

УДК 669.017.165:669.295

Д.С. Горлов<sup>1</sup>, О.В. Заклякова<sup>1</sup>, Д.А. Александров<sup>1</sup>, С.А. Будиновский<sup>1</sup>

## ПОВЫШЕНИЕ ФРЕТТИНГОСТОЙКОСТИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА Ti<sub>2</sub>AlNb

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-62-70

*Представлены результаты исследований по повышению фреттингостойкости титанового сплава из орторомбического алюминид титана Ti<sub>2</sub>AlNb путем формирования на поверхности покрытия, состоящего из барьерного и внешнего слоев, с использованием промышленной вакуумно-дуговой установки МАП-3. Установлены зависимости общего износа и коэффициента трения образцов из сплава Ti<sub>2</sub>AlNb с покрытием и без него в паре с контртелом из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава при испытаниях на фреттингоповреждаемость в условиях комнатной (20 °С) и повышенной (700 °С) температур. Показана кинетика насыщения кислородом поверхности образцов из сплава Ti<sub>2</sub>AlNb с покрытием и без него при рабочей температуре сплава на базе 200 ч. Исследованы фазовый и элементный составы фреттингостойкого покрытия после высокотемпературной выдержки.*

**Ключевые слова:** орторомбический алюминид титана Ti<sub>2</sub>AlNb, дисперснотвердеющий сплав, ионно-плазменное покрытие, фреттингостойкость, фреттингоповреждаемость, жаростойкость, фазовый состав, элементный состав.

D.S. Gorlov<sup>1</sup>, O.V. Zaklyakova<sup>1</sup>, D.A. Aleksandrov<sup>1</sup>, S.A. Budinovskii<sup>1</sup>

## IMPROVING OF FRETTING RESISTANCE INTERMETALLIC Ti<sub>2</sub>AlNb ALLOY

*The results of research on improving the fretting resistance of a titanium alloy made of orthorhombic titanium aluminide Ti<sub>2</sub>AlNb by forming a coating consisting of a barrier and an outer layer on the surface using an industrial vacuum-arc installation MAP-3 are presented. The dependences of the total wear and the coefficient of friction of samples made of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy with and without coating in combination with a counterbody made of high-strength welded dispersed-hardening alloy during fretting damage tests at room (20 °C) and elevated (700 °C) temperatures are established. The kinetics of oxygen saturation of the surface of samples made of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy with and without coating at the operating temperature of the alloy based on 200 h is shown. The phase and elemental compositions of the fretting-resistant coating after high-temperature exposure are investigated.*

**Keywords:** orthorhombic titanium aluminide Ti<sub>2</sub>AlNb, dispersion-hardening alloy, ion-plasma coating, fretting resistance, fretting damage, heat resistance, phase composition, element composition.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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 фреттинг – одна из проблем при эксплуатации лопаток современных газотурбинных двигателей (ГТД). Контактный износ замковых соединений лопаток может привести к их разрушению. Существуют разные конструктивные

и технологические методы защиты замковых соединений от фреттинга [1], среди которых одним из распространенных является нанесение специального покрытия, снижающего контактный износ поверхностей замкового соединения. Фреттингостойкое покрытие должно выдерживать сдвиговые нагрузки без формирования продуктов износа и обеспечивать защиту от насыщения кислородом. В настоящее время на двигателестроительных предприятиях применяются покрытия на основе серебра, формируемые с использованием технологии гальваники и используемые для увеличения ресурса замков вентиляторных лопаток ГТД, а также твердосмазочные покрытия типа ВАП на основе эпоксидной смолы для снижения износа замков лопаток компрессора [2]. Данные покрытия показали свою эффективность для повышения долговечности замков лопаток компрессора в условиях фреттинга в 1,5–2 раза.

Применяются также гальванические покрытия на основе никеля и кадмия. Оценить эффективность использования фреттингостойких покрытий при эксплуатации лопаток можно по отсутствию следов износа в посадочном гнезде диска и минимальному износу самого покрытия. Система такого покрытия должна обеспечить снижение локального трения и защищать материал от проникновения кислорода и фреттинг-коррозии. Нашедшие широкое применение фреттингостойкие покрытия работают при температуре, не превышающей 250–300 °С [3].

