подслоя. Они синхронны рефлексам хрома, что позволяет предположить образование оксидов хрома при нагреве. На границе раздела «покрытие – основа» рефлексов кис-

лорода не обнаружено (рис. 6, б), что говорит об отсутствии оксидных слоев, способствующих отслоению покрытия. Рентгеноструктурный анализ подслоя, проведенный после испытаний жаростойкости, показал, что при изотермической выдержке (при 1123 К в течение 500 часов) происходит фазовое превращение $\beta \rightarrow \gamma'$. После испытаний основной фазой в подслое уже является γ' -Ni₃Al (табл. 1), а количество β -NiAl-фазы уменьшается.

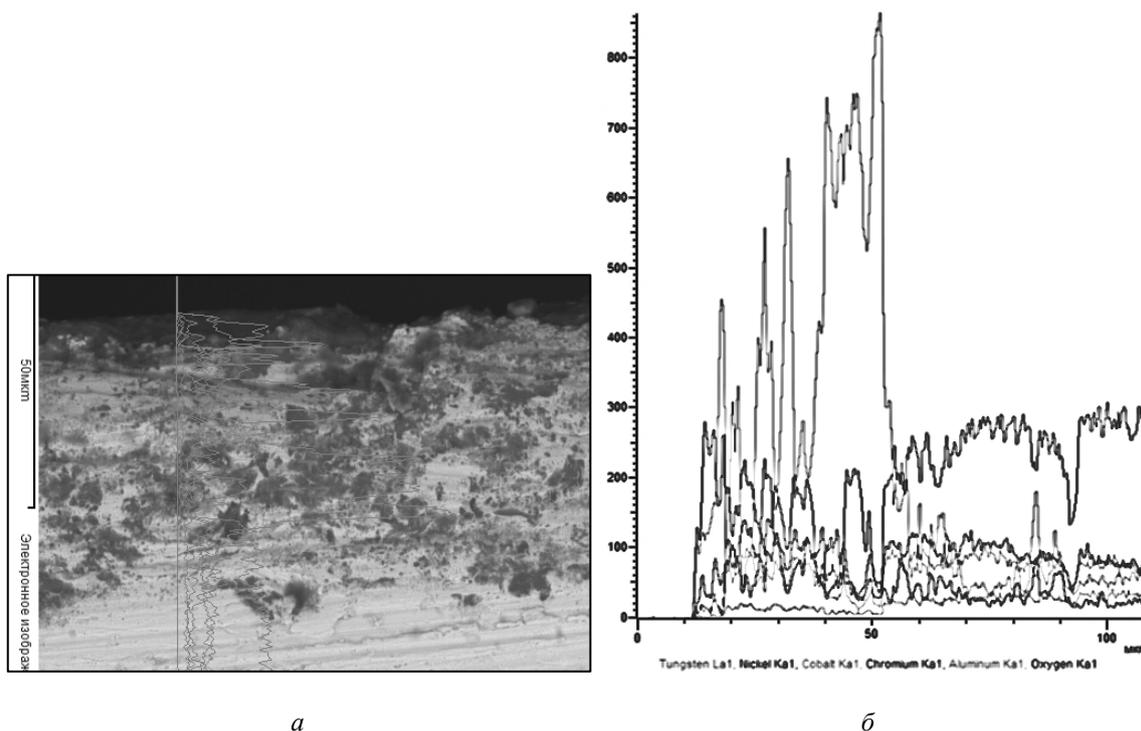


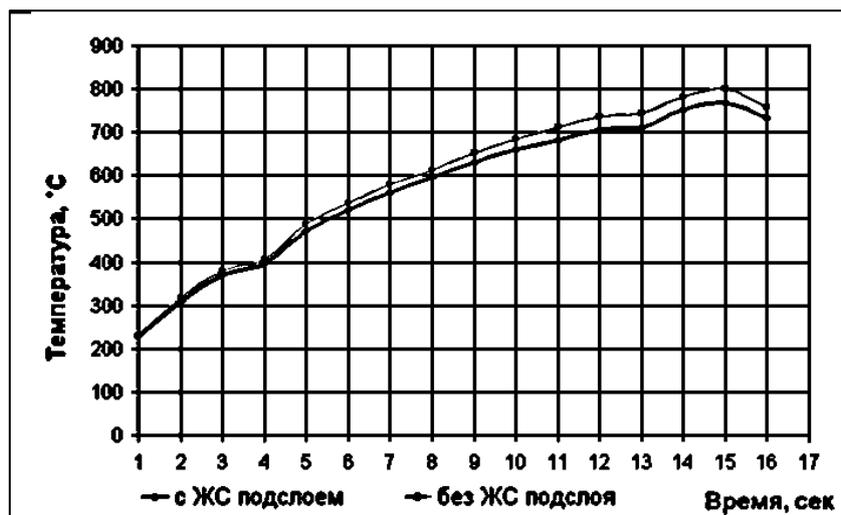
Рис. 6. Микроструктура (а) и распределение элементного состава по толщине (б) интерметаллидного подслоя после испытаний жаростойкости

