

Научная статья

УДК 669.058

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-87-95

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОИСТЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЯХ

Д.А. Александров<sup>1</sup>, Д.С. Горлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Приведены результаты исследований различных вариантов слоистых эрозионностойких покрытий на основе нитридов титана и циркония, карбида хрома. Проведены металлографические исследования, исследования остаточных напряжений, фазового состава, а также испытания на эрозионную стойкость и выносливость образцов с покрытиями. Установлена зависимость эрозионной стойкости, фазового состава и напряженно-деформированного состояния покрытий от энергетических параметров процесса нанесения, а также влияние функциональных подслоев на напряженно-деформированное состояние слоистого ионно-плазменного покрытия и его эрозионную стойкость.

**Ключевые слова:** эрозионная стойкость, остаточные напряжения, ионно-плазменные покрытия, нитрид титана, карбид хрома

**Для цитирования:** Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследования эрозионной стойкости и остаточных напряжений в слоистых ионно-плазменных покрытиях // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-87-95.

Scientific article

## THE RESEARCH OF EROSION RESISTANCE AND RESIDUAL STRESSES IN LAYERED ION-PLASMA COATINGS

D.A. Alexandrov<sup>1</sup>, D.S. Gorlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Presents the results of studies of various variants of layered erosion-resistant coatings based on titanium and zirconium nitrides, chromium carbide. Metallographic studies, studies of residual stresses, phase composition, tests for erosion resistance, endurance of samples with coatings were carried out. The dependence of erosion resistance, phase composition and stress-strain state of coatings on the energy parameters of the application process has been established. The influence of functional sublayers on the stress-strain state of the layered ion-plasma coating and its erosion resistance has been established.

**Keywords:** erosion resistance, residual stresses, ion-plasma coatings, titanium nitride, chromium carbide

**For citation:** Alexandrov D.A., Gorlov D.S. The Research of erosion resistance and residual stresses in layered ion-plasma coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-87-95.

### Введение

Остаточные напряжения в ионно-плазменных покрытиях, которые образуются в процессе осаждения покрытий, оказывают существенное влияние на дальнейшие эксплуатационные свойства системы «основа–покрытие». Особое влияние остаточные напряжения оказывают на систему «титановый сплав–покрытие» [1–3]. Остаточные напряжения в ионно-плазменных покрытиях формируются из двух составляющих – это напряжения роста и термические напряжения. В первом случае на напряженное состояние оказывает влияние параметр кристаллической решетки материала покрытия – является ли он близким к стандартному, растет или уменьшается его текстура? В случае термических напряжений следует иметь в виду разницу в значениях температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) материала покрытия и защищаемой основы. Обычно определяют суммарные напряжения, так как оценивать влияние конкретной составляющей в общий вклад – достаточно сложная задача. Гораздо более важным является выявление влияния величины остаточных напряжений или их направленности (сжатия или растяжения) на эксплуатационные свойства системы «основа–покрытие». Известно, что для обеспечения выносливости и многоциклового усталости в системе «основа–покрытие» необходимо сформировать сжимающие напряжения, величина которых не должна превышать 1000–1200 МПа [4].

Помимо влияния остаточных напряжений на выносливость системы «основа–покрытие» представляет интерес их влияние на эрозионную стойкость. Если для сохранения выносливости основы с покрытием необходим низкий уровень напряжений сжатия (на уровне 0,5–0,6 ГПа), то для сохранения высокого уровня эрозионной стойкости – не менее 1 ГПа [5, 6]. Известно также, что знак остаточных напряжений и их величина зависят от нескольких факторов: разницы в значениях ТКЛР основы и ионно-плазменного покрытия, толщины, состава (элементного и стехиометрического) и конструкции покрытия. В данной работе будут рассмотрены различные конструкции ионно-плазменных покрытий на основе нитридов титана, циркония и хрома, карбидов титана и хрома.

### Материалы и методы

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Нанесение ионно-плазменных покрытий проводили на образцы из титанового сплава и сталей на установках МАП-2 и МАП-3 в автоматическом режиме по предварительно настроенным параметрам с использованием встроенного программного обеспечения, что значительно повышает точность и воспроизводимость параметров технологического процесса. Использовались различные катоды на основе никелевых сплавов, а также на основе титана, хрома и циркония.