Современным и перспективным способом защиты и упрочнения поверхности является применение ионно-плазменных технологий [4], получивших широкое распространение в авиационной отрасли для увеличения ресурса работы лопаток газовых турбин и других особо ответственных деталей ГТД из жаропрочных сталей, никелевых и титановых сплавов, работающих в условиях агрессивной окислительной или коррозионной атмосферы при высоких давлениях и температурах в диапазоне от 350 до 1150 °С [5–8]. Во ФГУП «ВИАМ» разработана и отработана вакуумно-плазменная технология высоких энергий, реализованная на машинах серии МАП, которая успешно внедрена на отечественных и зарубежных предприятиях [9, 10].

Наиболее перспективной группой сплавов для изготовления лопаток и других ответственных деталей авиационных ГТД типа «блиск» и «блинг» с рабочими температурами от 650 до 700 °С являются деформируемые сплавы из орторомбического алюминид титана  $Ti_2AlNb$ , который отличается высоким показателем прочности и более низкой, по сравнению со сталями и железоникелевыми сплавами, плотностью [11, 12]. Специалистами ВИАМ разработаны соответствующие орто-сплавы [13]. Окисление деталей из титанового сплава при температуре 700 °С и более приведет к усугублению процессов фреттинга за счет деградации поверхности и формирования альфированного слоя. Следовательно, фреттингостойкое покрытие должно защищать титановый сплав от проникновения кислорода. Одним из вариантов такой защиты может быть создание конструкции покрытия, состоящей из верхнего жаростойкого слоя и барьерного подслоя на основе твердых соединений (нитридов, оксидов или карбидов) [14, 15]. Барьерный слой создает дополнительную защиту от окисления, а также препятствует диффузии компонентов покрытия (например, никеля и хрома) в титановый сплав, которые могут создать в зоне взаимодействия охрупчивающие фазы.

Цель данной работы – демонстрация достигнутых результатов исследований по повышению фреттингостойкости титанового деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  путем формирования на поверхности покрытия, состоящего из барьерного и внешнего слоев, с использованием промышленной вакуумно-плазменной установки МАП-3 [16].

Исследование выполнено в рамках реализации научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие

и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионные и коррозионно-стойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [17].

### Материалы и методы

Слоистое покрытие для увеличения ресурса работы замков лопаток компрессора и защиты от фреттинг-коррозии сформировано на установке МАП-3 с использованием системы управления с автоматизированным контролем всех технологических параметров нанесения. Данная система позволяет создавать различные конструкции покрытий с возможностью варьирования толщины и твердости слоев (при помощи регуляции подачи реактивного газа), сохраняя при этом почти 99%-ю воспроизводимость по заданным свойствам.

На образцы из титанового деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  наносили многослойное фреттингостойкое покрытие. Барьерный слой состоит из многослойного нитрида титана, который создает барьер для диффузии материалов покрытия вглубь основного металла, а именно сплава  $Ti_2AlNb$ . Внешний слой фреттингостойкого покрытия предохраняет поверхность из сплава  $Ti_2AlNb$  от фреттингоповреждаемости, представляя собой жаро- и износостойкую матрицу с нитридным упрочнением из никелевого сплава типа нихром.

Испытания на фреттингоповреждаемость проводили на специально подготовленных образцах в виде пластин размером  $25 \times 43 \times 10$  мм из сплава  $Ti_2AlNb$  с нанесенным фреттингостойким покрытием и без него. В качестве контртела использовали образцы из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава ВЖ172 в виде пальца с окончанием у основания в форме полусферы и радиусом 1,5 мм.

Выбраны следующие режимы испытания: перемещение образца 300 мкм, температурные условия 20 и 700 °С, давление 3 Н, частотная характеристика перемещения 13 Гц, продолжительность испытания  $10^5$  циклов, или 128 мин.

Испытания на стойкость к насыщению кислородом поверхностного слоя образцов из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  с фреттингостойким покрытием при температуре 700 °С на базе 200 ч относительно сплава без покрытия осуществляли в муфельной атмосферной печи LE 14/11 фирмы Nabertherm согласно ГОСТ 6130–71. В качестве стандартных образцов использовали круги диаметром 15 мм и толщиной 3,5 мм из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$ .

Анализ фреттингоповреждаемости по внешнему виду морфологии мест контактов образцов и контртел проводили с использованием инвертируемого оптического микроскопа Olympus GX 51 с системой анализа изображения при увеличении  $\times 200$ .

