

ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT8M-1

Приведены результаты исследований по разработке эрозионно-жаростойких защитных покрытий, наносимых методами вакуумной плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ) и технологии плазмохимического синтеза (ТПХС). Покрытия предназначены для защиты титановых лопаток компрессора ГТД от воздействия окружающей среды во всеклиматических условиях.

По результатам проведенных металлографических, микрорентгеноспектральных, рентгеноструктурных исследований и испытаний установлено, что многослойные покрытия обеспечивают защиту титанового сплава VT8M-1 в общеклиматических и всеклиматических условиях при температуре 450°С при кратковременных забросах температур в диапазоне 500–600°С при сохранении механических свойств.

Многослойные ионно-плазменные эрозионно-коррозионностойкие покрытия нового поколения позволят увеличить ресурс титановых лопаток компрессора ГТД, эксплуатируемых во всеклиматических условиях, с возможностью взлета и посадки самолетов на аэродромах с грунтовой взлетно-посадочной полосой.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, титановые сплавы.

Одним из перспективных способов защиты титановых лопаток компрессора от воздействия окружающей среды в различных климатических условиях является разработка надежных покрытий, обеспечивающих на рабочей поверхности лопаток образование защитных слоев с сопротивлением агрессивному воздействию среды, в несколько раз превышающему сопротивление материала основы.

Анализ повреждений титановых лопаток компрессора ГТД после длительной эксплуатации показывает, что основными причинами возникновения дефектов являются:

- эрозионное воздействие пылевоздушного потока;
- поверхностное окисление.

ВИАМ провел работы по выбору материала и конструкции покрытия, а также исследование возможности создания эрозионно-жаростойкого покрытия с целью разработки комплексной защиты жаропрочного титанового сплава VT8M-1 во всеклиматических условиях в области температур 450–600°С [1–3].

В работе приведены результаты исследований по разработке эрозионно-жаростойких защитных покрытий, наносимых методами вакуумной плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ) и технологии плазмохимического синтеза (ТПХС), для защиты титановых лопаток компрессора ГТД от воздействия окружающей среды во всеклиматических условиях.

Проведен экспериментальный анализ эрозионной стойкости большой группы керметных покрытий различного состава в контакте с жаропрочным титановым сплавом VT8M-1.

В качестве вариантов защитных покрытий использовались:

- керметные слои монокридов (MeN) и монокарбидов (MeC) чистых металлов, где Me: Ti, Zr, Cr (толщиной $\delta=10-25$ мкм);
- керметные слои нитридов на основе сплавов титана, циркония (толщиной $\delta=4-20$ мкм);
- керметные слои с прослойками, полученными из предварительно нанесенных слоев на основе чистых металлов (толщиной $\delta=10-25$ мкм);
- многослойные покрытия систем (Co–Ni–Cr–Al–Y)+MeN; (Ni–Cr–Al–Y)+MeN; (Ni–Al–Y)+MeN; Me+MeN, получаемые последовательным нанесением слоев данных материалов, причем внешний слой наносят в среде реакционного газа ($\delta=20-40$ мкм).

С целью оценки эффективности выбранных вариантов защитных покрытий были проведены испытания на коррозионную и эрозионную стойкость в общеклиматических и во всеклиматических условиях.

Для определения коррозионной стойкости в морских условиях использовалась стандартная методика ускоренных циклических испытаний, по которой образцы с различными вариантами покрытий нагревались в воздушной среде до заданной температуры (испытания проводились при 500 и 600°C), далее осуществлялась выдержка в течение 1 ч, затем образцы подсушивались на воздухе 2–3 мин и охлаждались в 3%-ном растворе NaCl (методом окунания), после чего выдерживались во влажном эксикаторе в течение 22–24 ч. После каждого цикла испытаний (нагрев → выдержка в эксикаторе) проводился осмотр образцов с целью выявления дефектов и определения степени поражения поверхности образца.

Результаты испытаний при температурах 500–600°C позволили выявить варианты защитных покрытий, которые после 10 циклов испытаний не имели дефектов на контрольной поверхности: $(\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{ZrN}$ и $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$.

