



## МНОГОСЛОЙНЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ $ZrO_2-NiCrAlY$

А. Л. БОРИСОВА, д-р техн. наук, А. Ю. ТУНИК, Л. И. АДЕЕВА, кандидаты техн. наук,  
А. В. ГРИЩЕНКО, Т. В. ЦЫМБАЛИСТАЯ, М. В. КОЛОМЫЦЕВ, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Дана сравнительная характеристика многослойных плазменных покрытий  $ZrO_2-NiCrAlY$ . Установлено, что фазовый состав внешнего керамического слоя зависит от толщины металлического подслоя, т. е. его теплопроводности, влияющей на скорость охлаждения напыляемых на него частиц  $ZrO_2$ . Для обеспечения оптимальной термостойкости керамического слоя толщина металлического подслоя не должна превышать 100 мкм.

*Ключевые слова:* диоксид циркония, сплав  $NiCrAlY$ , порошки, плазменное напыление, многослойные покрытия, фазовый состав, структура, термостойкость покрытий

Многие актуальные задачи современной техники, среди которых одной из наиболее важных является повышение эффективности и качества энергетических машин, успешно решаются благодаря применению теплозащитных покрытий (ТЗП). Мировой опыт использования ТЗП на деталях двигателей внутреннего сгорания позволяет оптимизировать режимы работы двигателей, повысить их КПД, сократить расход топлива и смазочных материалов, уменьшить токсичность выхлопов и пр. Наиболее приемлемыми ТЗП на детали двигателей внутреннего сгорания признаны плазменные с внешним керамическим слоем из частично стабилизированного диоксида циркония и металлическим подслоем из  $NiCrAlY$  [1]. Термостойкость и ресурс эксплуатации покрытий на основе  $ZrO_2$ , характеризующегося полиморфными превращениями и значительными объемными изменениями при нагреве и охлаждении, в значительной мере определяются фазовым составом теплозащитного слоя, сформированным при напылении.

Считается, что оптимальным фазовым составом внешнего керамического слоя является максимальное содержание так называемой тетрагональной  $T'$ -фазы с низкой степенью тетрагональности, которая обеспечивает высокую степень термостойкости, а также наличие незначительной (4...5 мас. %) массовой доли моноклинной фазы. Благодаря мартенситному превращению последней в покрытии формируется сетка мелких трещин, препятствующих его разрушению [2–5].  $T'$ -фаза структурно идентична тетрагональной  $T$ -фазе, но отличается повышенным содержанием растворенного в ней  $Y_2O_3$ , что приводит к росту объема ячейки тетрагональной фазы с одновре-

менным уменьшением степени тетрагональности вплоть до единицы, т. е. к превращению в структуру кубической модификации.

Многие вопросы, связанные с формированием оптимального фазового состава внешнего керамического слоя ТЗП (химический состав и фракция напыляемого порошка, технологические параметры напыления, толщина покрытия и др.), изучены достаточно детально, однако на этот процесс могут влиять и такие неизученные факторы, как условия охлаждения частиц напыляемого керамического слоя, в том числе зависящие и от толщины металлического подслоя.

Одним из путей повышения термостойкости ТЗП является создание градиентных покрытий, в которых происходит постепенное изменение их состава — от металлического подслоя к внешнему керамическому слою [6–8]. Существует мнение, что переходные металлокерамические слои ухудшают термоусталость покрытий при температуре выше 1170...1220 К, что обусловлено интенсивным окислением металлической составляющей переходного слоя [3]. Это приводит к возникновению дополнительных напряжений сжатия в объеме покрытия и преждевременному отслаиванию керамического слоя.

Цель настоящей работы — решение двух задач: исследование влияния толщины металлического подслоя  $NiCrAlY$  на фазовый состав внешнего керамического слоя  $ZrO_2$  для определения его оптимального значения, а также оценка особенностей формирования и структуры многослойных покрытий  $ZrO_2-NiCrAlY$  с проведением сравнительных испытаний алюминиевых деталей двигателей внутреннего сгорания с этими покрытиями на термостойкость в условиях термоциклирования.

В качестве материала для нанесения внешнего керамического слоя ТЗП использовали порошок  $ZrO_2$ , стабилизированный 6,2 мас. %  $Y_2O_3$ , а для



Таблица 1. Режимы напыления плазменных покрытий\*

Состав напыляемого порошка, мас. %	Фракция, мкм	U, В	Плазмообразующий газ		Дистанция напыления, мм
			Состав	Расход, л/мин	
NiCrAlY	-100...+40	40	Ar + N <sub>2</sub>	24	130
25 ZrO <sub>2</sub> + 75 NiCrAlY	-60...+40	40	Ar + N <sub>2</sub>	26	130
50 ZrO <sub>2</sub> + 50 NiCrAlY		50	Ar + N <sub>2</sub>	28	120
75 ZrO <sub>2</sub> + 25 NiCrAlY		55	N <sub>2</sub>	30	120
ZrO <sub>2</sub>		60	N <sub>2</sub>	31	100

\* Ток напыления I = 500 А.

металлического подслоя — порошок NiCrAlY сплава ПХ16Н77Ю6И, полученный кальцийтермическим методом. Его химический состав следующий, мас. %: 73,64...75,44 Ni; 17,02...17,58 Cr; 5,78...5,86 Al; 0,88...1,07 Y; 0,87...1,85 Ca.

