

УДК 629.7.023.224

Д.А. Александров¹, С.А. Будиновский¹, Д.С. Горлов¹

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР НИТРИДОВ МЕТАЛЛОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-34-42

Рассмотрены вопросы разработки систем ионно-плазменных покрытий на основе многослойных гетерогенных структур типа $(Me_1)N/(Me_2)N$, $(Me_1-Me_2)N/(Me_3)N$, $(Me_1-Me_2-Me_3)N/(Me_4)N$, где Me : Ti, Al, Cr, Mo. Проведены испытания на жаростойкость и износостойкость, газообразивную стойкость, металлографические и металлофизические исследования. Показано, что ионно-плазменное покрытие $(Ti-Al-Cr)N/CrN$ может быть использовано для повышения жаростойкости, износостойкости (в том числе абразивной) стальных и титановых интерметаллидных деталей авиационных ГТД, работающих в диапазоне температур до 800 °С.

Ключевые слова: жаростойкость, износостойкость, ионно-плазменные покрытия, износостойкие покрытия, нитрид титана, лопатки ГТД.

D.A. Aleksandrov¹, S.A. Budinovsky¹, D.S. Gorlov¹

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL ION-PLASMA COATINGS BASED ON MULTILAYER HETEROGENEOUS STRUCTURES OF METAL NITRIDES

The article deals with the development of ion-plasma coating systems based on multilayer heterogeneous structures of the type $(Me_1)N/(Me_2)N$, $(Me_1-Me_2)N/(Me_3)N$, $(Me_1-Me_2-Me_3)N/(Me_4)N$, where Me : Ti, Al, Cr, Mo. Tests for heat resistance and wear resistance, gas-abrasive resistance, metallographic and x-ray structural studies were carried out. It is shown that the ion-plasma coating $(Ti-Al-Cr)N/CrN$ can be used to increase the heat resistance, wear resistance (including abrasive) of steel and titanium intermetallic parts of aircraft gas turbine engines operating in the temperature range up to 800 °С.

Keywords: heat resistance, wear resistance, ion-plasma coatings, wear-resistant coatings, titanium nitride, GTE blades.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время проблема жаростойкости покрытий из нитридов металлов достаточно актуальна ввиду их применения в сухих парах трения, где невозможно использовать для охлаждения смазочно-охлаждающие жидкости, либо в качестве высокотемпературных коррозионностойких/жаростойких или упрочняющих покрытий для защиты ответственных деталей газотурбинного двигателя (ГТД), изготовленных из перспективных жаростойких никелевых и титановых интерметаллидных сплавов [1–3]. Одними из самых популярных покрытий на основе нитридов металлов, имеющих высокую твердость, являются нитрид циркония и нитрид титана. Эти покрытия сохраняют свои свойства при эксплуатации до температур: 350–400 °С – для нитрида циркония и 500–550 °С – для нитрида титана. Повышение температурного предела эксплуатации покрытий из нитрида титана и нитрида циркония приводит к их окислению. Образующаяся пленка из оксидов титана или циркония не обладает высокой эрозионной стойкостью или износостойкостью. Сильное окисление данных соединений также ухудшает

класс поверхности покрытия, что только увеличивает силу трения в паре, а также в случае покрытия на лопатках компрессора ухудшает аэродинамические характеристики при прохождении воздушного потока внутри горячего тракта ГТД. В настоящее время разрабатываются новые жаропрочные интерметаллидные титановые сплавы, для которых в качестве покрытий для защиты от фреттинга и повышения жаро- и коррозионной стойкости необходимы материалы покрытий, работающие в диапазоне температур 700–800 °С [4–6]. Необходимо также обеспечить защиту вертолетных двигателей и двигателей палубной авиации от эрозионного износа для повышения эксплуатационных характеристик двигателя, таких как температурные режимы работы [7]. Максимальная температура применения в качестве износостойкого (и одновременно жаростойкого) покрытия на основе нитридов металлов может составлять до 800 °С, что соответствует температуре в зоне контакта режущего инструмента и детали [8], а также в сухих парах трения перспективных ГТД, в том числе на лепестковых подшипниках в контакте с валами из конструкционных сталей [9].

