

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Основными направлениями развития авиационного двигателестроения и промышленного турбиностроения являются снижение удельной массы двигателей, повышение их удельных характеристик, ресурса и надежности.

Преимущественной областью применения жаропрочных титановых сплавов является производство газотурбинных двигателей, где общая доля таких сплавов в конструкции составляет ~28–37% от суммарной массы двигателя.

Одним из перспективных способов защиты титановых лопаток компрессора от воздействия окружающей среды являются надежные покрытия, обеспечивающие на рабочей поверхности лопаток образование защитных слоев с сопротивлением агрессивному воздействию среды, в несколько раз превышающим 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.

Повышение рабочих температур при эксплуатации деталей ГТД является критичным фактором для титановых сплавов, так как механизм окисления титановых сплавов при температурах выше 620°C протекает по нелинейному закону и сопровождается насыщением поверхностных слоев кислородом на глубину ~10–15 мкм, что приводит к охрупчиванию материала и досрочному снятию деталей с эксплуатации. Поэтому проблема обеспечения работоспособности при температурах выше 600°C и защита поверхности деталей из титановых сплавов является актуальной задачей.

Таким образом, существенный прорыв в области широкого применения титановых сплавов для деталей ГТД может быть связан с разработкой защитных и упрочняющих покрытий, которые позволят обеспечить ресурс и надежность ГТД в различных климатических условиях.

ВИАМ на протяжении многих лет проводит научно-исследовательские разработки по созданию ионно-плазменного оборудования и технологий нанесения ионно-плазменных покрытий на лопатки ГТД.

В данной работе представлены результаты исследований и разработок ионно-плазменных покрытий на титановых сплавах.

### **Ионное модифицирование поверхности**

Технология ионно-плазменной обработки и модифицирования поверхности титановых сплавов обеспечивает получение на поверхности обрабатываемой детали насыщенного (диффузионного) слоя со структурно-фазовым состоянием, отличным от состояния материала основы. Разработки в этом направлении проводятся для решения задач повышения ресурса ответственных деталей авиационного двигателя, таких как лопатки компрессора и др.

В проведенных исследованиях процесса ионного модифицирования поверхности титановых сплавов были опробованы различные способы ионной обработки поверхности:

- модифицирование в плазменном потоке чистых металлов, бинарных и многокомпонентных сплавов;
- последовательное модифицирование в плазменных потоках различного состава;
- модифицирование поверхности с применением конденсированных слоев плазмообразующего материала;
- модифицирование с предварительным нанесением конденсированного слоя («mixture» – перемешивание);
- модифицирование с предварительным и последующим нанесением конденсированного слоя.

В табл. 1 приведены результаты рентгеноструктурного анализа (РСА) ( $\alpha+\beta$ )- и псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов после ионного модифицирования.

Таблица 1

**Фазовый состав поверхностных слоев титановых сплавов после ионного Модифицирования**

Материал основы	Вид бомбардирующих ионов	Фазовый состав поверхностного слоя
BT8M-1	Без обработки	$\alpha$ -Ti + $\beta$ -Ti
	Ni-Cr-Al-Y (осаждение)	$\alpha$ -Ti + $\gamma$ -Ni + Ni <sub>3</sub> Ti + Ti <sub>2</sub> Ni + Ni <sub>2</sub> Y
	(Ni-Cr-Al-Y) <sup>+</sup>	$\alpha$ -Ti + $\beta$ -Ti + TiNi(B2) + TiNi(B19)' + $\gamma$ -Ni
	Ni-Al-Y (осаждение)	$\alpha$ -Ti + $\gamma$ -Ni + Ni <sub>3</sub> Ti + Ti <sub>2</sub> Ni + Ni <sub>2</sub> Y
	(Ni-Al-Y) <sup>+</sup>	$\alpha$ -Ti + $\beta$ -Ti + TiNi(B2) + TiNi(B19)' + $\gamma$ -Ni
	Zr <sup>+</sup>	$\alpha$ -Ti + $\alpha'$ -Ti(Zr) + $\beta$ -Ti(Zr)
BT9	Без обработки	$\alpha$ -Ti + $\beta$ -Ti
	(Ni-Cr-Al-Y) <sup>+</sup>	$\alpha$ -Ti + $\beta$ -Ti + TiNi(B2) + TiNi(B19)' + $\gamma$ -Ni
BT18Y	Без обработки	$\alpha$ -Ti + $\beta$ -Ti
	(Ni-Cr-Al-Y) <sup>+</sup>	$\alpha$ -Ti + $\beta$ -Ti + TiNi(B2) + TiNi(B19)' + $\gamma$ -Ni
BT25Y	Без обработки	$\alpha$ -Ti + $\beta$ -Ti
	Zr <sup>+</sup>	$\alpha$ -Ti + $\alpha'$ -Ti(Zr) + $\beta$ -Ti(Zr)