На титановую и стальную подложки наносили различные слоистые эрозионно-стойкие покрытия: Ti + TiN, Zr + ZrN, TiN/CrN, TiC/CrC + TiN/CrN, CrN + TiN/CrN, а также карбид хрома с различными коррозионностойкими подслоями при разной величине потенциала смещения.

Качественный фазовый анализ образцов с ионно-плазменными покрытиями, нанесенными на подложки из стали и титана, проводили с применением дифрактометра в стандартной геометрии Брэгга–Брентано в  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении (интервал сканирования составлял 20–145 градусов).

Измерения остаточных напряжений осуществляли неразрушающим рентгеновским методом  $\sin^2\psi$  с применением дифрактометра в  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении; съемку проводили методом бокового наклона с фиксированным углом  $\psi_0$ .

Метод  $\sin^2\psi$  основан на построении и анализе угловой зависимости межплоскостного расстояния кристаллитов. При возникновении напряжений искажается кристаллическая решетка, что приводит к смещению положений рентгеновских рефлексов на дифрактограмме относительно ненапряженного состояния. К смещению рентгеновских рефлексов также может привести неоднородность химического состава по глубине покрытия. Для исключения влияния неоднородности химического состава на положение линий проведена серия ассиметричных съемок неподвижного образца под разными углами падения луча на образец. Угол падения луча на образец, а следовательно, глубину проникновения в образец последовательно увеличивали с 1 до 3 градусов с шагом в 0,5 градуса. Сканирование проводили по оси угла  $2\theta$  в интервале углов от 116 до 131 градусов. Определение эрозионной стойкости осуществляли на лабораторном испытательном стенде при углах атаки пылевоздушного потока на образец 70 и 20 градусов, что соответствует лобовому и касательному воздействию в реальных условиях эксплуатации лопаток компрессора. В качестве материала для испытаний использовали кварцевый песок Люберецкого карьера со средней фракцией частиц 300–350 мкм. Исследование микроструктуры на образцах проводили методами оптической и электронной металлографии, испытания на многоцикловую усталость – по ГОСТ 25.502–79 на гладких образцах по схеме нагружения «чистый изгиб» при вращении с частотой 50 Гц на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов.

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены результаты исследований и испытаний покрытий на основе нитридов титана и циркония, нанесенных при потенциале смещения на деталях 200 и 150 В. Показаны также использование металлических подслоев и их влияние на напряженно-деформированное состояние системы «подложка–покрытие».

Таблица 1

**Результаты исследований и испытаний слоистых ионно-плазменных покрытий на основе нитридов титана и циркония, нанесенных на титановый сплав ВТ1-0**

Покрытие (напряжение на деталях, В)	Фазовый состав	Остаточное напряжение сжатия, МПа	Толщина покрытия, мкм	Относительный эрозионный износ*
TiN (200)	TiN	1377	17	0,31/0,55
TiN (150)	TiN	933	16	0,17/0,1
Ti + TiN (150)	TiN	855	18	0,15/0,08
TiN + Ti + TiN (150)	TiN	840	21	0,21/0,1
ZrN (200)	ZrN	1235	18	0,15/0,12
ZrN (150)	ZrN	1155	17	0,11/0,06
Zr + ZrN (150)	ZrN	960	18	0,06/0,05
ZrN + Zr + ZrN (150)	ZrN	930	21	0,1/0,08

\* В числителе – при угле атаки пылевоздушного потока на образец  $2\theta = 70$  градусов, в знаменателе – при  $2\theta = 20$  градусов.

Установлено, что повышенный потенциал смещения создает при нанесении нитридов титана уровень напряжений сжатия, который может не улучшать эрозионную стойкость системы «подложка–покрытие», а приводить к снижению эрозионной стойкости вследствие снижения когезионной прочности покрытия. Такая же картина наблюдается и с нитридом циркония. Показано, что различное использование металлического подслоя между подложкой и самим нитридом, а также внутри слоя нитрида может оптимизировать напряженно-деформированное состояние системы. Использование металлического слоя в качестве барьерного внутри слоя нитрида существенно снижает уровень остаточных напряжений в системе «основа–покрытие», но при этом эрозионная

стойкость слоистого покрытия Ti + TiN выше, чем у покрытия TiN + Ti + TiN; то же самое справедливо для нитрида циркония.