Одним из решений данной проблемы является разработка функциональных ионно-плазменных покрытий на основе многослойных гетерогенных структур нитридов металлов, имеющих слоистую конструкцию типа $(Me_1)N/(Me_2)N$, $(Me_1-Me_2)N/(Me_3)N$, $(Me_1-Me_2-Me_3)N/(Me_4)N$, где в качестве Me могут быть использованы Ti, Al, Cr, Mo и другие элементы, повышающие жаростойкость системы. Данные покрытия должны иметь толщину слоев, близкую к наноразмерной, так как это улучшает износо- и абразивостойкость покрытия в отличие от многослойных структур с толщиной слоев >1 мкм [10]. Нанослойные системы покрытий также имеют повышенную сопротивляемость трещинообразованию из-за наличия большого количества границ между слоями, что останавливает рост трещин [11].

Легирование мононитридов металлов элементами типа Al и Cr повышает их жаростойкость благодаря образованию высокотемпературных упрочняющих фаз $(Ti_2Al)N$ и $(Ti_2Cr)N$ [12–13].

При использовании покрытия $(Ti, Al)N$ в режущем инструменте с высоким содержанием алюминия в зоне контакта резца и детали происходит встречная диффузия алюминия и кислорода с образованием оксида алюминия, что препятствует окислению пары трения [14, 15]. Данный механизм приведен на рис. 1.

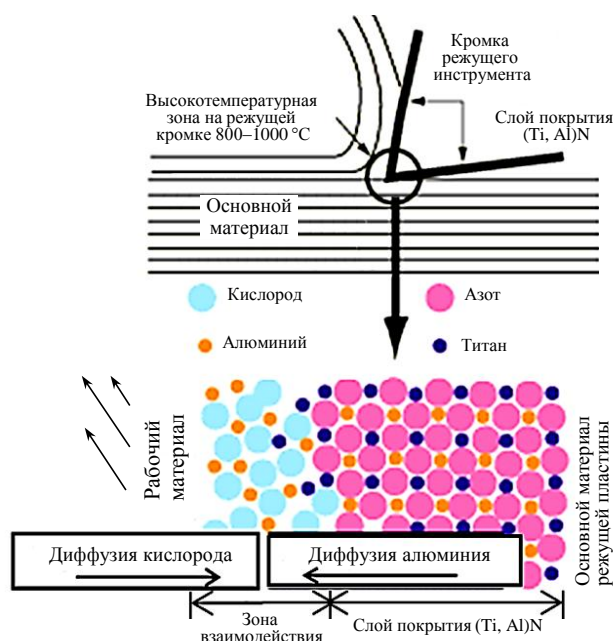


Рис. 1. Взаимодействие в паре трения «резец–обрабатываемый материал»

Например, нитриды хрома и алюминия (CrN и AlN) имеют достаточно высокую жаростойкость, но при этом недостаточную твердость, что исключает их использование в качестве износостойкого и эрозионностойкого покрытия по отдельности, однако использование таких соединений в бездефектных магнетронных покрытиях CrN/AlN типа сверхструктур может повысить их эрозионную стойкость [16]. Вместе с тем при использовании стандартного вакуумно-дугового распыления (несмотря на некоторое количество капельной фазы) соединения CrN и AlN, находясь в многослойной системе с нитридом титана, который имеет высокую твердость и стойкость к газообразивному износу, способны увеличить температурный диапазон эксплуатации композиции покрытия в качестве эрозионно- или износостойкого [17, 18]. В данной работе изучены некоторые свойства ионно-плазменных многослойных гетерогенных покрытий, состоящих из нитридов титана, хрома и алюминия, а также сложных нитридов, легированных алюминием и молибденом.

Материалы и методы

Нанесение ионно-плазменных покрытий на основе нитридов металлов проводили на образцы из жаропрочной нержавеющей стали с использованием составных катодов на основе титана, алюминия и хрома на ионно-плазменной установке МАП-3 с компьютерной системой управления технологическим процессом. Процесс проводили с подачей отрицательного потенциала на образцы в атмосфере реактивного газа азота с ассистированным осаждением ионами аргона при помощи ионного ускорителя. Испытания на жаростойкость проводили по ГОСТ6130–71 в атмосферной печи при температуре 800 °С в течение 100 ч, испытания на износостойкость – по ASTM G99-05 с использованием трибометра UMT-3 фирмы CETR по методу испытаний «шар по диску».