Полученные результаты микрорентгеноспектрального анализа показывают (табл. 2), что в процессе ионного модифицирования поверхности титановых сплавов происходит формирование модифицированных слоев с образованием диффузионной зоны на основе элементов материала основы и покрытия.

Таблица 2

**Элементный состав модифицированных слоев**

Материал основы	Вид бомбардирующих ионов	Содержание элементов, % (по массе)									
		Cr/Sn	Ni	Mo	W/Ta	Ti	Al	Si/Y	Nb	Zr	Co
BT8M-1	Ni-Al-Y (осаждение) (Ni-Al-Y) <sup>+</sup>	2,5/-	84,6	0,3	-	5,9	5,0	-/0,4	-	0,1	-
		-/0,2	55,7	0,3	-/0,5	39,1	2,4	-	-	0,3	-
BT18Y	Без обработки (Ni-Co-Cr-Al-Y) <sup>+</sup>	-	-	1,0	-	90,0	3,5	0,2/-	1,1	3,0	-
		21,1/-	50,6	-	-	1,5	7,1	-	-	-	19,3

При ионной обработке в плазме сплавов бинарных или псевдобинарных (многокомпонентных) систем на основе никеля, алюминия, циркония происходит формирование внешнего слоя на основе материала покрытия, диффузионной зоны в виде модифицированных слоев на основе элементов покрытия и основы и внутреннего слоя (рис. 1, а, б) или протяженной диффузионной зоны (рис. 1, в) в зависимости от растворимости материала модификатора в титановом сплаве и энергетических параметров технологического процесса.

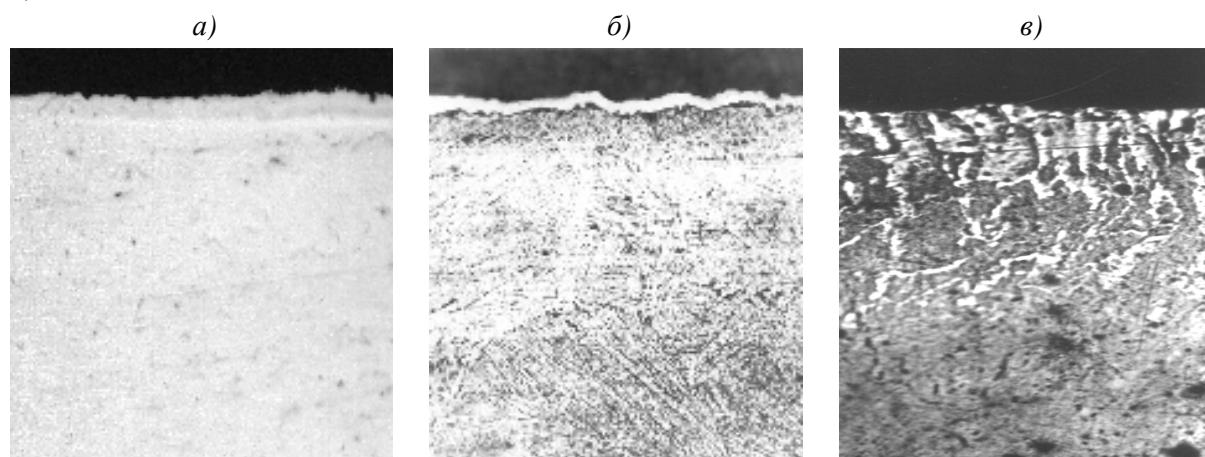


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 500$ ) титановых сплавов после ионного модифицирования:  
 а – сплав ВТ8М-1, обработанный в плазме сплавов на основе (Ni-Co-Cr-Al-Y)+(Al-Co-Si-Y);  
 б – сплав ВТ18У, обработанный в плазме сплава на основе системы Ni-Co-Cr-Al-Y;  
 в – сплав ВТ9, обработанный в плазме сплава на основе Zr-Y

С целью определения работоспособности титановых сплавов ВТ8М-1, ВТ18У и ВТ25У при температурах до  $600^{\circ}\text{C}$  проведены испытания на жаростойкость исходных образцов без обработки и после ионного модифицирования. Результаты испытаний представлены на рис. 2 и 3.