Рентгенструктурный анализ фреттингостойкого покрытия на образцах из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  в двух состояниях (после нанесения и после проведения испытаний на жаростойкость в условиях повышенной температуры (700 °С) на базе 200 ч) выполняли с применением дифрактометра Empyrean в монокроматическом  $Cu K_\alpha$ -излучении ( $\lambda=0,15418$  нм) в диапазоне углов  $2\theta=20-120$  градусов с шагом  $\Delta 2\theta=0,016$  градуса и выдержкой 50 с. Расшифровку дифрактограмм проводили с использованием специализированной программы HighScore и базы данных PDF-2.

Локальный элементный анализ образцов из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  с фреттингостойким покрытием в исходном состоянии после нанесения и после проведения испытаний на жаростойкость в условиях повышенной температуры (700 °С) на базе 200 ч осуществляли с использованием микроскопа JSM-6490 LV фирмы Jeol (Япония) с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа INCA x-sight в соответствии

с ГОСТ Р ИСО 22309–2015. Контраст изображения структуры в отраженных электро-нах определяется средним атомным номером фазы: чем выше атомный номер, тем светлее данный участок. Анализ и обработку данных выполняли с применением программного обеспечения AZtec 2.3.

### Результаты и обсуждение

Исследования, проведенные в лаборатории ФГУП «ВИАМ», продемонстрировали эффективность использования слоистого фреттингостойкого покрытия для защиты образцов из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  от изнашивания при фреттинге и для повышения стойкости поверхности к высокотемпературному окислению при рабочем режиме эксплуатации. Предложена конструкция фреттингостойкого покрытия, включающая промежуточный и внешний слои, получаемые вакуумно-плазменным методом нанесения.

Для определения фреттингоповреждаемости деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  с ионно-плазменным слоистым покрытием и без него в паре с контртелом из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава ВЖ172 проведены трибологические испытания и установлено влияние покрытия на общий износ и коэффициент трения.

Результаты влияния покрытия на общий износ образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с ионно-плазменным покрытием и без него в паре с контртелом из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава при испытаниях на фреттингоповреждаемость представлены на рис. 1, а.

Установлено, что общий износ образцов из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  с фреттингостойким покрытием в паре с контртелом из сплава ВЖ172 после испытаний на фреттингоповреждаемость снижается, по сравнению с образцами без покрытия, и составляет 10 мкм при температуре 20 °С и 30 мкм при температуре 700 °С, а общий износ образцов из сплава  $Ti_2AlNb$  без покрытия соответственно 30 и 40 мкм.

Результаты зависимости коэффициента трения образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с ионно-плазменным покрытием и без него в паре с контртелом из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава ВЖ172 при испытаниях на фреттингоповреждаемость представлены на рис. 1, б.

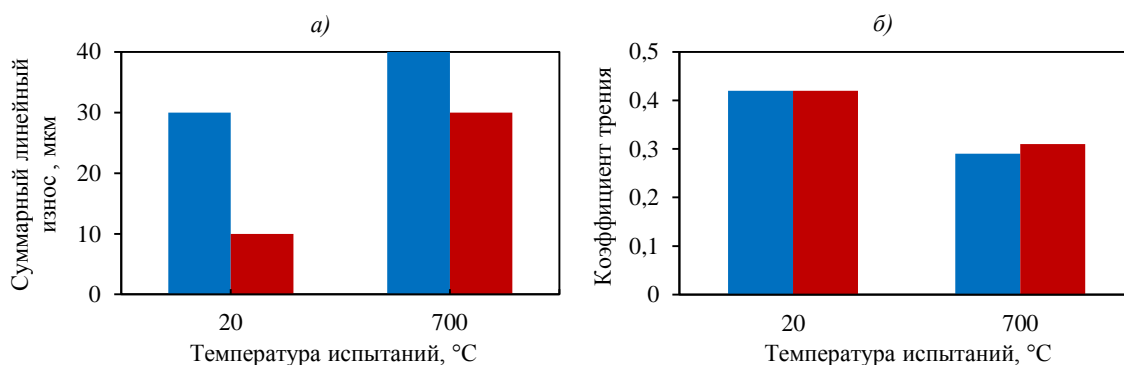


Рис. 1. Результаты влияния покрытия на общий износ (а) и коэффициент трения (б) образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с ионно-плазменным покрытием (■) и без него (■) в паре с контртелом из высокопрочного свариваемого дисперсионно-твердеющего сплава при испытаниях на фреттингоповреждаемость

Установлено, что коэффициент трения образцов из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием и без него в паре с контртелом из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава после испытаний на фреттингоповреждаемость составил 0,42 при температуре 20 °С, а при температуре 700 °С: 0,29 для сплава без покрытия и 0,31 – с покрытием.