Условия испытаний: температура 800 °С, нагрузка на образец 3 Н, скорость вращения диска 0,1 м/с, путь трения 360 м. В качестве контртела использовали шарик из карбида вольфрама, который является твердым и высокотемпературным материалом, что позволяет провести сравнительную оценку износостойкости покрытий. Для оценки работы покрытий непосредственно в паре трения диск и контртело необходимо подбирать из соответствующих материалов.

Стойкость к газообразивному износу определяли на лабораторном стенде при угле воздействия пылевоздушного потока 70 градусов, в качестве абразива использовали кварцевый песок. Испытания проводили в течение трех циклов при давлении воздуха 3 ат (0,3 МПа), за цикл использовали 0,4 кг абразива.

Металлографические исследования проведены на растровом электронном микроскопе Verios 460 XHR в режиме COMPO, изображение в котором формируется обратнотраженными электронами. Контраст изображения определяется средним атомным номером фазы – чем больше средний атомный номер исследуемой области (фазы), тем светлее данный участок выглядит на фотографии. При исследовании фазового состава покрытий применяли дифрактометр Empyrean с использованием метода рентгеновской дифракции в монокроматическом $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении при длине волны 0,15418 нм в диапазоне углов $2\theta = 20\text{--}100$ градусов с шагом $\Delta 2\theta = 0,05$ градуса и выдержкой 2 с. В табл. 1 приведены варианты нанесенных многослойных гетерогенных покрытий в сравнении с однослойной конструкцией покрытия.

Таблица 1

Составы нанесенных покрытий

Условный номер покрытия	Материал покрытия	Конструкция покрытия	Содержание алюминия, % (по массе)
1	TiN/CrN	(Me ₁)N/(Me ₂)N	–
2	(Ti–Al–Cr)N	(Me ₁ –Me ₂ –Me ₃)N	20–30 (в системе Ti–Al–Cr)
3	(Ti–Al–Mo)N/CrN	(Me ₁ –Me ₂ –Me ₃)N/(Me ₄)N	3–6 (в системе Ti–Al–Mo)
4	(Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN	(Me ₁ –Me ₂ –Me ₃)N/ (Me ₁)N/(Me ₃)N	20–30 (в системе Ti–Al–Cr)
5	(Ti–Al–Cr)N/CrN	(Me ₁ –Me ₂ –Me ₃)N/(Me ₄)N	То же

Результаты и обсуждение

Проведены испытания полученных покрытий на изотермическую жаростойкость при температуре 800 °С, результаты испытаний приведены на рис. 2 и в табл. 2.

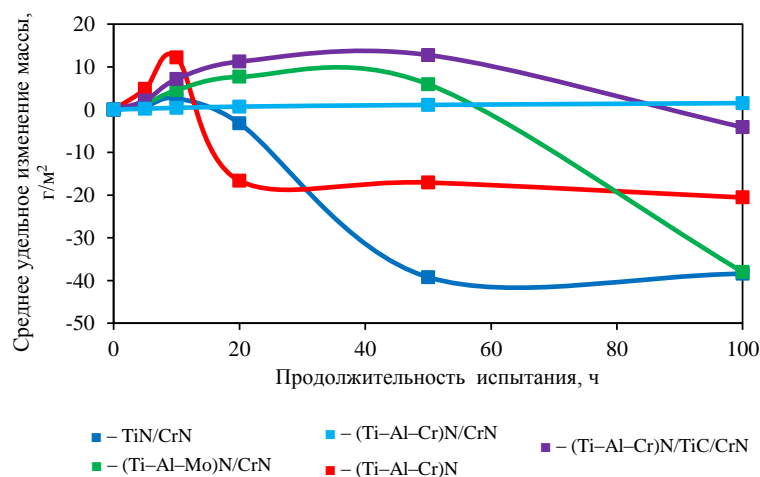


Рис. 2. Зависимости среднего удельного изменения массы от продолжительности испытания на жаростойкость при температуре 800 °С