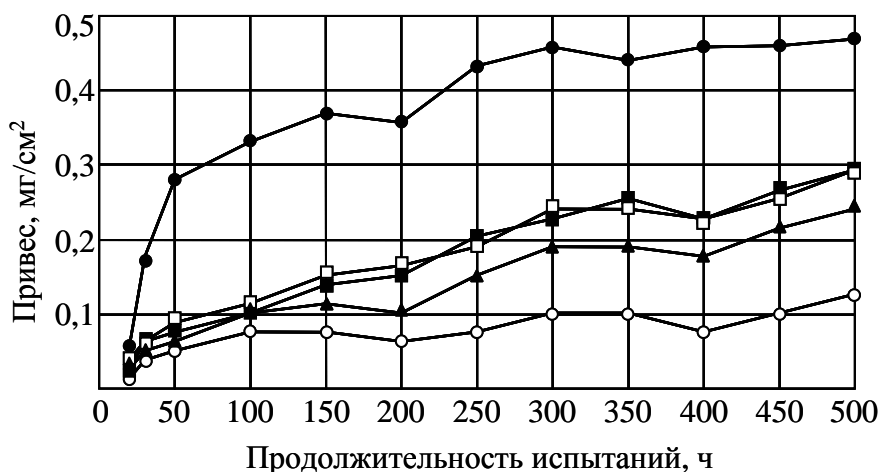


Рис. 2. Жаростойкость при  $600^{\circ}\text{C}$  сплава ВТ18У после ионного модифицирования в плазме сплава Ni-Co-Cr-Al-Y (СДП-1):