Смеси порошков для нанесения многослойных покрытий готовили в лабораторном атриторе на воздухе при минимальной скорости вращения импеллера 400 об/мин в течение 30 мин. Порошковые смеси имели следующий состав: (100 - n)NiCrAlY + nZrO<sub>2</sub>, где n = 0; 50; 100 (для трехслойных покрытий) или 0; 25; 50; 75; 100 мас. % (для пятислойных).

Плазменные покрытия наносили с помощью установки УПУ-8М. В качестве основы для покрытия использовали стальные образцы, а при исследовании теплозащитных свойств — образцы из алюминиевого сплава. Режим нанесения корректировали в зависимости от состава напыляемого материала (табл. 1).

Исследование порошков и покрытий проводили методами металлографии на микроскопе «Неофот-32», оснащенный приставкой для цифрового фотографирования, растровой электронной микроскопии (электронный микроскоп JSM-840), дюриметрического анализа (твердомер М-400 фирмы «LECO» при нагрузке 0,25 Н), рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА), выполненного на дифрактометре «ДРОН-УМ1», излучение CuK<sub>α</sub>). Обработку данных дифрактометрического эксперимента осуществляли с использованием программы для полнопрофильного анализа рентгеновских спектров от смеси поликристаллических фазовых составляющих PowderCell 2.4.

Для исследования теплозащитных свойств покрытий применяли прямой нагрев их поверхности пламенем струи газовой горелки, а в качестве горючей смеси — смесь газов C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + O<sub>2</sub> в соотношении объемов 1:3. Горелку помещали на расстоянии 35...40 мм от поверхности образца с покрытием. Образцы нагревали в течение 3 с до температуры 400 °С, а затем охлаждали потоком воздуха приблизительно 20 с и водой приблизительно 6 с до температуры 70...80 °С. Температуру образцов определяли с помощью цифрового мультиметра УТ-70В. Термоциклирование проводили до нарушения целостности покрытия или отслоения его от основы не более чем на 15 %.

**Характеристики исходных порошков.** Порошок ZrO<sub>2</sub>, стабилизированный 6,2 мас. % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

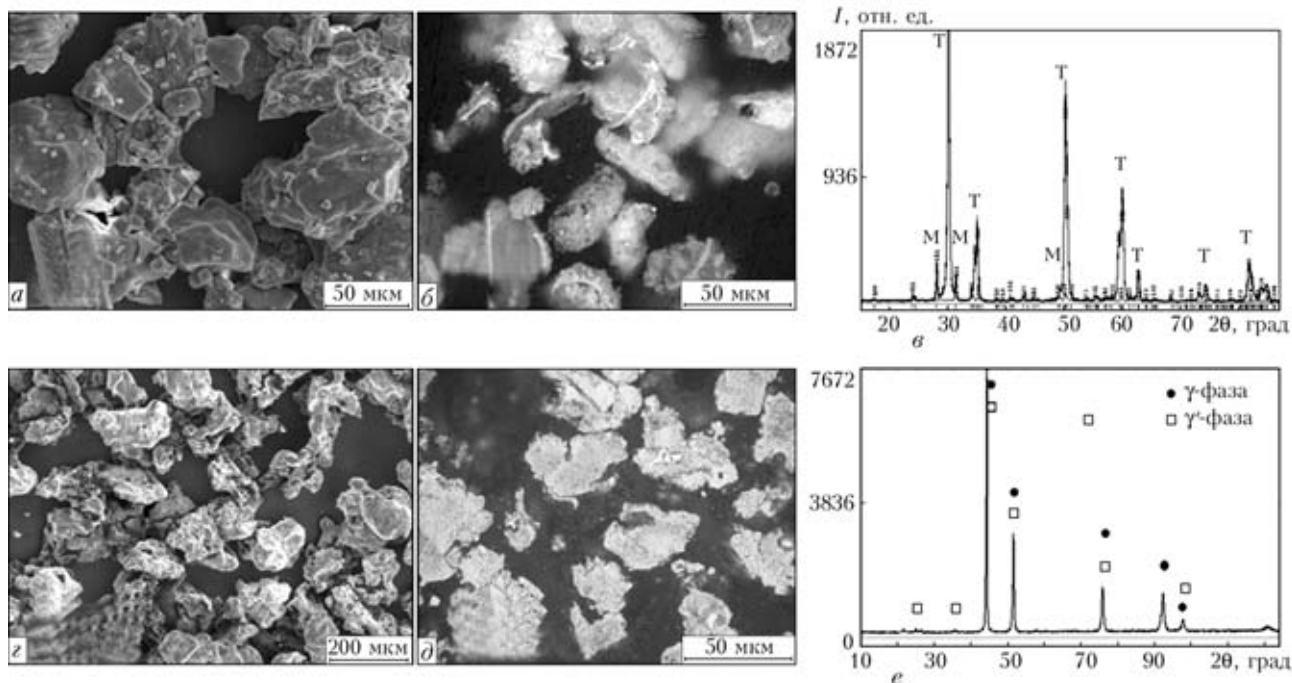


Рис. 1. Внешний вид (а, з), микроструктуры (б, д) и рентгенограммы (в, е) порошков ZrO<sub>2</sub> + 6,2 мас. % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (а-в) и NiCrAlY (з-е)



Таблица 2. Характеристика двухслойных покрытий  $ZrO_2-NiCrAlY$  различной толщиной металлического подслоя

Толщина металлического подслоя, мкм		Фазовый состав керамического слоя	$HV$ , МПа	
NiCrAlY	ZrO <sub>2</sub>		NiCrAlY	ZrO <sub>2</sub>
~50	200...230	T-ZrO <sub>2</sub> , следы M-ZrO <sub>2</sub>	2630±540	11990±1420
~100	200...250	T-ZrO <sub>2</sub> , следы M-ZrO <sub>2</sub>	3110±560	11230±2130
~150	200...210	T-ZrO <sub>2</sub> , K-ZrO <sub>2</sub> (12 мас. %), следы M-ZrO <sub>2</sub>	3130±500	11020±1110

Примечание. К — кубическая модификация ZrO<sub>2</sub>.