Повышение температуры испытаний до 600°C привело к сокращению числа вариантов защитных покрытий, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость композиции сплав–покрытие. При этом среди испытанных вариантов конденсированных покрытий из чистых металлов и сплавов не было выявлено композиций с высоким защитным эффектом. Наибольшей стойкостью обладали образцы с двухслойными комбинированными покрытиями следующих типов: $(\text{Co-Ni-Cr-Al-Y}) + (\text{Al-Co-Si-Y})$, $(\text{Co-Ni-Cr-Al-Y}) + (\text{Al-Ni-Y})$. При этом лучшие показатели по совокупности всех испытаний имело покрытие системы $(\text{Co-Ni-Cr-Al-Y}) + (\text{Al-Co-Si-Y})$.

Требования, предъявляемые к коррозионной стойкости защитных покрытий для лопаток компрессора ГТД, подразумевают (при наличии высоких антикоррозионных характеристик) и способность длительно защищать материал лопатки от обычной газовой коррозии при максимальной рабочей температуре. С целью оценки жаростойкости для нескольких типов покрытий были проведены испытания на образцах из сплава BT8M-1 при выдержке в спокойной воздушной атмосфере печи в течение 500 ч при температуре 450–600°C (рис. 1 и 2). Результаты испытаний показали, что покрытия системы $(\text{Co-Ni-Cr-Al-Y}) + (\text{Al-Co-Si-Y})$ и $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$ обладают высокой жаростойкостью и окислостойкостью в условиях проведенных испытаний. Данные по испытаниям на жаростойкость титанового сплава BT8M-1 с покрытием $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$ в области температуры 450–600°C приведены в табл. 1–3.

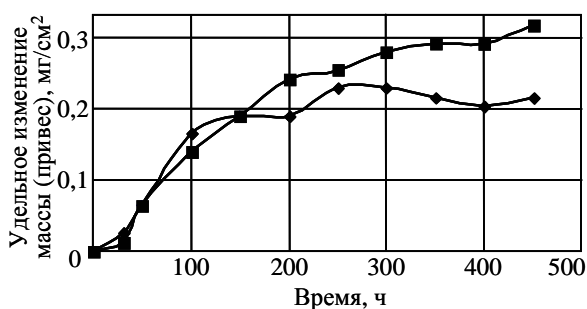


Рис. 1. Жаростойкость при температуре 600°C титанового сплава BT8M-1 без покрытия (■) и с двухстадийным покрытием СДП-1+ВСДП-20 (♦) после комбинированной ионной обработки в плазме сплавов системы Ni-Co-Cr-Al-Y и Al-Co-Si-Y

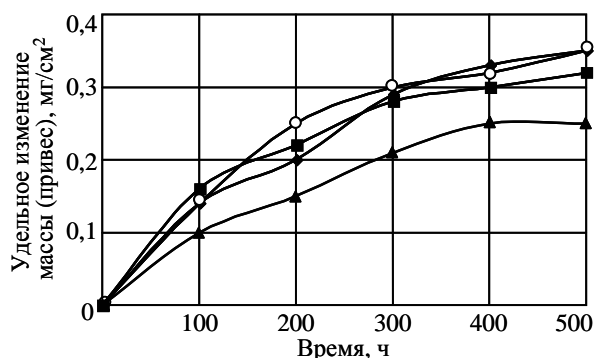


Рис. 2. Жаростойкость при температуре 450°C титанового сплава BT8M-1 с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями:

- ♦ – $(\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$;
- – $(\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$;
- ▲ – $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$; ○ – без обработки

Таблица 1

Жаростойкость сплава ВТ8М-1 с многослойными покрытиями и без покрытия при 450°С

Тип покрытия	Изменение массы, мг/см ² , после испытания в течение, ч			
	100	200	300	500
Без покрытия	0,14	0,25	0,30	0,35
(Ni-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN	0,14	0,20	0,29	0,30
(Ni-Cr-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN	0,16	0,22	0,28	0,32
Zr ⁺ +ZrN	0,10	0,15	0,21	0,25