□, ■, ▲, ○ – T1, T2, T3, T4 – варианты ионной обработки; ● – без покрытия

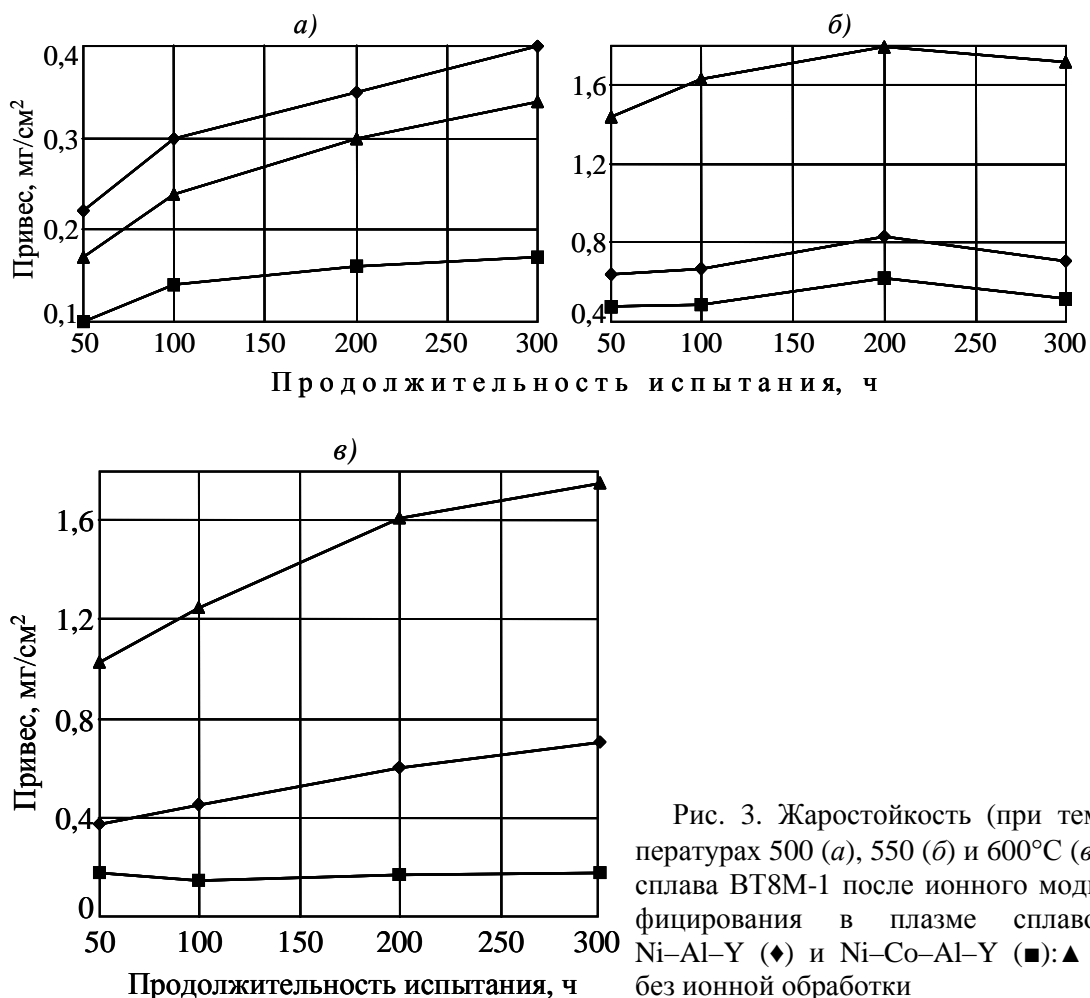


Рис. 3. Жаростойкость (при температурах 500 (а), 550 (б) и 600°C (в)) сплава VT8M-1 после ионного модифицирования в плазме сплавов Ni-Al-Y (◆) и Ni-Co-Al-Y (■): ▲ – без ионной обработки

Приведенные испытания на жаростойкость в области температур 500–600°C титановых сплавов после ионного модифицирования показывают, что метод ионной обработки поверхности обеспечивает защиту поверхности титановых сплавов от насыщения ее кислородом в течение всего времени испытаний. Однако в настоящее время наблюдается тенденция увеличения продолжительности наработки до 1000, 2000 и 5000 ч, что потребует дальнейших исследований как технологии ионного модифицирования, так и процессов, происходящих в зоне взаимодействия материала основы и модификатора.

### Эрозионностойкие покрытия

Для защиты титановых сплавов от воздействия пылевоздушного и абразивного потока в ВИАМ были разработаны технологические процессы нанесения упрочняющих эрозионностойких покрытий на основе титана и циркония в среде реакционного газа (азот, ацетилен).

Оценка эрозионной стойкости ионно-плазменных покрытий на титановых сплавах осуществлялась методом сравнительных испытаний на специальном стенде. В качестве эрозионной среды использовался кварцевый песок Люберецкого карьера со средним размером частиц ~300 мкм. Скорость частиц в потоке составляла ~20 м/с. Экспозиция подвергалась одна сторона плоского образца размером 25×25 мм (обратная сторона экранировалась от попадания частиц держателем, на котором закреплялся образец). Испытания проводились при двух различных ориентациях плоскости образца

относительно оси набегающего потока (углы атаки  $\alpha$ ):  $\alpha=70$  град (обтекание, близкое к лобовому удару) и  $\alpha=20$  град (касательное обтекание).

Результаты проведенных сравнительных испытаний титановых сплавов с покрытиями на основе нитридов и карбидов в зависимости от толщины, состава и технологии нанесения представлены на рис. 4–6. На гистограммах за единицу принят относительный эрозионный износ титанового сплава.

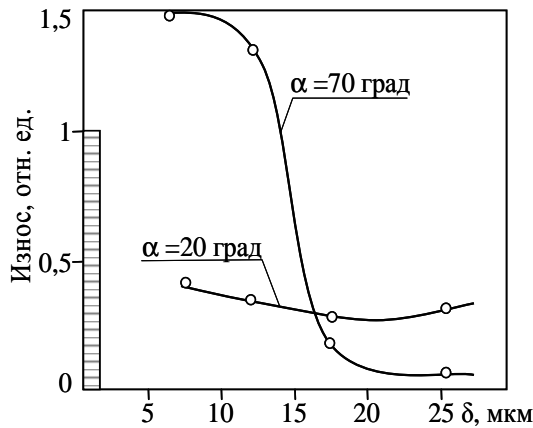


Рис. 4. Зависимость относительного эрозионного износа от толщины ( $\delta$ ) покрытия ZrN (эрозионная стойкость сплава ОТ4-1 без покрытия ( $\square$ ) принята за единицу) при  $\alpha=20$  град и  $\alpha=70$  град