Известно, что исчерпание защитных свойств жаростойкого покрытия при высоких температурах происходит по цепочке: $\beta \rightarrow \beta + \gamma' \rightarrow \gamma' + \gamma - \text{Ni} \rightarrow \gamma - \text{твёрдый раствор Ni+оксиды}$ [5]. Поэтому увеличение количества γ' -фазы в покрытии при эксплуатации должно постепенно приводить к сокращению его ресурса. Однако до тех пор, пока в составе покрытия будет сохраняться интерметаллидная γ' -фаза, покрытие будет выполнять свои защитные функции.

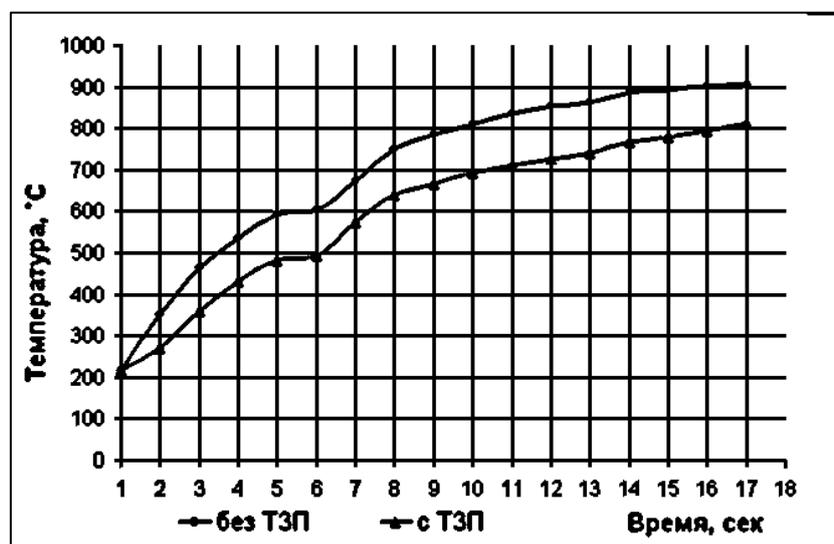
Дериватографические исследования показали, что фазовый переход в интерметаллидном подслое начинается при температуре 1113 К (рис. 2, б). Активный распад интерметаллидных фаз происходит при температуре 1585 К, на следующей стадии будет активно происходить окисление Ni-твёрдого раствора. Испытания эффективности теплозащиты показали

(рис. 7, а), что разработанный жаростойкий подслоя может стабильно защищать от высокотемпературного окисления рабочую поверхность лопаток из жаропрочных никелевых сплавов тех ступеней турбины, которые работают при температурах до 1073 К. Испытания эффективности теплозащиты стенки турбинной лопатки из сплава ЖС6Ф посредством теплозащитного покрытия ZrO_2 с подслоем «Ni-Co-Cr-Al-Y» показали снижение температуры металла на 398 К (рис. 7, б).

Таким образом, исследованное в данной работе интерметаллидное покрытие можно использовать как в качестве подслоя двухслойного теплозащитного покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO_2 », так и в качестве самостоятельного жаростойкого покрытия менее теплонагруженных ступеней турбины газотурбинных двигателей (с температурой эксплуатации до 1073 К).



а



б

Рис. 7. Результаты оценки эффективности тепловой защиты жаропрочного никелевого сплава ЖС6Ф с помощью жаростойкого подслоя (а) и теплозащитного покрытия ZrO_2 , сформированного на жаростойком подслое (б)

Разработанное плазменное жаростойкое покрытие системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» апробировано в качестве подслоя теплозащитного покрытия диоксида циркония для продления срока службы рабочих лопаток турбины авиационного газотурбинного двигателя. Работа выполнена при финансовой поддержке СГАУ и ОАО «КУЗНЕЦОВ» (г. Самара).

Заключение

Исследования полученного методом плазменного напыления с применением плазмотрона ПНК-50 жаростойкого под-

слоя системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» с интерметаллидным фазовым составом ($\beta+\gamma'$) и сфероидальной микроструктурой зерен показали возможность его использования в виде подслоя теплозащитного покрытия диоксида циркония, а также в качестве самостоятельного жаростойкого покрытия для защиты от высокотемпературной газовой коррозии и повышения ресурса турбинных лопаток газотурбинных двигателей разного назначения (при температурах эксплуатации до 1073 К).