Таблица 2

Жаростойкость сплава ВТ8М-1 с многослойными покрытиями и без покрытия при 500°С

Тип покрытия	Изменение массы, мг/см ² , после испытания в течение, ч	
	100	400
Без покрытия	0,11	0,15
(Ni-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN	-0,080	-1,40
(Ni-Cr-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN	-0,094	-1,51
Zr ⁺ +ZrN	-0,077	-1,35

Таблица 3

Жаростойкость сплава ВТ8М-1 с многослойными покрытиями и без покрытия при 600°С

Тип покрытия	Изменение массы, мг/см ² , после испытания в течение, ч		
	30	50	100
Без покрытия	0,038	0,089	0,153
(Ni-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN	0,165	0,165	-1,858
(Ni-Cr-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN	-1,158	-1,400	-2,381
Zr ⁺ +ZrN	0,254	0,318	-0,959

Таблица 4

Результаты испытаний в камере тропического климата сплава ВТ8М-1 с покрытиями и без покрытия

Покрытие	Длительность испытаний, мес	Потери массы, %	Внешний вид поверхности после коррозионных испытаний
(Ni-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN	3	Нет	Без поражений
(Ni-Cr-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN		То же	То же
Zr ⁺ +ZrN		-«-	-«-
Без покрытия		-«-	-«-

Таблица 5

Результаты испытаний в камере солевого тумана сплава ВТ8М-1 с покрытиями и без покрытия

Покрытие	Длительность испытаний, мес	Потери массы, %	Внешний вид поверхности после коррозионных испытаний
(Ni-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN	3	1-2	Единичные точки продуктов коррозии
(Ni-Cr-Al-Y) ⁺ +Zr ⁺ +ZrN		30	На каждом образце по 1 питтингу $\varnothing(1-2)$ мм, по 3-4 питтинга $\varnothing(0,5-1,5)$ мм
Zr ⁺ +ZrN		Нет	Без поражений
Без покрытия		1-2	Поверхность покрыта продуктами коррозии

По результатам климатических испытаний в камерах солевого тумана (КСТ) и тропического климата (КТК) установлено (табл. 4 и 5), что на поверхности не наблюдаются коррозионные поражения и нет потери массы многослойного $Zr^{+}+ZrN$ покрытия, однако при испытаниях в КСТ на поверхности наблюдаются единичные точки продуктов коррозии и питтинги, что приводит к потерям массы многослойных $(Ni-Cr-Al-Y)^{+}+Zr^{+}+ZrN$ и $(Ni-Al-Y)^{+}+Zr^{+}+ZrN$ покрытий соответственно на 30 и 1–2%.

Были проведены металлографические исследования многослойных покрытий на титановом сплаве ВТ8М-1 в исходном состоянии и после испытаний на жаростойкость и коррозию. Микроструктура многослойного покрытия на титановом сплаве представлена в виде трехслойной композиции: коррозионный слой + промежуточный подслои + эрозионный слой (рис. 3).

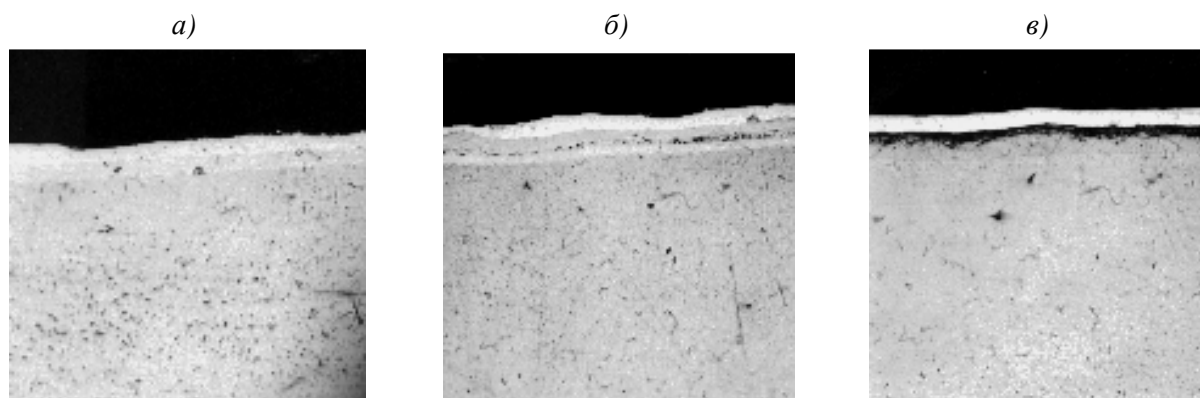


Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) сплава ВТ8М-1 с многослойными покрытиями:
a – $(Ni-Cr-Al-Y)^{+}+Zr^{+}+ZrN$; *б* – $(Ni-Al-Y)^{+}+Zr^{+}+ZrN$; *в* – $Zr^{+}+ZrN$