(см. рис. 1, а, б), состоит из частиц неправильной осколочной формы с острыми кромками размером от 40 до 60 мкм и согласно результатам РСФА содержит 89,8 мас. % тетрагональной (T-ZrO<sub>2</sub>) и 10,2 мас. % моноклинной (M-ZrO<sub>2</sub>) фазы (см. рис. 1, в).

Порошок NiCrAlY сплава состоит из частиц неправильной формы в виде конгломератов размером от 40 до 100 мкм (см. рис. 1, з, д) и согласно

данным РСФА содержит следующие фазы:  $\gamma$ -твердый раствор никеля и  $\gamma'$ -интерметаллид Ni<sub>3</sub>Al (см. рис. 1, е). Структура частиц представляет собой твердый раствор на основе никеля ( $\gamma$ -фаза), упрочненный дисперсными частицами Ni<sub>3</sub>Al ( $\gamma'$ -фаза).

**Двухслойные плазменные покрытия.** При исследовании влияния толщины подслоя NiCrAlY на фазовый состав и свойства керамического слоя

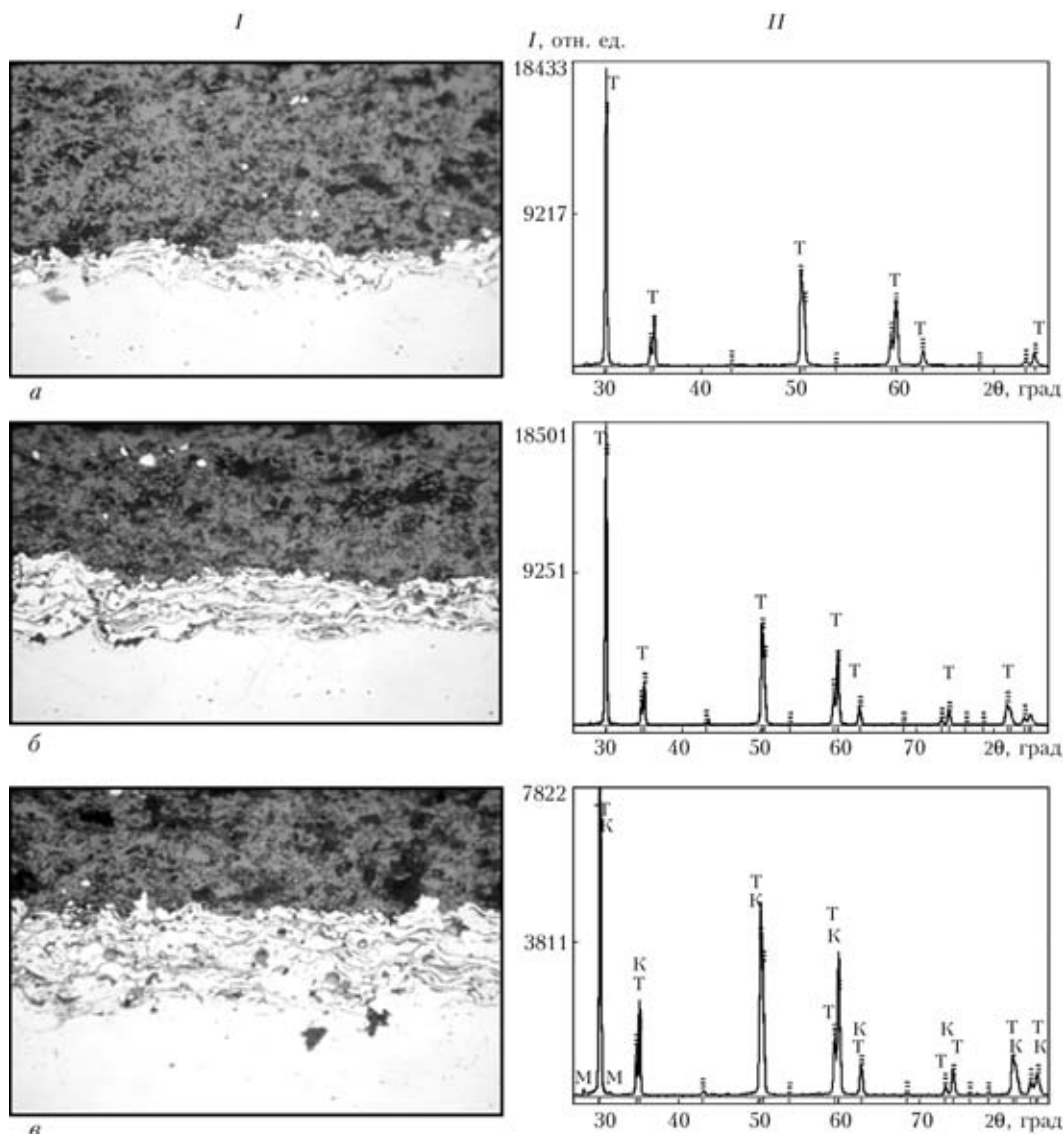


Рис. 2. Микроструктуры ( $\times 200$ ) (I) и рентгенограммы (II) плазменных двухслойных покрытий с металлическим подслоем толщиной 50 (а), 100 (б) и 150 (в) мкм



ТЗП толщина керамического слоя во всех образцах была примерно одинаковой и составляла около 200 мкм, толщина металлического подслоя изменялась от 50 до 150 мкм. Характеристика двухслойных покрытий  $ZrO_2-NiCrAlY$  приведена в табл. 2.