В табл. 2 приведены свойства слоистых композиционных покрытий на стали ЭП866Ш с верхним слоем карбида хрома (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) и различными коррозионностойкими подслоями. Нанесение карбида хрома проходило при напряжениях смещения 100 и 150 В.

*Таблица 2*

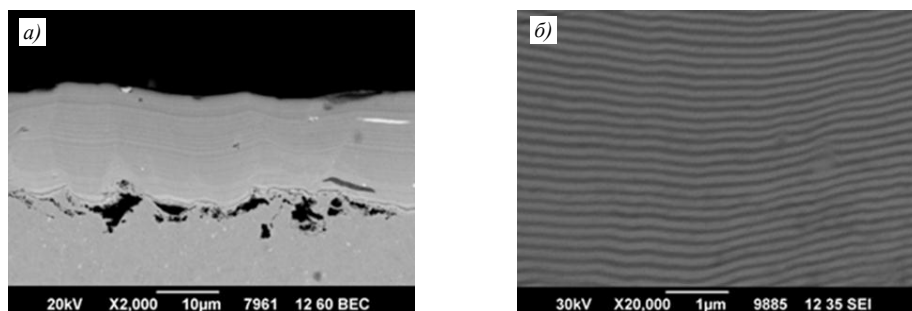
**Свойства слоистых композиционных покрытий, нанесенных на сталь ЭП866Ш, с верхним эрозионностойким слоем на основе карбида хрома (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)**

Покрытие (напряжение на деталях, В)	Остаточное напряжение сжатия, МПа	Толщина покрытия, мкм	Относительный эрозионный износ*
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	546	18	0,15**/0,09
ВЖЛ-2 + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	612	10 + 18	0,168/0,041
ВЖЛ-2 + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (100)	164	10 + 18	0,21/0,1
TiC + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	244	7 + 18	0,17/0,067
Cr + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	442	3 + 18	0,197/0,083
Al + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	350	18	Сдвиг покрытия
Al <sup>+</sup> (15)*** + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	202	17	0,02/0,04
Al <sup>+</sup> (30)*** + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	290	17	0,17/0,11
(ВСДП-2)C + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	323	21	0,02/0,02

\* В числителе – при угле атаки пылевоздушного потока на образец 2θ = 70 градусов, в знаменателе – при 2θ = 20 градусов.  
 \*\* Эрозионная стойкость основы принимается за единицу.  
 \*\*\* Модифицирование материала основы алюминием в течение 15–30 мин.

Установлено, что в целом по сравнению с покрытиями на основе нитрида титана уровень остаточных напряжений достаточно низкий – не превышает 0,6 ГПа. Относительный эрозионный износ покрытий – от 0,15 до 0,02 при угле атаки 70 градусов и от 0,041 до 0,02 при угле атаки 20 градусов. Толщина покрытий колеблется от 18 до 28 мкм. Установлено, что на остаточные напряжения в слоистом покрытии карбида хрома существенное влияние оказывает подслоя, на который он нанесен. Наиболее низкими напряжениями сжатия обладает слоистое покрытие TiC + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. Установлено, что при более низком напряжении смещения уровень остаточных напряжений в покрытии снижается, также снижается и эрозионная стойкость. При более высоком напряжении смещения повышается температура формирования карбида хрома, что позволяет сформировать более устойчивое стехиометрическое соединение. Показано также, что в случае использования перед нанесением карбида хрома модифицирования поверхности – например, сплавом на основе алюминия – покрытие не потеряет эрозионную стойкость, в отличие от ситуации, когда алюминий наносится в виде подслоя, что объясняется нарушением адгезионной прочности из-за малой микротвердости алюминиевого подслоя. Следует отметить, что продолжительность модифицирования алюминием влияет на напряженное состояние и эрозионную стойкость слоистого покрытия с верхним слоем на основе карбида хрома. Объясняется это фазово-структурными изменениями самой подложки при насыщении ее алюминием с образованием интерметаллидных фаз и растворов типа FeAl и Fe<sub>3</sub>Al [7, 8]. На примере покрытий TiC + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и (ВСДП-2)C + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> показано, что при использовании коррозионностойкого подслоя, нанесенного в атмосфере реактивного газа, путем плавного изменения значений ТКЛР и микротвердости по всей толщине покрытия можно добиться показателей эрозионной стойкости карбида хрома на уровне и даже выше, чем для монослойного покрытия карбида хрома, т. е. изменение значений ТКЛР в системе «стальная основа–карбидный подслоя–карбид хрома» происходит более плавно, чем в системе «стальная основа–карбид хрома» [9, 10].