Проведены микрорентгеноспектральные и рентгеноструктурные исследования эрозионно-коррозионностойких ионно-плазменных покрытий на титановом сплаве ВТ8М-1. Микроструктура эрозионно-коррозионностойких покрытий и послойный элементный анализ представлены на рис. 4 и в табл. 6.

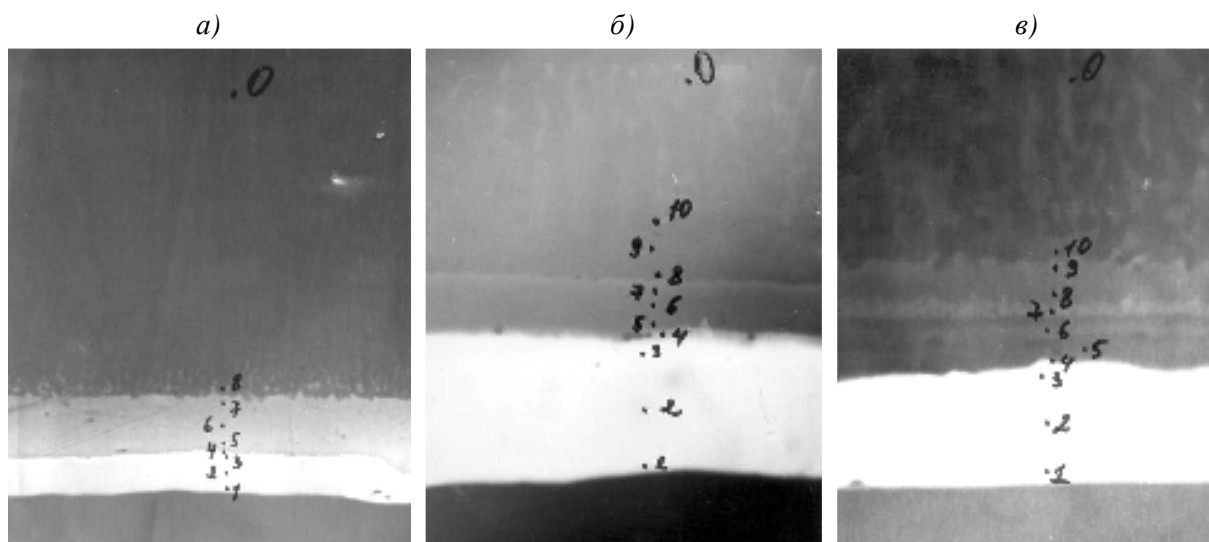


Рис. 4. Микроструктура титанового сплава ВТ8М-1 с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями:
a – $Zr^{+}+ZrN$ ($\times 1000$); *б* – $(Ni-Al-Y)^{+}+Zr^{+}+ZrN$ ($\times 3000$); *в* – $(Ni-Cr-Al-Y)^{+}+Zr^{+}+ZrN$ ($\times 3000$);
 цифрами обозначены точки элементного анализа (см. табл. 6)