Таблица 2

Результаты испытаний на жаростойкость ионно-плазменных покрытий при температуре 800 °С в течение 100 ч

Условный номер покрытия	Материал покрытия	Среднее удельное изменение массы образцов, г/м ² , при продолжительности испытания, ч				
		5	10	20	50	100
1	TiN/CrN	0,82	2,65	-3,2	-39,2	-38,4
2	(Ti–Al–Mo)N/CrN	1,37	4,58	7,69	5,95	-38,0
3	(Ti–Al–Cr)N	4,85	12,23	-16,62	-17,06	-20,55
4	(Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN	2,15	7,14	11,25	12,80	-4,11
5	(Ti–Al–Cr)N/CrN	0,24	0,42	0,72	1,12	1,54

В результате испытаний на жаростойкость:

– покрытия TiN/CrN и (Ti–Al–Mo)N/CrN показали самые высокие потери массы (соответственно: -38,4 и -38,0 г/м²), что свидетельствует о том, что слоистая структура данных покрытий хотя и имеет в составе жаростойкие слои CrN, однако наличие слоев

мононитрида титана на основе титанового сплава типа ВТ1-0 (титана >99 % (по массе)) или ВТ6 (6 % (по массе) Al, 4 % (по массе) Mo, Ti – остальное) сильно снижает жаростойкость композиции;

– покрытие (Ti–Al–Cr)N также показало значительные потери массы при испытаниях ($-20,55 \text{ г/м}^2$), так как, несмотря на высокое содержания алюминия (до 25 % (по массе)) с добавлением хрома, монослойная структура ионно-плазменного покрытия проявляет недостаточное сопротивление диффузионным процессам, что способствует окислению;

– покрытия (Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN и (Ti–Al–Cr)N/CrN показали приемлемый результат по жаростойкости для подобной температуры испытаний (соответственно: $-4,11$ и $1,54 \text{ г/м}^2$), однако следует отметить, что снижение удельного изменения массы покрытия (Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN во многом связано с наличием внутри него слоев чистого TiN, которые подверглись окислению и ухудшили состояние всего покрытия.

Для оценки функциональных свойств ионно-плазменных покрытий на основе нитридов металлов проведены испытания на износостойкость при температуре 800 °С. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний на износостойкость ионно-плазменных покрытий при температуре испытания 800 °С

Условный номер покрытия	Материал покрытия	Средний линейный износ (по 5 измерениям профилометра), мкм, по дорожкам			Среднее значение
		1	2	3	
1	TiN/CrN	2,4	3,2	2,6	2,7
2	(Ti–Al–Mo)N/CrN	2,1	2,5	2,2	2,3
3	(Ti–Al–Cr)N	8,3	6,9	7,3	7,5
4	(Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN	2,8	2,5	2,9	2,7
5	(Ti–Al–Cr)N/CrN	4,0	3,5	4,0	3,8

Результаты испытаний показывают, что средний линейный износ всех покрытий составил от 2,3 до 3,8 мкм. Лучшим по износостойкости является покрытие (Ti–Al–Mo)N/CrN. Покрытие (Ti–Al–Cr)N/CrN, показавшее лучший результат по жаростойкости, имеет удовлетворительный линейный износ (3,8 мкм).

Проведены испытания на стойкость к газообразивному износу исследуемых покрытий при температуре 20 °С, результаты испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний на стойкость к газообразивному износу образцов из нержавеющей стали с ионно-плазменными покрытиями на основе нитридов металлов

Условный номер покрытия	Материал покрытия	Относительный эрозионный износ/относительная эрозионная стойкость* при угле потока 70 градусов	Примечание
1	TiN/CrN	0,03/33	Покрытие выдержало 3 цикла испытаний
2	(Ti–Al–Mo)N/CrN	0,07/14	То же
3	(Ti–Al–Cr)N	2,61/0,38	Покрытие разрушилось после 1 цикла испытаний
4	(Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN	0,22/4,54	Покрытие выдержало 3 цикла испытаний
5	(Ti–Al–Cr)N/CrN	0,48/2,08	То же

* Износ основы принимается за единицу.