Установлено, что во всех случаях формируется плотное двухслойное покрытие без трещин и отслоений как на границе между керамикой и подслоем, так и на границе связующего слоя с основой (см. рис. 2). Металлический подслоя имеет ярко выраженную ламелярную структуру с тонкими оксидными прослойками по границам ламелей. С увеличением толщины подслоя его микротвердость возрастает с 2630 до 3130 МПа (табл. 2). По данным РСФА фазовый состав подслоя следующий: твердый раствор на основе никеля,  $\gamma'-Ni_3Al$ ,  $\beta-NiAl$ , а также твердый раствор никеля в хrome  $\alpha-Cr$ . В отличие от состава напыляемого порошка в покрытии появились новые фазы  $\beta-NiAl$ ,  $NiO$  и  $\alpha-Cr$ , которые образовались в результате прохождения частиц через плазменную струю.

В структуре керамического слоя всех покрытий ламелярность отсутствует, а их микротвердость примерно одинакова (около  $HV$  11000 МПа). Толщина металлического подслоя практически не влияет на структуру и микротвердость слоя  $ZrO_2$ , однако изменяет его фазовый состав. При нанесении покрытия на металлический подслоя толщиной 50 и 100 мкм основной фазой керамичес-

кого слоя является тетрагональная, массовая доля моноклинной снижается до 2 % по сравнению с исходным порошком, в котором ее содержание составляло 10,2 мас. %), а при толщине подслоя 150 мкм, помимо перечисленных фаз, образуется около 12 мас. % кубической модификации  $ZrO_2$  (см. рис. 2). На глубине 100 мкм от поверхности фазовый состав керамического слоя всех покрытий практически одинаков — это смесь тетрагональной фазы с 4 мас. % моноклинной.

Оценка степени тетрагональности и объема элементарной ячейки тетрагональной фазы  $ZrO_2$  показала, что при толщине подслоя 150 мкм степень тетрагональности  $ZrO_2$   $c/a$  составляет 1,0113, а объем элементарной ячейки равен  $V = 134,5793 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^3$ . При толщине подслоя 50 и 100 мкм образуется фаза с более низкой степенью тетрагональности ( $c/a = 1,0107$  и  $1,0108$ ) и увеличенным объемом элементарной ячейки  $V = 134,6823 \cdot 10^{-3}$  и  $134,7030 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^3$  (табл. 3). Эти фазы по структуре приближаются к закалочной фазе  $T'-ZrO_2$ , которая согласно литературным данным [9] отличается устойчивостью как при низкой, так и при высокой температуре, а при циклическом изменении температуры характеризуется повышенной стабильностью. Следовательно, толщина подслоя из  $NiCrAlY$  не более 100 мкм является предпочтительной.

**Многослойные покрытия.** Перед напылением многослойных покрытий вначале были получены и исследованы образцы с однослойными покрытиями

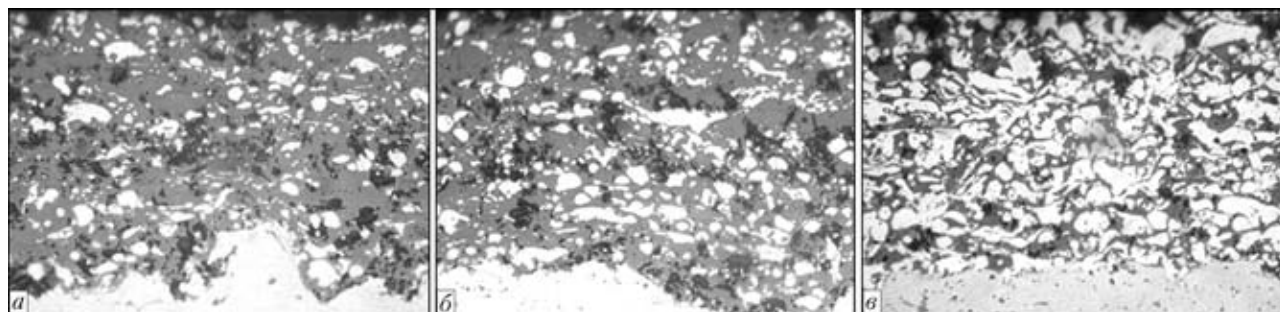


Рис. 3. Микроструктуры ( $\times 400$ ) плазменных покрытий, полученных из различных порошковых смесей, мас. %: а — 75  $ZrO_2+25NiCrAlY$ ; б — 50  $ZrO_2+50 NiCrAlY$ ; в — 25  $ZrO_2+ 75 NiCrAlY$

Т а б л и ц а 3. Влияние толщины металлического подслоя на фазовый состав и параметры кристаллической решетки (а, с, b) фаз керамического слоя  $ZrO_2$

Объект исследования	Толщина подслоя NiCrAlY, мкм	Фазовый состав керамического слоя							
		T-ZrO <sub>2</sub>				M-ZrO <sub>2</sub>			
		a, нм	c, нм	c/a	$V \cdot 10^3, \text{ нм}^3$	a, нм	b, нм	c, нм	$\beta$ , град
Порошок $ZrO_2$	—	0,51047	0,51672	1,0122	134,6469	0,51439	0,52081	0,53230	99,16
Покрытие $ZrO_2^*$	50	0,51078	0,51623	1,0107	134,6823	0,51460	0,52120	0,53130	99,20
	100	0,51079	0,51629	1,0108	134,7030	0,51668	0,52044	0,53237	99,20
	150	0,51054	0,51632	1,0113	134,5793	0,51713	0,52714	0,52771	99,20

\* Для модификации K-ZrO<sub>2</sub> a = 0,51147 нм.