Одновременное использование нанослойных структур на основе нитридов титана и циркония может улучшить свойства композиции «подложка–покрытие». На рисунке приведены микроструктуры нанослойного покрытия системы TiN/CrN.



Микроструктуры (а –  $\times 2000$ ; б –  $\times 20000$ ) нанослойного покрытия системы TiN/CrN

Общая толщина такого покрытия составляет 18 мкм (см. рисунок, а). Показана характерная микроструктура нанослойного покрытия системы TiN/CrN, состоящая из чередующихся слоев TiN толщиной 80 нм (светлая полоса) и CrN толщиной 50 нм (темная полоса) (см. рисунок, б).

В табл. 3 приведены результаты испытаний слоистых нанослойных покрытий на титановом сплаве BT1-0.

Таблица 3

**Результаты исследований и испытаний слоистых ионно-плазменных покрытий на основе нитридов титана и циркония, карбидов титана и хрома, нанесенных на титановый сплав типа BT1-0**

Покрытие (напряжение на деталях, В)	Фазовый состав	Остаточное напряжение, МПа	Толщина покрытия, мкм	Относительный эрозионный износ*
TiN/ZrN (Hc**) (150)	TiN, ZrN	-105 (TiN), -1042 (ZrN)	21	0,1/0,1
TiN/CrN (Hc) (150)	TiN, CrN	-916 (TiN), -774 (CrN)	18	0,04/0,025
TiC/CrC (Hc) (150)	TiC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	-1909 (TiC), -114 (Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> )	22	0,16/0,125
TiC/CrC (Hc) (150) + TiN/CrN (Hc)	TiC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , CrN	-427 (TiN), -209 (CrN)	22	0,05/0,09
CrN + TiN/CrN (Hc) (150)	TiN, CrN, Cr <sub>2</sub> N	-1012 (TiN), -91 (CrN)	22	0,06/0,03

\* В числителе – при угле атаки пылевоздушного потока на образец  $2\theta = 70$  градусов, в знаменателе – при  $2\theta = 20$  градусов.  
\*\* Hc – нанослойное покрытие.

Показано, что в нанослойной системе TiN/ZrN уровень остаточных напряжений сжатия в фазе TiN существенно снижается до 105 МПа, уровень остаточных напряжений в фазе ZrN остается на уровне аналогичного параметра для монослойного покрытия из нитрида циркония (табл. 1). Значение эрозионной стойкости данного покрытия находится на уровне монослойных покрытий TiN и ZrN сопоставимой толщины. Установлено влияние подслоя при нанесении покрытия TiN/CrN (Hc) на уровень остаточных напряжений в покрытии и эрозионную стойкость. При использовании подслоя TiC/CrC (Hc) в покрытии TiC/CrC (Hc) + TiN/CrN (Hc) существенно снижается уровень остаточных напряжений в покрытии, в фазе TiN – в ~2 раза, при этом сохраняется уровень эрозионной стойкости слоистого покрытия на уровне нанослойной системы TiN/CrN. В покрытии TiC/CrC (Hc) обнаружены высокие остаточные напряжения в фазе TiC (1909 МПа), относительный эрозионный износ при этом равен 0,16 и 0,125 при

углах атаки 70 и 20 градусов, что сопоставимо с уровнем эрозионной стойкости моно-слоистого карбида хрома (табл. 3) и двухслойного покрытия TiC + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, нанесенного на стальную основу (табл. 2).