Результаты испытаний на стойкость к газоабразивному износу показали, что наиболее стойким к пылевоздушному износу является покрытие TiN/CrN, многократно повышающее абразивостойкость (более чем в 33 раза). Остальные покрытия показали увеличение газоабразивной стойкости основы от 2 до 14 раз. Покрытие (Ti–Al–Cr)N разрушилось после 1 цикла испытаний.

Проведены микроструктурные исследования ионно-плазменных нитридных покрытий методом растровой электронной микроскопии. Микроструктуры покрытий приведены на рис. 3.

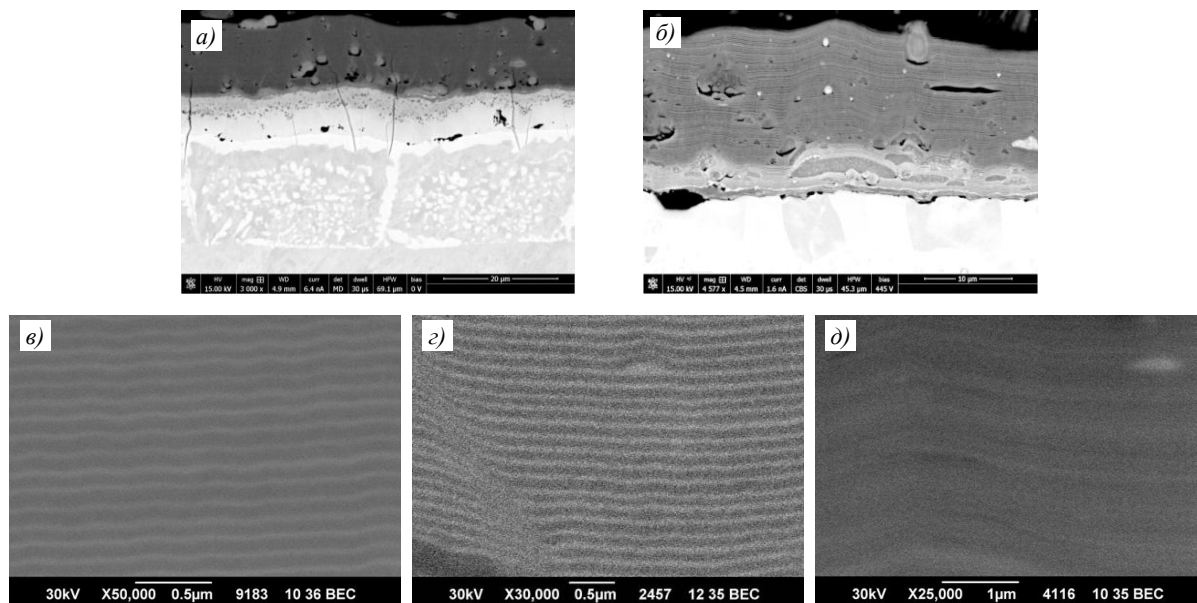


Рис. 3. Микроструктуры покрытий (Ti–Al–Cr)N (*a* – $\times 3000$), (Ti–Al–Cr)N/CrN (*b* – $\times 4577$), TiN/CrN (*c* – $\times 50000$), (Ti–Al–Mo)N/CrN (*z* – $\times 30000$) и (Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN (*d* – $\times 25000$)

У покрытий TiN/CrN, (Ti–Al–Mo)N/CrN, (Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN и (Ti–Al–Cr)N/CrN установлена слоистая многослойная структура, покрытие (Ti–Al–Cr)N является моно-слоиным. Толщина нанесенных покрытий составляет от 15 до 20 мкм. Толщина слоев в многослойных покрытиях варьируется от 15 до 70 нм.