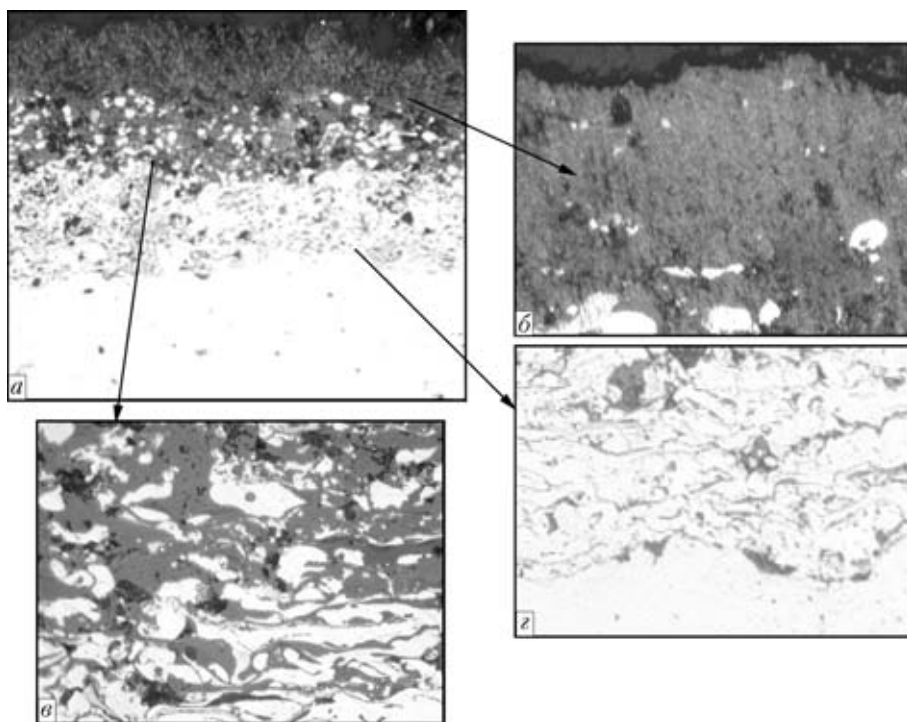


Рис. 4. Микроструктуры трехслойного плазменного покрытия: *a* — общий вид ( $\times 200$ ); *б* — внешний слой  $ZrO_2$ ; *в* — промежуточный слой 50 мас. % NiCrAlY + 50 мас. %  $ZrO_2$ ; *г* — внутренний слой NiCrAlY (*б-г*,  $\times 500$ )

ями из порошковых смесей с 25, 50, 75 мас. %  $ZrO_2$ .

Установлено, что все покрытия из порошковых смесей равномерные по толщине, не имеют трещин и плотно прилегают к основе (рис. 3). С увеличением содержания NiCrAlY в напыляемом порошке в структуре наблюдается возрастание количества металлических частиц округлой или ламинарной формы. Наибольшая ламинарность характерна для покрытия с минимальным содержанием керамической составляющей (25 мас. %) (см. рис. 3, *в*). Микротвердость покрытий возрастает с увеличением содержания диоксида циркония в слое:  $HV 4760 \pm 1810$ ,  $5150 \pm 1190$  и  $7310 \pm 2250$  МПа при соответственно 25, 50 и 75 мас. %  $ZrO_2$  (табл. 4). По данным РСФА состав металлокерамических слоев практически постоянен и включает различные комбинации фаз:  $\gamma$ -твердый раствор на основе Ni,  $\gamma'$ - $Ni_3Al$ , T- $ZrO_2$ , M- $ZrO_2$ , NiO,  $\alpha$ -Cr (табл. 4). В отличие от исходных порошков в результате термического и физико-химического взаимодействия напыляемого материала с плазменной струей появились две новые фазы —  $\beta$ -NiAl, NiO и  $\alpha$ -Cr.

Структура, фазовый состав и микротвердость промежуточных металлокерамических слоев трех- (рис. 4) и пятислойных (рис. 5) покрытий практически совпадает с характеристиками покрытий из механических смесей того же состава (рис. 3, табл. 4). Оценка степени тетрагональности защитного слоя трех- и пятислойных покрытий показала, что она составляет соответственно 1,0103 и 1,0108, а следовательно, и в данном случае тетрагональная фаза приближается по структуре к закалочной фазе T'- $ZrO_2$ .

При испытаниях на термостойкость образцы с двух- и пятислойными покрытиями (табл. 5) выдержали 1500 термоциклов, при этом никаких внешних изменений обнаружено не было. Следы разрушения на поверхности как двухслойных, так и многослойных покрытий появились не ранее чем через 2000 термоциклов.