Внешний вид морфологии мест контактов образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием и без него в паре с контртелом из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава после испытаний на фреттингповреждаемость при температурах 20 и 700 °С представлен на рис. 2.

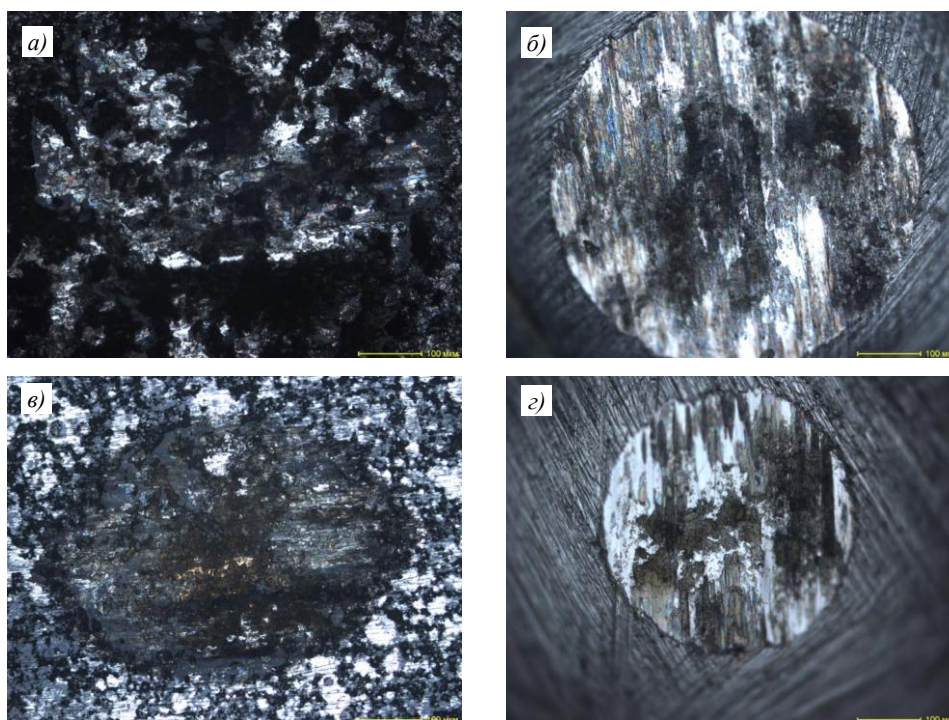


Рис. 2. Внешний вид морфологии мест контактов образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием (в) и без него (а) в паре с контртелом (б, д) из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава после испытаний на фреттингповреждаемость при температурах 20 (а, б) и 700 °С (в, д)

Анализ морфологии мест контакта образца из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  с фреттингостойким покрытием и без него, а также в паре с контртелом из высокопрочного свариваемого дисперснотвердеющего сплава показывает, что пятно контакта от взаимодействия на образце с покрытием и контртеле после испытаний на фреттингповреждаемость значительно меньше, что подтверждает полученные данные после испытаний. Для определения стойкости системы «сплав–покрытие» к воздействию высокотемпературного окисления осуществлены испытания на жаростойкость образцов из деформируемого сплава  $Ti_2AlNb$  с фреттингостойким покрытием и без него при температуре 700 °С на базе 200 ч.

График зависимости удельного изменения массы образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием и без него при испытаниях на жаростойкость при температуре 700 °С на базе 200 ч от продолжительности испытания приведен на рис. 3.

Установлено, что покрытие защищает деформируемый сплав  $Ti_2AlNb$  от высокотемпературного окисления. Изменение массы образцов из деформируемого сплава с покрытием после испытаний на жаростойкость при температуре 700 °С на базе 200 ч составило 3,78 г/м<sup>2</sup>, а без покрытия 6,22 г/м<sup>2</sup>.