Локальный химический состав образцов из сплава ВТ8М-1 с покрытием

Покрытие	Слой покрытия	Место анализа – точка (см. рис. 4)	Содержание элементов, % (по массе)										
			Al	Si	Ti	Cr	Ni	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Σ
Zr ⁺ +ZrN	Основа Первый	Точка «0» (центр образца)	5,5	0,1	86,5	0,7	Н/о*	0,1	1,3	0,1	4,2	1,4	99,9
		1 (край)	Н/о*	1,0	0,1	Н/о*	0,2	1,9	90,5	Н/о*	Н/о*	Н/о*	93,7
		2 (середина)	То же	1,3	0,1	0,1	0,1	1,9	90,7	То же	0,5	То же	94,7
	Второй	3 (вблизи второго слоя)	-«-	1,0	3,3	Н/о*	0,1	1,8	90,2	-«-	1,4	-«-	97,8
		4	1,3	0,9	25,8	0,5	Н/о*	1,9	66,4	0,1	2,0	0,7	99,6
	Третий	5 (вблизи второго слоя)	1,5	1,1	37,2	0,5	То же	1,7	54,5	0,8	2,4	0,6	100,3
		6 (середина)	2,1	0,6	44,7	0,3	0,1	1,6	45,5	0,8	3,2	0,6	99,5
		7 (вблизи основного металла)	2,5	Н/о*	49,6	0,2	0,1	0,1	41,5	1,8	3,4	0,6	99,8
(Ni-Al-Y) ⁺ + +Zr ⁺ +ZrN	Основа Первый	Точка «0» (центр образца)	5,4	То же	86,7	0,4	0,1	0,4	1,5	0,3	4,2	1,4	100,4
		1 (край)	0,1	-«-	0,1	Н/о*	0,2	Н/о*	92,4	1,2	Н/о*	Н/о*	94
		2 (середина)	Н/о*	-«-	0,1	То же	0,3	То же	91,1	1,1	То же	То же	92,6
	Второй	3 (вблизи второго слоя)	То же	-«-	0,3	0,1	1,0	-«-	92,6	1,2	-«-	-«-	95,2
		4	1,0	-«-	1,3	0,5	21,0	-«-	71,6	2,1	-«-	0,4	97,9
	Третий	5 (вблизи второго слоя)	7,1	-«-	38,6	4,0	34,8	1,1	11,0	0,8	0,3	0,6	98,3
		6 (середина)	2,6	-«-	60,5	0,3	31,8	0,1	1,3	0,1	1,0	0,1	97,8
		7 (около зоны взаимодействия)	2,4	-«-	41,8	1,7	48,3	Н/о*	0,9	0,1	0,4	0,3	95,9
		8 (около зоны взаимодействия)	3,5	1,0	72,7	0,4	12,1	То же	1,0	0,3	5,5	0,7	97,2
	9 (вблизи основного металла)	4,5	1,4	77,0	0,3	5,9	-«-	0,9	Н/о*	6,6	1,3	97,9	
(Ni-Cr-Al-Y) ⁺ + +Zr ⁺ +ZrN	Основа Первый	Точка «0» (центр образца)	5,4	0,2	86,6	0,3	Н/о*	0,1	1,5	0,2	4,2	1,2	99,7
		1 (край)	Н/о*	0,6	0,2	0,2	0,4	Н/о*	92,4	1,4	Н/о*	0,2	95,4
		2 (середина)	То же	Н/о*	0,2	Н/о*	0,3	То же	92,9	1,3	То же	Н/о*	94,7
	Второй	3 (вблизи второго слоя)	-«-	То же	0,3	0,2	1,7	-«-	94,0	0,8	-«-	0,4	97,4
		4	0,6	0,3	0,5	3,9	23,2	-«-	70,2	1,4	-«-	Н/о*	100,1
	Третий	5	18,4	Н/о*	2,3	36,3	38,3	0,6	3,4	0,2	-«-	То же	99,5
		6	9,5	То же	19,2	35,7	32,5	0,7	0,5	0,1	-«-	-«-	98,2
		7	6,1	-«-	35,7	19,9	34,9	0,5	1,2	0,1	0,4	0,1	98,9
	Четвертый	8	3,3	-«-	42,9	6,2	38,4	0,1	0,9	0,1	0,2	0,1	94,2
		9 (вблизи основного металла)	2,6	-«-	59,7	2,1	32,6	Н/о*	1,1	Н/о*	0,9	0,2	99,2
Основной металл	10	5,6	-«-	77,2	1,2	7,6	0,2	1,3	0,3	4,3	1,3	99	

* Не обнаружено.