По результатам исследования микроструктур установлено, что:

- на микроструктуре с покрытием (Ti–Al–Cr)N наблюдается зона взаимодействия под покрытием, имеющая трещины, переходящие в покрытие; наличие трещин свидетельствует о присутствии хрупких фаз в зоне под покрытием;
- на всех микроструктурах наблюдается капельная фаза, что является спецификой ионно-плазменного вакуумно-дугового метода нанесения и может влиять на свойства покрытия, но при этом метод обеспечивает высокую скорость нанесения;
- на микроструктурах с многослойными покрытиями TiN/CrN, (Ti–Al–Mo)N/CrN, (Ti–Al–Cr)N/TiN/CrN и (Ti–Al–Cr)N/CrN трещин не наблюдается, так как многослойная структура является естественным препятствием для процесса трещинообразования; вместе с тем обеспечивается снижение диффузионной подвижности Al или Cr в покрытии, что препятствует образованию хрупких фаз в зоне взаимодействия.

Проведены исследования покрытий методом рентгеновской дифрактометрии в исходном состоянии и после испытаний на жаростойкость при температуре 800 °C:

- основные фазы покрытий TiN/CrN, (Ti–Al–Mo)N/CrN в исходном состоянии – фазы TiN и CrN с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой; обнаружены следы

тетрагональной фазы Ti_2N . После испытаний на жаростойкость присутствуют фазы TiO_2 (рутил), $Cr(Fe)_2O_3$ и Cr_2TiO_4 , а также присутствует фаза Fe_2O_3 . Наличие оксидов титана, хрома и железа в образцах после испытаний свидетельствует о сильном окислении покрытия и основы, что подтверждается результатами испытаний на жаростойкость;

– основные фазы покрытия $(Ti-Al-Cr)N$ в исходном состоянии – TiN с ГЦК-решеткой, гексагональная фаза AlN и фаза Al_3Ti ; после испытаний на жаростойкость присутствуют основной оксид – TiO_2 (рутил) и гексагональная фаза AlN ;

– основные фазы покрытий $(Ti-Al-Cr)N/TiN/CrN$ и $(Ti-Al-Cr)N/CrN$ в исходном состоянии – фазы с ГЦК-решеткой TiN и CrN , гексагональная фаза AlN , а также фаза Al_3Ti ; после испытаний на жаростойкость – основной оксид TiO_2 (рутил) и следы фазы Cr_2O_3 . Наличие гексагональной фазы AlN в системах покрытий $(Ti-Al-Cr)N$, $(Ti-Al-Cr)N/TiN/CrN$ и $(Ti-Al-Cr)N/CrN$ является причиной снижения износостойкости и эрозионной стойкости.

Результаты рентгеноструктурных исследований покрытий показывают, что все представленные варианты покрытий при температуре испытания $800\text{ }^\circ\text{C}$ окисляются, поскольку на образцах после испытаний обнаруживаются оксиды титана (TiO_2 – рутил) и хрома (Cr_2O_3). Выводы о степени перехода исходных фаз в оксиды можно делать по результатам изменения массы при испытаниях на жаростойкость. Например, в образцах с покрытиями TiN/CrN и $(Ti-Al-Mo)N/CrN$ помимо основных оксидов компонентов покрытия обнаружен оксид железа Fe_2O_3 и шпинель $Cr(Fe)_2O_3$, что свидетельствует о проникновении кислорода под покрытие с окислением основы. По научно-техническим литературным данным в сложных нитридах $(Ti-Al-Cr)N$ обнаруживается оксидная фаза Al_2O_3 [8], которая препятствует проникновению кислорода, что в сочетании с нанослойной гетерогенной структурой обеспечивает термостабильность покрытию.

Результаты испытаний покрытия $(Ti-Al-Cr)N/CrN$ на изотермическую жаростойкость (табл. 2) свидетельствуют, что для повышения термостабильности нитридных покрытий ($>700\text{ }^\circ\text{C}$) необходим комплексный подход, включающий как наличие слоистой структуры для снижения скорости диффузии кислорода, так и присутствие в составе жаростойких нитридов типа CrN либо сложных нитридов титана с высоким содержанием алюминия или хрома. Высокое содержание алюминия в слоях $(Ti-Al-Cr)N$ повышает термостабильность всего покрытия за счет его диффузии из междоузлий атомной решетки на поверхность с формированием оксида алюминия, который препятствует дальнейшему окислению всего покрытия.