Проведен рентгеноструктурный анализ образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием в исходном состоянии после нанесения и после испытаний на жаростойкость при температуре 700 °С на базе 200 ч. Дифрактограммы и штрих-рентгенограммы таких образцов представлены на рис. 4.

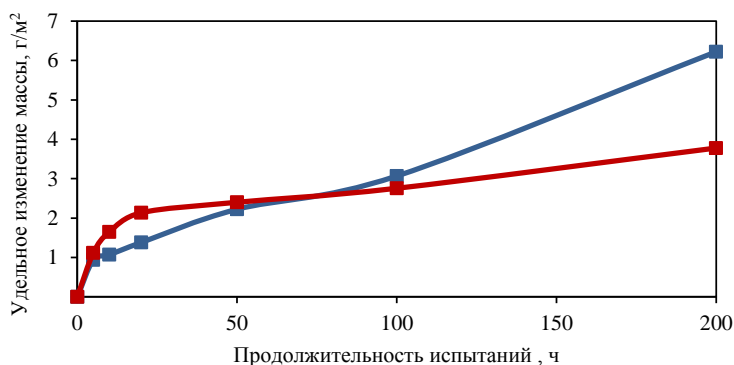


Рис. 3. Зависимость удельного изменения массы образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием (■) и без него (■) при испытаниях на жаростойкость при температуре 700 °С на базе 200 ч от продолжительности испытания

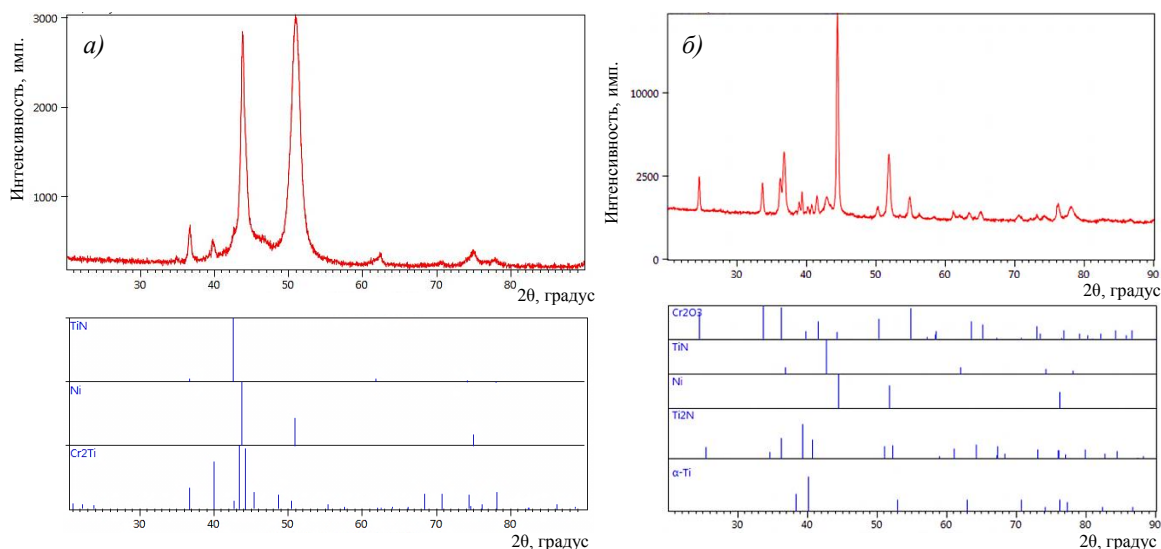


Рис. 4. Дифрактограмма и штрих-рентгенограмма образца интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием в исходном состоянии после нанесения (а) и после проведения испытаний на жаростойкость (б) при температуре 700 °С на базе 200 ч

Показано, что в поверхностном слое образца интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием в исходном состоянии определены следующие фазы: твердый раствор на основе никеля (основа), нитрид титана и, вероятно, твердый раствор на основе фазы  $Cr_2Ti$ .

Кроме того, установлено, что в подповерхностном слое образца после выполненных испытаний на определение жаростойкости выявлены следующие фазы: твердый раствор на основе никеля (основа), оксид хрома III, а также нитриды титана и элементы титана. В процессе высокотемпературного выдерживания происходит образование оксида хрома, защитная пленка которого препятствует дальнейшему окислению образца, что подтверждается значениями удельных привесов по результатам испытаний на жаростойкость.