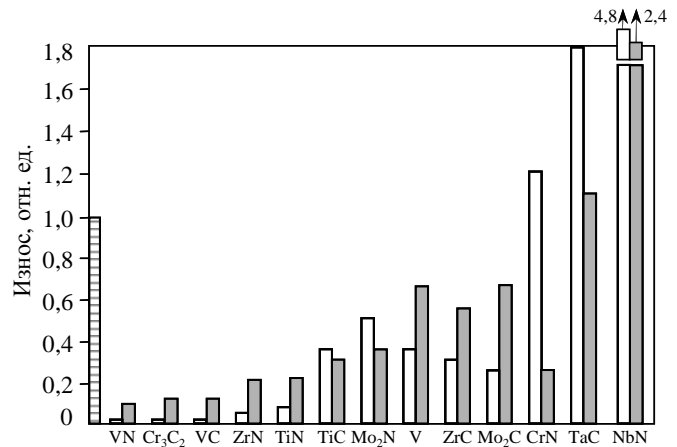


Рис. 5. Зависимость относительного эрозионного износа (воздействие речного песка при  $P=3$  ат) от состава эрозионностойких покрытий на сплаве ОТ4-1 при угле атаки  $\alpha=20$  град ( $\square$ ) и  $\alpha=70$  град ( $\blacksquare$ ). Относительный износ ОТ4-1 без покрытия принят за единицу ( $\square$ )

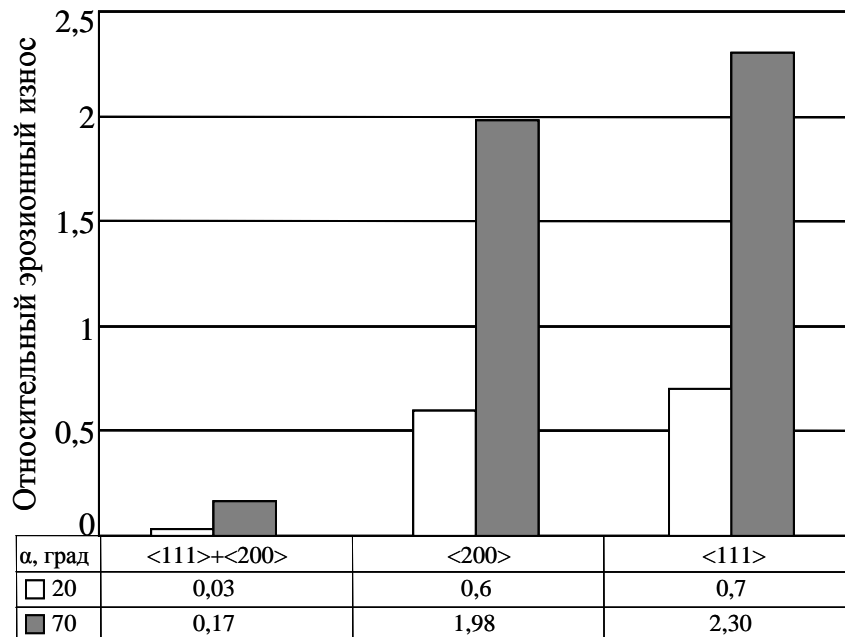


Рис. 6. Зависимость относительного эрозионного износа ( $\square$  –  $\alpha=20$  град;  $\blacksquare$  –  $\alpha=70$  град) от текстуры эрозионностойкого покрытия TiN на титановом сплаве ВТ8М-1

Установлено, что эрозионная стойкость зависит от толщины наносимого покрытия. Так, покрытия с толщиной  $<10$  мкм не обеспечивают нужной стойкости к пылевоздушному потоку при угле атаки  $70$  град, а покрытия с толщиной  $>30$  мкм при испытаниях выкрашиваются и скалываются из-за остаточных напряжений на уровне  $10\text{--}15$  ГПа.