Однако во время испытания на износостойкость, ввиду его небольшой продолжительности (а следовательно, и выдержки при температуре), покрытия не успевают разупрочниться за счет окисления, поэтому более износостойкими покрытиями будут покрытия TiN/CrN , $(Ti-Al-Mo)N/CrN$ и $(Ti-Al-Cr)N/TiN/CrN$, имеющие более высокую твердость [4]. Для последнего из вышеперечисленных покрытий наличие слоев TiN привело к ухудшению жаростойкости покрытия при испытаниях при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$, а на износостойкость – улучшило результат по сравнению с лучшим по жаростойкости покрытием $(Ti-Al-Cr)N/CrN$.

При испытаниях на стойкость к газоабразивному износу (табл. 4) выявлена следующая закономерность: покрытия со слоями $(Ti-Al-Cr)N$, содержащие до 30 % (по массе) алюминия, имеют более низкую эрозионную стойкость, что, возможно, связано со снижением микротвердости (или когезионной прочности покрытия). Однако покрытие $(Ti-Al-Mo)N/CrN$ показало второй результат по газоабразивному износу, что связано с небольшим содержанием алюминия в системе $(Ti-Al-Mo)N$ – около 6 % (по массе). В целом закономерность аналогична закономерности при испытании на стойкость к контактному износу, где более высокий результат показывает более твердое покрытие.

Заключения

Установлено, что многослойное гетероструктурное покрытие (Ti–Al–Cr)N/CrN, нанесенное вакуумно-дуговым способом на ионно-плазменной установке МАП-3, имеет высокую жаростойкость при температуре 800 °С и удовлетворительную износостойкость, что позволит использовать его в качестве антиокислительного и износостойкого покрытия для лопаток ГТД, изготовленных из перспективных интерметаллидных титановых сплавов.

Конструкция многослойного гетерогенного ионно-плазменного покрытия на основе нитридов металлов типа (Me₁–Me₂–Me₃)N/(Me₄)N может быть использована для повышения жаростойкости, коррозионной стойкости и износостойкости (в том числе абразивной) деталей авиационных ГТД, работающих в диапазоне температур до 800 °С, из стали, титановых и интерметаллидных сплавов.

Установлено, что по износостойкости и газоабразивной стойкости лучшие показатели у покрытий TiN/CrN и (Ti–Al–Mo)N/CrN, которые не содержат алюминий или имеют его в составе не более 6 % (по массе) по сравнению с покрытиями, содержащими слой (Ti–Al–Cr)N с повышенным содержанием алюминия.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо-альфа-титанового сплава BT41 // Титан. 2016. № 2 (52). С. 33–42.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А., Нарский А.Р. Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов // Вопросы материаловедения. 2020. № 4 (104). С. 64–78.
4. Александров Д.А. Исследование износостойких покрытий на основе многокомпонентных нитридов титана // Труды ВИАМ. 2020. № 4–5 (88). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-62-69.
5. Горлов Д.С., Заклякова О.В., Александров Д.А., Будиновский С.А. Повышение фреттингостойкости интерметаллидного сплава Ti₂AlNb // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-62-70.
6. 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. URL: <http://www.elsevier.com/locate/corsci> (дата обращения: 10.06.2021). DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108476.
7. 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: 10.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-71-80.
8. 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.
9. Громов В.И., Якушева Н.А., Востриков А.В., Черкашнева 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: 29.03.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
10. Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора ГТД // Металлы. 2009. № 3. С. 3–20.

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. URL: <http://www.elsevier.com/locate/wear> (дата обращения: 10.06.2021). 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. URL: <http://www.elsevier.com/locate/surfcoat> (дата обращения: 10.06.2021). 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. URL: <http://www.elsevier.com/locate/surfcoat> (дата обращения: 10.06.2021). 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. URL: <http://www.elsevier.com/locate/surfcoat> (дата обращения: 10.06.2021). 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. URL: <http://www.elsevier.com/locate/surfcoat> (дата обращения: 10.06.2021). 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. Vol. 3. No. 14. 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. URL: <http://www.elsevier.com/locate/surfcoat> (дата обращения: 10.06.2021). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.124922.