На рис. 5–7 представлены микроструктуры титанового сплава ВТ8М-1 с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями после термостатирования по режиму 450°C, 200 ч в контакте с раствором 3%-ного NaCl (см. рис. 5); после испытаний на коррозионную стойкость в 3%-ном растворе NaCl после нагрева до 600°C, в течение 10 циклов (см. рис. 6) и 20 циклов (см. рис. 7) (1 цикл: нагрев до 600°C→охлаждение в 3%-ном NaCl). Показано, что по результатам металлографических исследований после коррозионных испытаний эрозионно-коррозионностойких покрытий наблюдается сохранение структуры слоев, однако при визуальном осмотре поверхности титанового сплава с покрытиями наблюдаются единичные точки продуктов коррозии и питтинги на образцах с покрытиями $(\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$ и $(\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$; на образцах с покрытием $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$ повреждений не обнаружено.

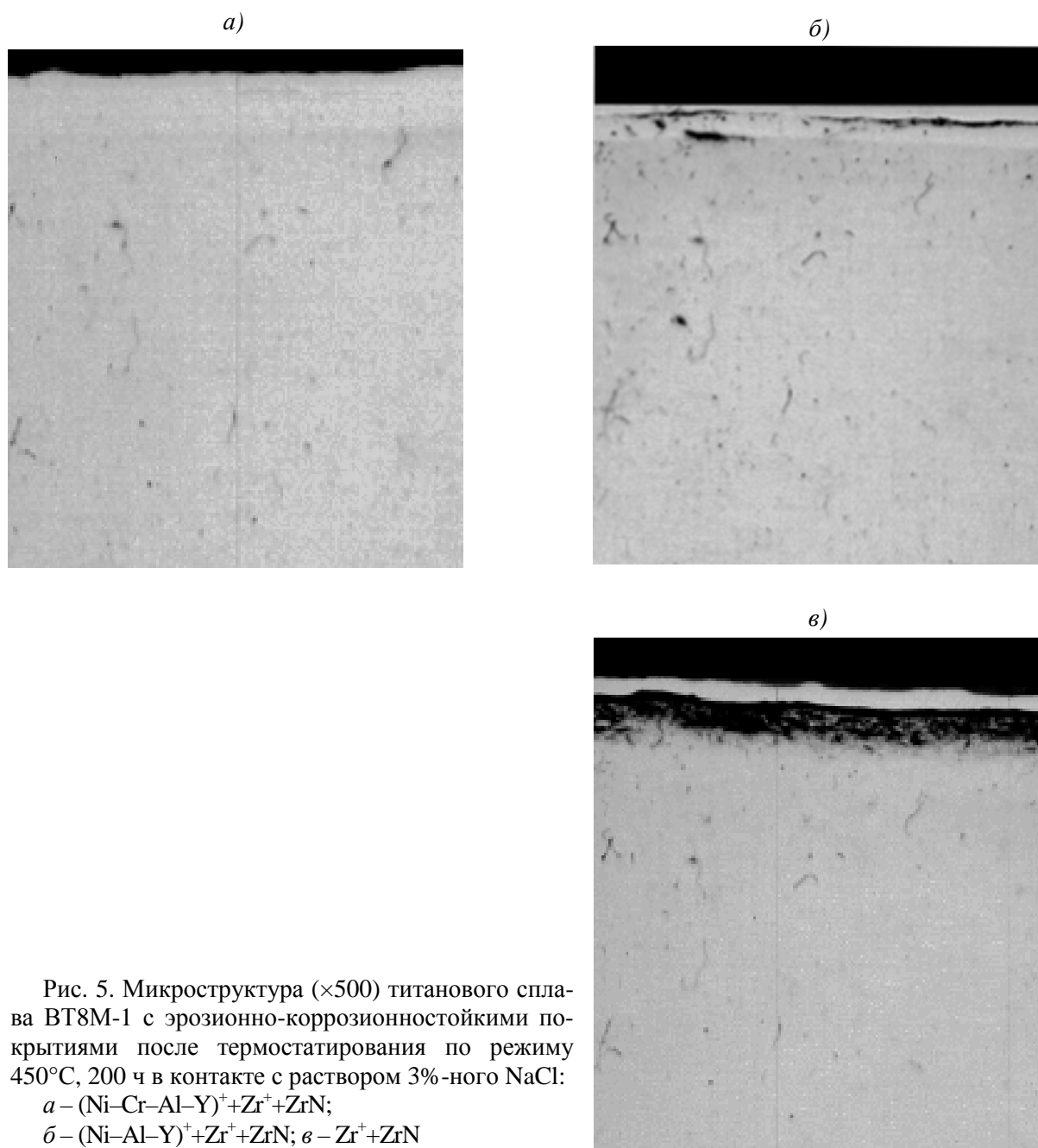


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$) титанового сплава ВТ8М-1 с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями после термостатирования по режиму 450°C, 200 ч в контакте с раствором 3%-ного NaCl:
a – $(\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$;
б – $(\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$; *в* – $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$

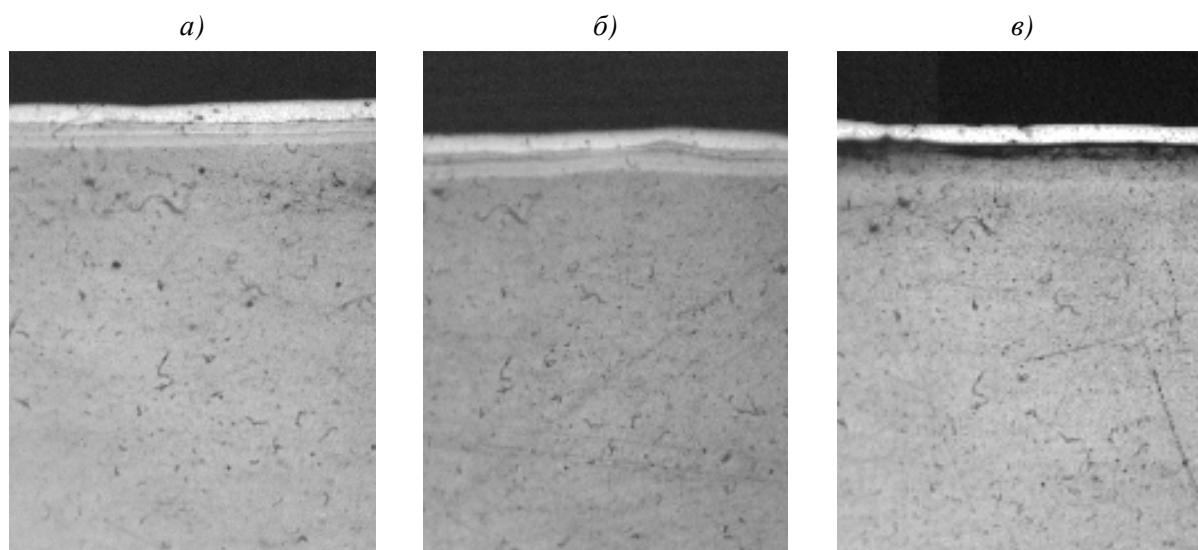


Рис. 6. Микроструктура ($\times 500$) титанового сплава VT8M-1 с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями после испытаний на коррозионную стойкость в 3%-ном растворе NaCl при 600°C , 10 циклов (1 цикл: нагрев до 600°C →охлаждение в 3%-ном NaCl):

$a - (\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$; $b - (\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$; $v - \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$