Наиболее оптимальная толщина эрозионностойкого покрытия составляет 12–25 мкм, при этом остаточные напряжения сохраняются на уровне 0,5–1,5 ГПа, что обеспечивает необходимую адгезию и эрозионную стойкость и не приводит к сколам и выкрашиванию покрытия.

### Эрозионно-жаростойкие покрытия

В ВИАМ проводятся работы по исследованию эрозионно-жаростойкого покрытия с целью возможности создания комплексной защиты титанового сплава ВТ8М-1 в области температур 450–600°C для обеспечения работоспособности во всеклиматических условиях.

Проведены испытания на жаростойкость и коррозию образцов из сплава ВТ8М-1 с многослойными эрозионно-жаростойкими покрытиями  $(\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$ ;  $(\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$  и  $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$  при температурах 450–600°C. Установлено, что многослойные покрытия обладают жаростойкостью (привес 0,25–0,30 мг/см<sup>2</sup>) при температуре 450°C (табл. 3). По результатам 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  $\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$  покрытия. Однако при использовании многослойных покрытий  $(\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$  и  $(\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$  на поверхности при испытаниях в КСТ наблюдаются единичные точки продуктов коррозии и питтинги, что приводит к потерям массы покрытий соответственно на 30 и 1–2%.

Таблица 3

#### Жаростойкость сплава ВТ8М-1 при температуре 450°C

Тип покрытия	Привес, мг/см <sup>2</sup> , после испытания в течение, ч				Состояние покрытия
	100	200	300	500	
Без покрытия	0,14	0,25	0,30	0,35	–
$\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	0,10	0,15	0,21	0,25	Дефектов не наблюдается

Таблица 4

#### Испытания в камере тропического климата (в течение 3 мес) сплава ВТ8М-1 с покрытиями и без покрытия

Покрытие	Потери массы, %	Внешний вид после коррозионных испытаний
$(\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	Нет	Без поражений
$(\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	То же	То же
$\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	-«-	-«-
Без покрытия	-«-	-«-

Таблица 5

#### Испытания в камере солевого тумана (в течение 3 мес) сплава ВТ8М-1 с покрытиями и без покрытия

Покрытие	Потери массы, %	Внешний вид после коррозионных испытаний
$(\text{Ni-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	1–2	На поверхности единичные точки продуктов коррозии
$(\text{Ni-Cr-Al-Y})^+ + \text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	30	На поверхности образцов по 1 питтингу $\varnothing(1-2)$ мм; по 3–4 питтинга $\varnothing(0,5-1,5)$ мм
$\text{Zr}^+ + \text{ZrN}$	Нет	Без поражений
Без покрытия	1–2	Поверхность покрыта продуктами коррозии

Результаты испытаний на относительный эрозионный износ покрытия  $Zr^+ + ZrN$  на титановом сплаве ВТ8М-1 приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Относительная эрозионная стойкость сплава ВТ8М-1 с покрытием и без покрытия**

Угол атаки эрозионного потока $\alpha$ , град	Тип покрытия	Относительный эрозионный износ (средняя фракция 300 мкм)
70	Без покрытия	1
	$Zr^+ + ZrN$	0,3
20	Без покрытия	1
	$Zr^+ + ZrN$	0,15

По результатам исследований определена конструкция многослойного эрозионно-жаростойкого покрытия – жаростойкий слой + эрозионный слой на титановом сплаве ВТ8М-1:

– жаростойкий слой формируется в плазме сплава на основе циркония;

– эрозионный слой формируется в плазме сплава на основе циркония в среде реакционного газа.

На рис. 7 представлена микроструктура эрозионно-жаростойкого покрытия на титановом сплаве ВТ8М-1.



Рис. 7. Микроструктура ( $\times 3000$ ) сплава ВТ8М-1 с многослойным эрозионно-жаростойким покрытием  $Zr^+ + ZrN$

### **Применение защитных и упрочняющих ионно-плазменных покрытий на изделиях из титановых сплавов**

Разработанные технологии нанесения защитных и упрочняющих ионно-плазменных покрытий на титановых сплавах могут быть реализованы на установках МАП-1М (модернизированный вариант серийной промышленной установки МАП-1) или МАП-2 (установка МАП-1М с автоматизированной системой управления технологическим процессом – АСУ ТП), которыми оснащены моторные заводы отрасли, или на новой автоматизированной установке МАП-3 с возможностью ассистированного ионно-плазменного осаждения.