Проведены исследования на многоцикловую усталость слоистых ионно-плазменных покрытий на образцах из титанового сплава и стали ЭП866Ш. Испытания проводили на базе 2·10<sup>7</sup> циклов на пределе выносливости каждого исследуемого материала. Результаты испытаний приведены в табл. 4 и 5. В табл. 4 приведены результаты усталостных испытаний стали ЭП866Ш со слоистыми покрытиями на базе карбида хрома при комнатной и рабочей температурах.

Таблица 4

**Результаты испытаний на многоцикловую усталость образцов из стали ЭП866Ш с покрытиями**

Покрытие (напряжение на деталях, В)	Температура испытания, °С/приложенное напряжение $\sigma_{-1}$ , МПа	Состояние образцов
Без покрытия	20/560	Прошли базу испытаний
Без покрытия	650/180	
ВЖЛ-2 + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	20/560	
TiC + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	20/560	
ВЖЛ-2 + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	650/180	
Al <sup>+</sup> (15) + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	650/180	
(ВДП-2)C + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (150)	650/180	

Показано, что выносливость системы «сталь–карбид хрома» мало зависит от используемого металлического подслоя. Можно сделать вывод, что на выносливость стальной основы большее влияние оказывает не само покрытие, а особенности процесса его осаждения – например, был ли нагрев выше температуры разупрочнения или нет. Следует отметить, что уровень остаточных напряжений сжатия в карбидах хрома также позитивно влияет на выносливость системы «основа–покрытие».

В табл. 5 приведены результаты испытаний на многоцикловую усталость слоистых покрытий на основе нитридов металлов.

Таблица 5

**Результаты испытаний на многоцикловую усталость образцов из титанового сплава ВТ8М-1 с покрытиями**

Покрытие (напряжение на деталях, В)	Температура испытания, °С/приложенное напряжение $\sigma_{-1}$ , МПа	Состояние образцов
Без покрытия	450/450	Прошли базу
TiN (200)	450/450	Разрушились
TiN (150)	450/450	Разрушились
Ti + TiN (150)	450/450	Прошли базу
TiN/CrN (Hc*) (150)	450/450	Разрушились
TiC/CrC (Hc) (150) + TiN/CrN (Hc) (150)	450/450	Разрушились
Ti + TiN/CrN (Hc) (150)	450/450	Прошли базу

\* Hc – нанослойное покрытие.

Показано, что на выносливость системы «титановый сплав–эрозионностойкое покрытие» оказывают влияние не энергетические параметры процесса (если не имеется в виду перегрев основы), а наличие подслоя, который снижает уровень остаточных напряжений до приемлемых значений. Так, подслоем TiC/CrC в покрытии TiC/CrC (Hc) + TiN/CrN (Hc) имеет очень высокие остаточные напряжения в фазе TiC (–1909 МПа) (табл. 3), что негативно сказывается на выносливости системы, при том что уровень остаточных напряжений в верхнем слое TiN/CrN в обеих фазах даже меньше, чем в покрытии TiN/CrN (Hc) [11]. Важен также подбор толщины покрытия для

нахождения баланса выносливости и эрозионной стойкости системы «подложка–эрозионностойкое покрытие». Покрытие TiN/CrN имеет высокую термостабильность, что позволяет ему сохранять целостность при длительных высокотемпературных испытаниях под нагрузкой [12–18].

### **Заключения**

Установлено, что на эрозионную стойкость нитридов титана и циркония влияют энергетические параметры процесса – главным образом напряжение смещения. Показана зависимость между уровнем остаточных напряжений в покрытии и эрозионной стойкостью. Различное использование металлического подслоя между подложкой и самим нитридом, а также внутри слоя нитрида может оптимизировать напряженно-деформированное состояние системы.

В целом, по сравнению с покрытиями на основе нитрида титана, уровень остаточных напряжений в покрытии на основе карбида хрома, нанесенного на стальную основу, достаточно низкий. Относительный эрозионный износ покрытий составляет от 0,15 до 0,02 при угле атаки 70 градусов и от 0,041 до 0,02 при угле атаки 20 градусов. Показано, что на остаточные напряжения в слоистом покрытии карбида хрома существенное влияние оказывает подслой, на который он нанесен. Установлено, что при более низком напряжении смещения на детали уровень остаточных напряжений в покрытии снижается, также снижается и эрозионная стойкость. При повышении напряжения смещения на детали формируются более эрозионностойкие карбиды.