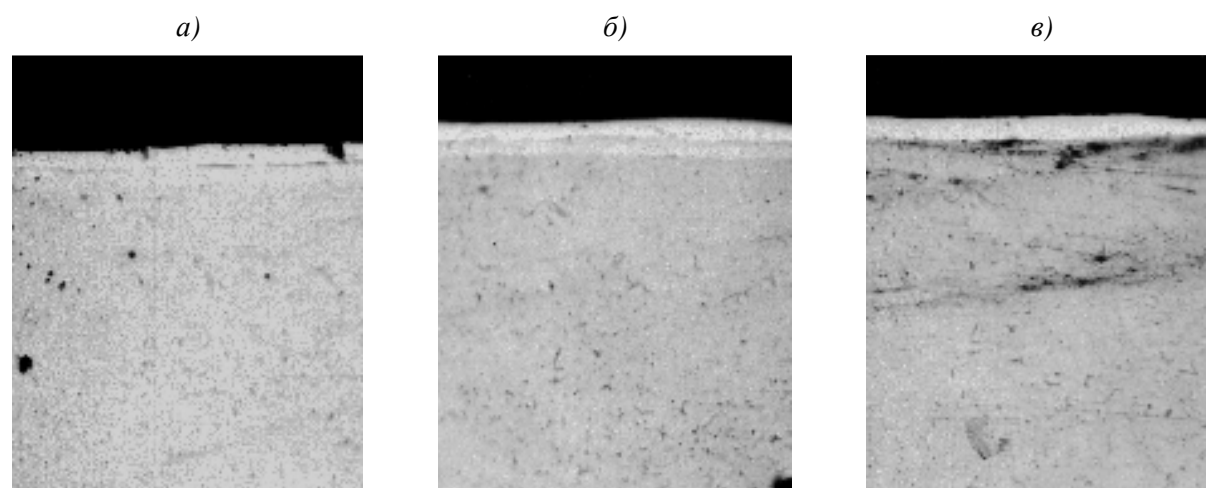


Рис. 7. Микроструктура ($\times 500$) титанового сплава VT8M-1 с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями после испытаний на коррозионную стойкость в 3%-ном растворе NaCl при 600°C , 20 циклов (1 цикл: нагрев до 600°C , 1 ч→охлаждение в 3%-ном NaCl):

$a - (\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$; $b - (\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$; $v - \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$

Результаты испытаний на относительный эрозионный износ покрытия $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$ на титановом сплаве VT8M-1 приведены в табл. 7.

Таблица 7

Относительная эрозионная стойкость сплава VT8M-1 с покрытием и без покрытия		
Угол атаки эрозионного потока α , град	Тип покрытия	Относительный эрозионный износ (средняя фракция 300 мкм)
70	Без покрытия	1
	$\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	0,3
20	Без покрытия	1
	$\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	0,15

По результатам исследований и испытаний была определена конструкция многослойного эрозионно-жаростойкого покрытия: жаростойкий слой + эрозионный слой на титановом сплаве BT8M-1:

- жаростойкий слой формируется в плазме сплава на основе циркония;
- эрозионный слой формируется в плазме сплава на основе циркония в среде реакционного газа.

Таким образом, из широкой гаммы исследованных защитных покрытий предложена и определена конструкция эрозионно-коррозионностойкого ионно-плазменного покрытия на титановом сплаве BT8M-1, состоящая из внутреннего коррозионного слоя, полученного методом ионного модифицирования поверхности в плазме сплавов систем Ni–Cr–Al–Y, Ni–Al–Y и сплава на основе Zr, и внешнего эрозионностойкого слоя на основе нитрида циркония.

По результатам проведенных металлографических, микрорентгеноспектральных, рентгеноструктурных исследований и испытаний установлено, что многослойные покрытия обеспечивают защиту титанового сплава BT8M-1 в общеклиматических и всеклиматических условиях при температуре 450°C и кратковременных забросах в диапазоне температур 500–600°C при сохранении механических свойств.

Многослойные ионно-плазменные эрозионно-коррозионностойкие покрытия нового поколения позволят увеличить ресурс титановых лопаток компрессора ГТД, эксплуатируемых во всеклиматических условиях, с возможностью взлета и посадки на аэродромах с грунтовой взлетно-посадочной полосой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Горлов Д.С. Перспективы применения ионно-плазменных покрытий для титановых сплавов //В сб.: Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов (посвященном 55-летию лаборатории «Титановые сплавы для конструкций самолетов и двигателей»). М.: ВИАМ. 2007. С. 61–68.
2. Луценко А.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленные технологические процессы ионной обработки поверхности //В сб.: Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2005. №1. С. 30–40.
3. Мубояджян С.А., Луценко А.Н. Ионное модифицирование поверхности – перспективный процесс для защиты лопаток компрессора ГТД от солевой коррозии и эрозии //Труды международн. научн.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина. М.: ВИАМ. 2006. С. 314–319.