В двухслойном покрытии  $ZrO_2$ -NiCrAlY (общей толщиной около 570 мкм), имеющем ламинарную структуру никелевого подслоя и слой  $ZrO_2$ , сформированный из округлых частиц (рис. 6, *а*), микротвердость практически не изменяется (табл. 5, вариант № 1), по сравнению с исходным состоянием (см. табл. 2). После 2000

Таблица 4. Характеристика плазменных покрытий, полученных из порошков NiCrAlY,  $ZrO_2$  и их смесей

Состав порошка, мас. %	Толщина покрытия, мкм	Фазовый состав	HV, МПа
100 NiCrAlY	90±15	$\gamma$ -Ni, $\gamma'$ - $Ni_3Al$ , $\beta$ -NiAl, $\alpha$ -Cr	3110±560
25 $ZrO_2$ +75 NiCrAlY	100±20	$\gamma$ -Ni, T- $ZrO_2$ , $\gamma'$ - $Ni_3Al$ , $\beta$ -NiAl, NiO, $\alpha$ -Cr, M- $ZrO_2$	4760±1810
50 $ZrO_2$ +50 NiCrAlY	90±20	$\gamma$ -Ni, T- $ZrO_2$ , $\gamma'$ - $Ni_3Al$ , $\beta$ -NiAl, NiO, M- $ZrO_2$ , $\alpha$ -Cr	5150±1190
75 $ZrO_2$ +25 NiCrAlY	100±20	T- $ZrO_2$ , $\gamma$ -Ni, $\gamma'$ - $Ni_3Al$ , $\beta$ -NiAl, NiO, M- $ZrO_2$ , $\alpha$ -Cr	7310±2250
100 $ZrO_2$	200±20	T- $ZrO_2$ , M- $ZrO_2$ (следы)	11450±1350



Таблица 5. Характеристика ТЗП после испытаний на термостойкость\*

Номер варианта	Состав напыляемого порошка (последовательно), мас. %	Толщина слоев, мкм	HV, МПа	Участок разрушения
1	100 NiCrAlY	120	2950±500	Продольная трещина в слое ZrO <sub>2</sub> в зоне соединения с подслоем
	100 ZrO <sub>2</sub>	450	11000±1200	
2	100 NiCrAlY	100	2820±560	Разрушение слоя ZrO <sub>2</sub> на 75 %, расположенные ниже слои трещин и отслоений не имеют
	25 ZrO <sub>2</sub> +75 NiCrAlY	80	4630±590	
	50 ZrO <sub>2</sub> +50 NiCrAlY	120	5030±860	
	75 ZrO <sub>2</sub> +25 NiCrAlY	100	6850±1000	
	100 ZrO <sub>2</sub>	100	9560±1100	

\* Количество термоциклов до разрушения составляло 2000.

термоциклов испытаний в зоне соединения с подслоем возникала продольная трещина, которая развивалась в слой ZrO<sub>2</sub>. При этом поверхностный слой покрытия ZrO<sub>2</sub> подвергся незначительному разрушению (рис. 6, б). На рентгенограмме регистрируются только две фазы — тетрагональная фаза ZrO<sub>2</sub> (преобладающая) и незначительная массовая доля моноклинной фазы ZrO<sub>2</sub> (около 1 %), что совпадает с фазовым составом поверхностного слоя покрытия до испытания (см. табл. 2).

Многослойные покрытия системы ZrO<sub>2</sub>-NiCrAlY толщиной около 500 мкм после испытаний трещин, расслоений и отслоений от основы не имели, однако поверхностный керамический слой подвергся достаточно сильному разрушению (рис. 6, в, з). На рентгенограмме, представленной на рис. 7, помимо двух фаз диоксида циркония (тетрагональной и моноклинной), регистрируется наличие фаз γ'-Ni<sub>3</sub>Al, β-NiAl и оксидов NiO, а также α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — продукт окисления NiCrAlY, что свидетельствует о нарушении целостности внешнего слоя после 2000 термоциклов. Микротвердость многослойного покрытия, которая возрастает в исходном образце по мере увеличения керамической составляющей от подслоя к слою ZrO<sub>2</sub> (см. табл. 4), после испытаний практи-

чески не изменяет своих значений (табл. 5, вариант № 2).

Для выявления динамики нагрева покрытий с противоположной стороны образца зачеканивали термопару на глубину 2 мм. Она фиксировала рост температуры основы без покрытия, а также в двух- или пятислойных покрытиях. Было про-