Показано также, что модифицирование поверхности стальной основы алюминием перед нанесением эрозионностойкого покрытия карбида хрома происходит изменение напряженно-деформированного состояния основы, что сказывается на остаточных напряжениях в эрозионностойком покрытии и его эрозионной стойкости. Следует отметить, что продолжительность модифицирования алюминием влияет на напряженное состояние и эрозионную стойкость слоистого покрытия с верхним слоем из карбида хрома. Установлено, что использование функциональных, например, коррозионностойких подслоев, нанесенных в атмосфере реактивного газа, позволяет плавно повышать микротвердость по всей толщине покрытия и получить увеличение эрозионной стойкости в 2–3 раза по сравнению с монослойным карбидом, нанесенным на сталь.

Установлено влияние подслоя при нанесении нанослойного покрытия системы TiN/CrN (Hc) на уровень остаточных напряжений в покрытии и эрозионную стойкость.

Показано, что выносливость системы «сталь–карбид хрома» мало зависит от используемого металлического подслоя. На выносливость стальной основы большее влияние оказывает не само покрытие, а особенности процесса и энергетические параметры его нанесения – главным образом потенциал смещения.

Показано также, что на выносливость системы «титановый сплав–эрозионностойкое покрытие» большее влияние оказывают не энергетические параметры процесса, а наличие подслоя, который снижает и демпфирует уровень остаточных напряжений до приемлемого значения.

### **Список источников**

1. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо-альфа-титанового сплава VT41 // Титан. 2016. № 2 (52). С. 33–42.
2. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
3. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава VT6, полученного методами аддитивных технологий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.

4. Александров Д.А., Горлов Д.С., Будиновский С.А. Применение комплекса ионно-плазменных технологий для защиты лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя от эрозионного износа и фреттинга // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-71-80.
5. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for gas turbine engine compressor blades // Russian metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017. No. 6. P. 494–504.
6. Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора ГТД // Металлы. 2009. № 3. С. 3–20.
7. Якушева Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
8. Громов В.И., Якушева Н.А., Востриков А.В., Черкашнев Н.Н. Высокопрочные конструкционные стали для валов газотурбинных двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
9. Grzesik W., Malecka J., Kwasny W. Identification of oxidation process of TiAlN coatings versus heat resistant aerospace alloys based on diffusion couples and tool wear tests // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2020. No. 69. P. 41–44. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.024.
10. Zhang M., Cheng Y., Xin L. et al. Cyclic oxidation behaviour of Ti/TiAlN composite multilayer coatings deposited on titanium alloy // Corrosion Science. 2020. No. 166. P. 108476–108486. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108476.
11. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N. Study of cracking mechanisms in multi-layered composite nano-structured coatings // Wear. 2017. No. 378–379. P. 43–57. DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.101.
12. Xu Y.X., Riedl H., Holec D. et al. Thermal stability and oxidation resistance of sputtered Ti–Al–Cr–N hard coatings // Surface & Coatings Technology. 2017. No. 324. P. 48–56. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.053.
13. Asanuma H., Polcik P., Kolozsvari S. et al. Cerium doping of Ti–Al–N coatings for excellent thermal stability and oxidation resistance // Surface & Coatings Technology. 2017. No. 326. P. 165–172. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.037.
14. Sui X., Li G., Zhou H. et al. Evolution behavior of oxide scales of TiAlCrN coatings at high temperature // Surface & Coatings Technology. 2019. No. 360. P. 133–139. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.016.
15. Tillmann W., Grisales D., Stangier D. et al. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS // Surface & Coatings Technology. 2021. No. 406. P. 126664–126675. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
16. Pilemalm R., Sjögren A. High pressure and high temperature behaviour of TiAlN coatings deposited on c-BN based substrates // Processing and Application of Ceramics. 2020. No. 14. Vol. 3. P. 210–217. DOI: 10.2298/PAC2003210P.
17. Özkan D., Erarslan Y., Sulukan E. et al. Tribological behavior of TiAlN, AlTiN, and AlCrN coatings at boundary lubricating condition // Tribology Letters. 2018. No. 66. P. 152–167. DOI: 10.1007/s11249-018-1111-1.
18. Lin J., Zhang X., Ge F. et al. Thick CrN/AlN superlattice coatings deposited by hot filament assisted HiPIMS for solid particle erosion and high temperature wear resistance // Surface & Coatings Technology. 2019. No. 377. P. 124922–124933. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.124922.