Для определения теплозащитного эффекта ионно-плазменного покрытия исследован местный элементный состав покрытия на деформируемом сплаве  $Ti_2AlNb$  в исходном состоянии и после выполнения испытаний на жаростойкость при температуре 700 °С на базе 200 ч. Изображение микроструктуры интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием в исходном состоянии после нанесения и после проведения испытаний на жаростойкость, полученное в режиме отраженных электронов, представлено на рис. 5, а элементный состав образцов – в табл. 1 и 2.

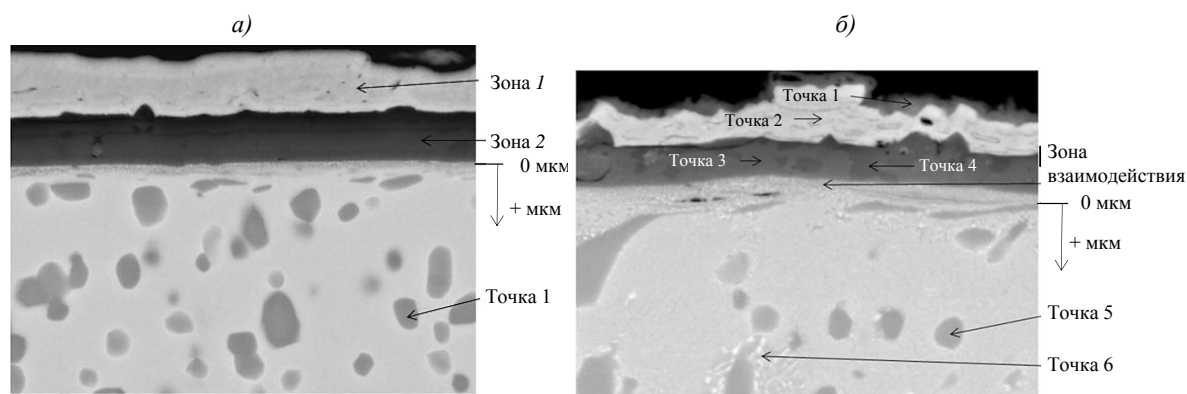


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 10000$ ) интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием в исходном состоянии после нанесения (а) и после проведения испытаний на жаростойкость (б) при температуре  $700\text{ }^\circ\text{C}$  на базе 200 ч

Таблица 1

**Локальный элементный состав образца интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием в исходном состоянии после нанесения**

Место анализа	Содержание элементов, % (по массе)								
	N	Al	Ti	Cr	Ni	Zr	Nb	Ta	W
Зона 1	0,7	Н/о*	7,1	23,2	69,0	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о
Зона 2	11,9	0,6	85,0	0,4	0,7	Н/о	1,6	Н/о	Н/о
Основной материал (0 мкм)	Н/о	10,1	43,4	Н/о	0,3	2,7	42,2	0,8	0,6
Основной материал (+10 мкм)	Н/о	10,3	45,7	0,1	0,3	2,5	39,6	0,8	0,5
Основной материал (+20 мкм)	Н/о	10,4	44,7	Н/о	0,2	2,4	40,8	0,9	0,6
Основной материал в центре образца	Н/о	10,4	44,9	Н/о	Н/о	2,2	40,7	1,1	0,8
Точка 1	Н/о	13,2	57,2	Н/о	Н/о	2,2	26,6	0,6	0,3

\*Н/о – не обнаружено.

Таблица 2

**Локальный элементный состав образца интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  после проведения испытаний на жаростойкость при температуре  $700\text{ }^\circ\text{C}$  на базе 200 ч**

Место анализа	Содержание элементов, % (по массе)								
	O	Al	Ti	Cr	Ni	Zr	Nb	Ta	W
Точка 1	29,1	2,2	4,3	36,0	28,4	Н/о*	Н/о	Н/о	Н/о
Точка 2	Н/о	2,3	6,1	16,4	74,4	Н/о	Н/о	0,4	0,5
Точка 3	Н/о	1,5	90,8	1,2	4,3	Н/о	2,2	Н/о	Н/о
Точка 4	Н/о	1,8	92,8	0,4	1,6	Н/о	3,5	Н/о	Н/о
Зона взаимодействия	Н/о	8,9	56,1	0,1	0,7	2,6	31,0	0,5	0,3
Основной материал (0 мкм)	Н/о	10,8	42,6	Н/о	0,4	2,2	42,4	1,1	0,5
Основной материал (+10 мкм)	Н/о	10,5	42,2	Н/о	0,2	3,2	42,3	1,1	0,6
Основной материал в центре образца	Н/о	10,6	42,2	Н/о	0,0	3,4	42,2	0,9	0,7
Точка 5	Н/о	13,0	53,9	0,1	0,2	3,4	28,8	0,6	Н/о
Точка 6	Н/о	9,5	41,7	Н/о	Н/о	2,9	43,9	1,1	0,9

\*Н/о – не обнаружено.