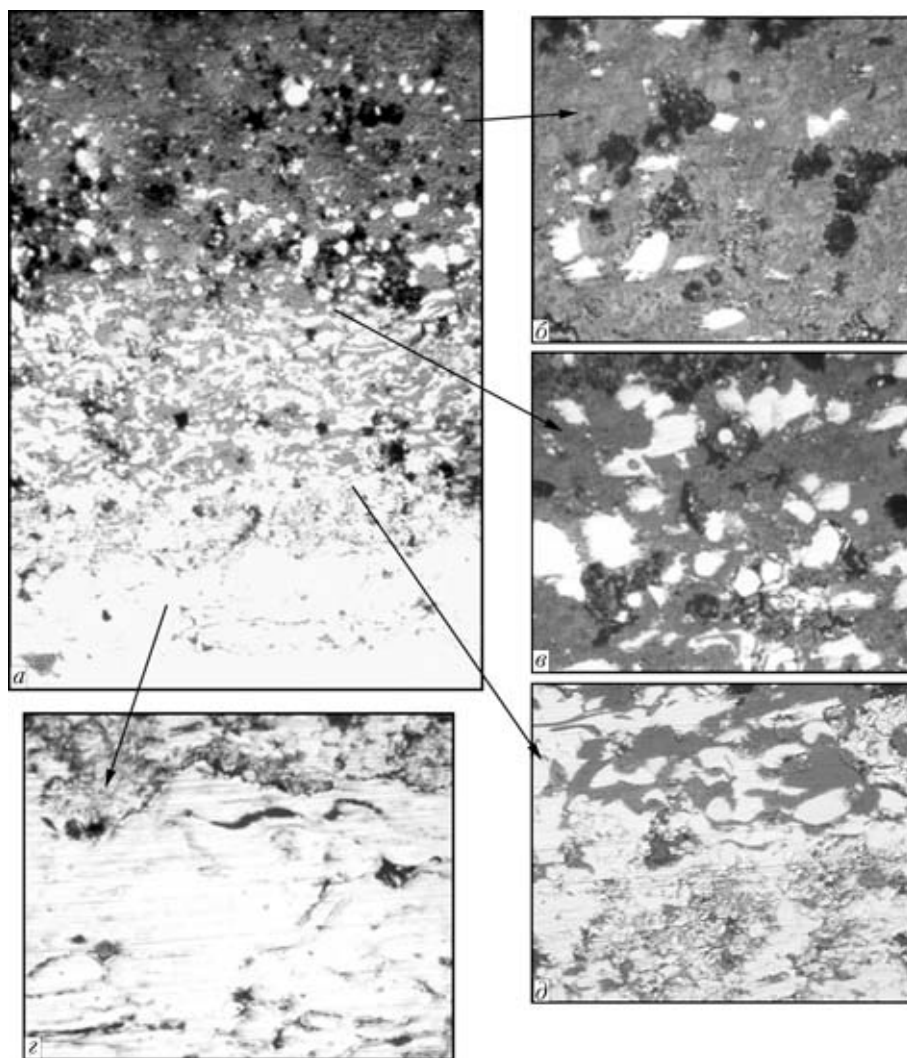


Рис. 5. Микроструктуры пятислойного плазменного покрытия: а — общий вид (×100); б — слой 75 мас. % ZrO<sub>2</sub> + 25 мас. % NiCrAlY; в — 50 мас. % ZrO<sub>2</sub> + 50 мас. % NiCrAlY; з — 25 мас. % ZrO<sub>2</sub> + 75 мас. % NiCrAlY; д — NiCrAlY (б-д, ×500)

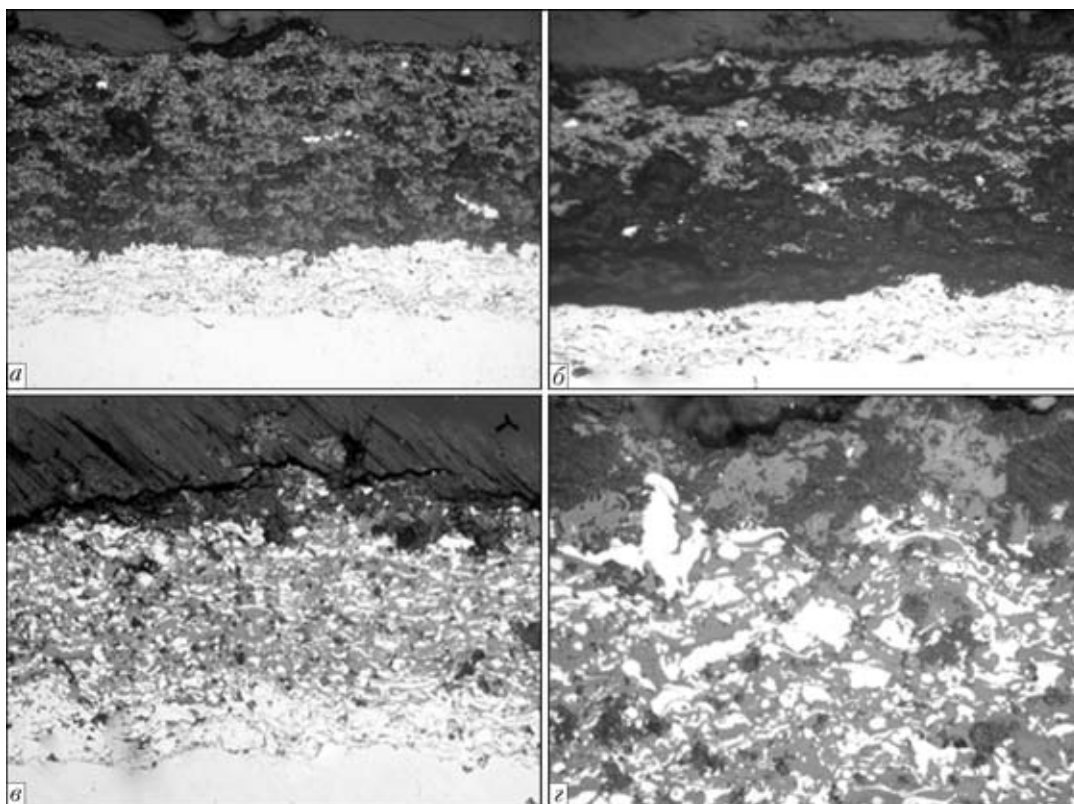


Рис. 6. Микроструктуры двух- ( $\times 200$ ) (*a, б* — см. в тексте) и пятислойного (*в, з*,  $\times 400$ ) покрытий  $ZrO_2-NiCrAlY$  после испытания на термостойкость

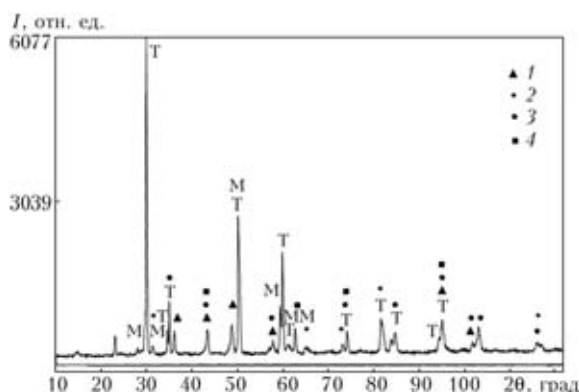


Рис. 7. Рентгенограмма многослойного покрытия  $ZrO_2-NiCrAlY$  после испытания на термостойкость: 1 —  $\gamma'-Ni_3Al$ ; 2 —  $\beta-NiAl$ ; 3 —  $\alpha-Al_2O_3$ ; 4 —  $NiO$

ведено до 10 циклов нагрева и охлаждения. В результате анализа циклограмм образцов установлено, что максимальная температура нагрева образцов с ТЗП снижается с 415 (без покрытия) до 365 и 345 °С (соответственно для двух- и пятислойного покрытий).