#### References

1. Kablov E.N., Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaya N.A. Development of a pilot industrial technology for the manufacture of semi-finished products from pseudo-alpha-titanium alloy VT41. *Titan*, 2016, no. 2 (52), pp. 33–42.
2. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a  $\alpha + \beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– $\beta$ -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
3. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.

4. Alexandrov D.A., Gorlov D.S., Budinovskii S.A. Application of a complex of ion-plasma technologies to protect the compressor blades of a helicopter gas-turbine engine from erosion wear and fretting. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-71-80.
5. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for gas turbine engine compressor blades. *Russian metallurgy (Metally)*, 2017, vol. 2017, no. 6, pp. 494–504.
6. Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for GTE compressor blades. *Metally*, 2009, no. 3, pp. 3–20.
7. Yakusheva N.A. High-strength constructional steels for landing gears of perspective products of aircraft equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
8. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Vostrikov A.V., Cherkashneva N.N. High strength structural steels for gas-turbine engine shafts (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 08, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
9. Grzesik W., Malecka J., Kwasny W. Identification of oxidation process of TiAlN coatings versus heat resistant aerospace alloys based on diffusion couples and tool wear tests. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2020, no. 69, pp. 41–44. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.024.
10. Zhang M., Cheng Y., Xin L. et al. Cyclic oxidation behaviour of Ti/TiAlN composite multilayer coatings deposited on titanium alloy. *Corrosion Science*, 2020, no. 166, pp. 108476–108486. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108476.
11. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N. Study of cracking mechanisms in multi-layered composite nano-structured coatings. *Wear*, 2017, no. 378–379, pp. 43–57. DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.101.
12. Xu Y.X., Riedl H., Holec D. et al. Thermal stability and oxidation resistance of sputtered Ti–Al–Cr–N hard coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2017, no. 324, pp. 48–56. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.053.
13. Asanuma H., Polcik P., Kolozsvari S. et al. Cerium doping of Ti–Al–N coatings for excellent thermal stability and oxidation resistance. *Surface & Coatings Technology*, 2017, no. 326, pp. 165–172. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.037.
14. Sui X., Li G., Zhou H. et al. Evolution behavior of oxide scales of TiAlCrN coatings at high temperature. *Surface & Coatings Technology*, 2019, no. 360, pp. 133–139. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.016.
15. Tillmann W., Grisales D., Stangier D. et al. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS. *Surface & Coatings Technology*, 2021, no. 406, pp. 126664–126675. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
16. Pilemalm R., Sjögren A. High pressure and high temperature behaviour of TiAlN coatings deposited on c-BN based substrates. *Processing and Application of Ceramics*, 2020 no. 14, vol. 3, pp. 210–217. DOI: 10.2298/PAC2003210P.
17. Özkan D., Erarslan Y., Sulukan E. et al. Tribological behavior of TiAlN, AlTiN, and AlCrN coatings at boundary lubricating condition. *Tribology Letters*, 2018, no. 66, pp. 152–167. DOI: 10.1007/s11249-018-1111-1.
18. Lin J., Zhang X., Ge F. et al. Thick CrN/AlN superlattice coatings deposited by hot filament assisted HiPIMS for solid particle erosion and high temperature wear resistance. *Surface & Coatings Technology*, 2019, no. 377, pp. 124922–124933. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.124922.

**Информация об авторах**

**Александров Денис Александрович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Горлов Дмитрий Сергеевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Denis A. Alexandrov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Dmitry S. Gorlov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 03.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.08.2022.  
The article was submitted 03.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 09.08.2022.