Библиографический список

1. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. М.: КХТ, 2004. 134 с.
2. Тарасенко Ю.П., Бердник О.Б., Царёва И.Н., Фель Я.А. Повышение надёжности и ресурса турбинных лопаток газоперекачивающих агрегатов // Сборник трудов XX юбилейной конференции «Проблемы машиноведения». М.: ИМАШ РАН, 2008. С. 528-531.
3. Тарасенко Ю.П., Царёва И.Н., Фель Я.А., Бердник О.Б. Лопатка турбины газотурбинного двигателя с жаростойким покрытием: патент РФ на полезную модель № 88389; опубл. 06.07.2009.
4. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Засыпкин И.М. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. Новосибирск: Наука, 1981. 219 с.
5. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением. М.: МИСиС, 2008. 328 с.

Информация об авторах

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

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

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

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

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

Кривина Людмила Александровна, научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: трибология, физика плазмы, плазменные покрытия, упрочняющие и восстановительные технологии, физическое материаловедение.

RESEARCH OF A HEAT-RESISTANT INTERMETALLIC UNDERLAYER FOR THE HEAT-SHIELDING COATING OF GAS TURBINE ENGINE TURBINE BLADES

© 2014 Yu. P. Tarasenko, I. N. Tsareva, O. B. Berdник, Ya. A. Fel, L. A. Krivina

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

The paper presents the results of research of the structure as well as physical and mechanical properties of a heat-resistant intermetallic coating of a “Ni-Co-Cr-Al-Y” system produced by the method of high-energy plasma powder spraying and used as a substrate in forming a heat-shielding zirconium dioxide coating. A coating is produced with an intermetallic phase composition (β -NiAl+ γ' -Ni₃Al) and spheroidal grain microstructure. The density of the coating is $\rho=8200 \text{ kg/m}^3$, the microhardness is $H_{\mu}=7,85 \text{ GPa}$ and the roughness is 5mkm. According to the results of testing the heat shielding of the wall of a turbine blade made of the ЖС6Ф alloy with the help of a heat-shielding ZrO₂ coating with a “Ni-Co-CR-Al-Y” substrate the metal temperature reduction amounted to 398 K. The coating is intended for the protection of the working surface of various-application gas turbine engine turbine blades against high-temperature gas corrosion in the form of a substrate for the heat-shielding zirconium dioxide coating, and also as an independent heat-shielding coating. The plasma heat-shielding coating for the “Ni-Co-CR-Al-Y” system has been tested as a substrate for a heat-shielding coating of zirconium dioxide with a view to extending the service life of turbine blades (made of a heat-resistant ЖС6Ф alloy) of the NK series gas turbine engine turbines.

High-energy plasma spraying, intermetallic phases, spheroidal grains, porosity, microhardness, heat resistance, turbine blades.

References

1. Baldayev L.Kh. Renovatsiya i uprochnenie detaley mashin metodami gazotermicheskogo napyleniya [Renovation and strengthening of machine parts using methods of gas-thermal spraying]. Moscow: KKhT Publ., 2004. 134 p.
2. Tarasenko Yu.P., Berdnik O.B., Tsareva I.N., Fel Ya.A. Increasing reliability and resource of turbine blades of gas-pumping units // Sbornik trudov XX yubileyной konferentsii «Problemy mashinovedeniya». Moscow: IMASH RAN, 2008. P. 528-531. (In Russ.)
3. Tarasenko Yu.P., Tsareva I.N., Fel Ya.A., Berdnik O.B. Lopatka turbiny gazoturbinnogo dvigatelya s zharostoykim pokrytiem [A gas turbine engine turbine blade with heat-resistant coating]. Patent RF, No. 88389, 2009 (Publ. 06.07.2009).
4. Bugs M. F., Anshakov A.S., Zasy-pkin I.M. Elektrodugovye generatory s mezhelektrodnymi vstavkami [Arc generators with interelectrode inserts]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981. 219 p.
5. Kolobov Yu.R., Kablov E.N., Kozlov E.V. et. all. Struktura i svoystva intermetallidnykh materialov s nanofaznym uprochneniem [Structure and properties of intermetallic materials with nanophase strengthening]. Moscow: MISiS Publ., 2008. 327 p.

About the authors

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

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

Krivina Lyudmila Aleksandrovna, research associate, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Acad-

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