Таким образом, фазовый состав внешнего керамического слоя (содержание моноклинной фазы  $ZrO_2$  и тетрагональной  $T'$ -фазы с низкой степенью тетрагональности) зависит от толщины металлического подслоя. Для обеспечения оптимального фазового состава керамического слоя, а именно содержания моноклинной фазы не более 4 мас. % и максимального содержания  $T'$ -фазы, ответствен-

ной за термостойкость в условиях термоциклирования, толщина металлического подслоя не должна превышать 100 мкм.

В результате исследования трех- и пятислойных покрытий, полученных с использованием механических смесей жаростойкий сплав–керамика, установлено, что их фазовый состав, микротвердость и структура монотонно изменяются в направлении от основы к внешнему керамическому слою, при этом трещины, отслоения от основы и расслоения покрытий при металлографическом анализе не обнаружены.

При исследовании термостойкости двух- и пятислойных покрытий металл–керамика в условиях термоциклирования (нагрев струей газового пламени до 400 °С в течение 3 с с последующим охлаждением до 20 °С) ТЗП выдержали не менее 2000 термоциклов. Анализ циклограмм образцов с двух- и пятислойными покрытиями показал, что их наличие позволяет снизить температуру алюминиевой основы соответственно на 50 и 70 °С.

1. Никитин М. Д., Куля А. Я., Захаров Н. И. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей двигателей. — Л.: Машиностроение, 1977. — 166 с.
2. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильюшенко, В. А. Оковитый, С. П. Кундас, Б. Форманек / Под общ. ред. А. Ф. Ильюшенко. — Минск: НИИПМЭОП, 2002. — 480 с.
3. Теплозащитные покрытия на основе  $ZrO_2$  / А. Ф. Ильюшенко, В. С. Ивашко, В. А. Оковитый, С. Б. Соболевский. — Минск: НИИПМЭОП, 1998. — 128 с.



4. *Высокоогнеупорные материалы из диоксида циркония* / Д. С. Рутман, Ю. С. Торопов, С. Ю. Плинер и др. — М.: Металлургия, 1985. — 137 с.
5. *Плинер С. Ю., Дабижва А. А.* Упрочнение керамики из диоксида циркония за счет тетрагональномоноклинных превращений // *Огнеупоры*. — 1987. — № 3. — С. 58–62.
6. *Khor K. A., Gu Y. W.* Plasma spraying of functionally graded NiCrAlY/yttria stabilized zirconia coating using pre-alloyed powders // *Thermal spray: A united forum for scientific and technological advances*, Ohio, USA. — Ohio: ASM International, Materials Park, 1997. — P. 259–265.
7. *Суперсплавы: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* / Под ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля: В 2 кн. Кн. 2 / Под ред. Р. Е. Шалина. — М.: Металлургия, 1995. — 384 с.
8. *Технологические особенности нанесения теплозащитных покрытий при производстве лопаток газовых турбин* / З. А. Фролов, В. А. Поклад, Б. В. Рябенко, А. В. Зимарева // *Свароч. пр-во*. — 2004. — № 11. — С. 39–41.
9. *Коломыцев П. Т.* Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. — М.: Металлургия, 1991. — 237 с.

The comparative characteristic of multilayer plasma coatings ZrO<sub>2</sub>-NiCrAlY is given. It is established that phase composition of the external ceramic layer depends on thickness of the metallic underlayer, i. e. its thermal conductivity that affects the cooling rate of the ZrO<sub>2</sub> particles deposited on it. Thickness of the metallic underlayer should not exceed 100 ppm to ensure optimal heat resistance of the ceramic layer.

Поступила в редакцию 25.03.2010



**8-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА МЕТАЛЛООБРАБОТКА.  
УРАЛ/UralMetalExpo**

**2-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА СВАРКА. УРАЛ/UralWeldExpo**

12–14 апреля 2011 г.

Екатеринбург [www.uralexpotool.ru](http://www.uralexpotool.ru)

#### Тематика выставки

- Металлорежущее оборудование
- Кузнечно-прессовое оборудование
- Литейное оборудование
- Сварочное оборудование. Специальные методы в сварке
- Оборудование, инструменты, материалы, технологии для обработки поверхностей и нанесения покрытий
- Инструменты станочные: металлорежущие, абразивные, резбонарезные и др.
- Контрольно-измерительные машины, приборы и инструменты
- Комплектуемые узлы и изделия, в том числе системы ЧПУ, гидравлические и пневматические системы, электродвигатели
- Подшипники. Технологическая оснастка. Материалы для металлообработки
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами и производством, промышленная автоматизация. Роботы, системы и компоненты, информационные технологии
- Ретрофитинг и модернизация оборудования. Лизинг
- Субконтракция
- Инвестиционные и инновационные проекты, технологические и конструкторские разработки, профильное образование