Для защиты титановых сплавов ВИАМ предлагает следующие варианты:

– ионная обработка поверхности для защиты титановых сплавов от поверхностного окисления и обеспечения термостабильности при температурах 500–600°C; покрытия на основе нитридов  $ZrN$  для защиты титановых сплавов от воздействия пылевоздушного потока (толщина 15–30 мкм); применяются в серийном производстве на двигателях ТВ3-117, РД33 и др.;

– двухстадийные покрытия с эрозионностойким слоем на основе нитридов  $TiN$ ,  $ZrN$  и жаростойким слоем для защиты лопаток из титановых сплавов в различных климатических условиях (всеклиматика).

Таким образом, разработанные защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для титановых сплавов обеспечивают повышение в 2–5 раза жаростойкости, многократное повышение эрозионной стойкости (в зависимости от угла атаки пылевоздушного потока) и защитный эффект в общеклиматических и во всеклиматических условиях. Дальнейшие исследования и разработки ионно-плазменных покрытий на титановых сплавах будут направлены на повышение рабочих температур композиции основа–покрытие выше 600°C, что обеспечит защиту нового титанового сплава ВТ41 и сплавов на интерметаллидной основе. Увеличение доли применения жаропрочных титановых сплавов в конструкции деталей ГТД способствует снижению удельной массы двигателя.

*В.Г. Анташев, О.С. Кашанов, Т.В. Павлова, Н.А. Ночовная*

### **СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРА**

Уже практически полвека титановые сплавы занимают прочное положение в конструкциях различных типов газотурбинных авиационных двигателей. К настоящему времени объем их применения составляет до 36% от массы двигателя, при этом основная масса потребления приходится на наиболее ответственные детали компрессора низкого и высокого давления – лопатки и диски.

Основными достоинствами титановых жаропрочных сплавов, подтвержденными многолетней эксплуатацией двигателей, являются высокие удельные характеристики прочности, жаропрочности и коррозионная устойчивость, обеспечившие высокую надежность и весовую эффективность двигателей.

На рис. 1 схематически показаны области применения различных титановых сплавов в зависимости от температуры рабочей зоны двигателя, а в табл. 1 – основные показатели их свойств.

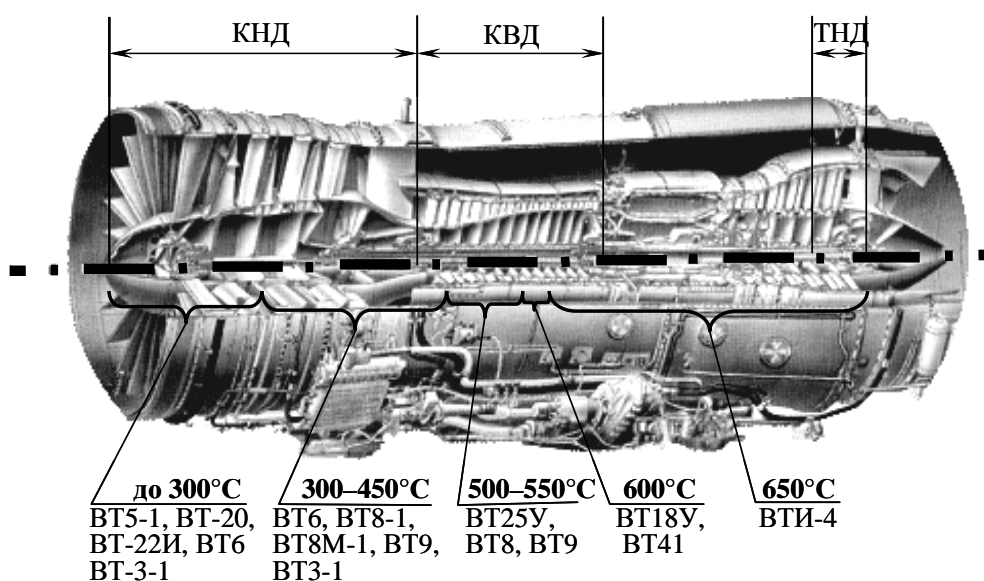


Рис. 1. Области применения жаропрочных титановых сплавов в конструкции компрессора ГТД