Показано, что в состав зоны 1 покрытия в исходном состоянии после нанесения (рис. 5, а) входят никель, хром и титан. Зона 2 содержит титан и в большом количестве азот, что соответствует конструкции барьерного слоя. В зоне, прилегающей к покрытию, элементный состав соответствует основному материалу, в котором имеются фазы, обогащенные алюминием и титаном (точка 1 на рис. 3).

Установлено также, что верхний слой образца после проведения испытаний на жаростойкость (рис. 5, б) характеризуется наличием кислорода и основных элементов покрытия – хрома и никеля. Под верхним слоем наблюдается слой на основе никеля и хрома. Следующий слой на микроструктуре (точки 3 и 4) содержит в основном титан и азот.

В зоне взаимодействия и основного материала наблюдается повышение содержания алюминия и ниобия, а также обнаружены элементы, присущие составу основного материала, – цирконий, тантал и вольфрам. Однако в зоне взаимодействия не обнаружено никеля и хрома, содержащихся в верхнем слое покрытия, тем самым барьерный слой на основе нитрида титана выполняет возложенную функцию.

Материал в зоне 10 мкм от покрытия соответствует основному материалу. В основном материале наблюдаются фазы двух типов – обогащенные алюминием и титаном (точка 5 на рис. 5, б), а также обогащенные ниобием и вольфрамом (точка 6 на рис. 5, б).

### Заключения

Приведены результаты исследований по повышению фреттингостойкости титанового интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  путем формирования на поверхности покрытия. Конструкция ионно-плазменного покрытия включает наличие промежуточного и внешнего слоев, формируемых вакуумно-дуговым осаждением на ионно-плазменной установке МАП-3.

Опытным путем определено, что общий износ образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с защитным покрытием и без него в паре с контртелом из сплава ВЖ172 после испытаний на фреттингповреждаемость при температуре 20 °С составил: 10 мкм – для образца с покрытием и 30 мкм – для образца без покрытия, а при температуре 700 °С – соответственно 30 и 40 мкм.

Показано, что коэффициент трения образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с защитным покрытием и без него в паре с контртелом из сплава ВЖ172 после испытаний на фреттингповреждаемость составил 0,42 при температуре 20 °С, а при температуре 700 °С: 0,29 – для образца сплава  $Ti_2AlNb$  без покрытия и 0,31 – с покрытием.

Следует отметить, что покрытие также обеспечивает защиту интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  от высокотемпературного окисления. Удельное изменение массы образцов из интерметаллидного сплава  $Ti_2AlNb$  с покрытием после испытаний на жаростойкость при температуре 700 °С на базе 200 ч составило 3,78 г/м<sup>2</sup>, а без покрытия 6,22 г/м<sup>2</sup>.

По результатам рентгеноструктурных исследований установлено, что в процессе высокотемпературного выдерживания происходит образование оксида хрома, защитная пленка которого препятствует дальнейшему окислению образца, что подтверждается значениями удельных привесов по результатам испытаний на жаростойкость.

Показано, что в состав зоны 1 покрытия в исходном состоянии после нанесения входят никель, хром и титан, а зона 2 характеризуется повышенным содержанием кислорода и титана. В зоне, прилегающей к покрытию, элементный состав соответствует основному материалу, в котором имеются фазы, обогащенные алюминием и титаном (точка 1 на рис. 5, а).

По результатам анализа локального элементного состава образца с покрытием после испытаний на жаростойкость установлено, что в зоне взаимодействия покрытия и основного материала наблюдается повышение содержания алюминия и ниобия, а также обнаружены элементы, присущие составу основного материала, – цирконий, тантал и вольфрам. Однако в зоне взаимодействия не обнаружено никеля и хрома, содержащихся в верхнем слое покрытия, тем самым барьерный слой на основе нитрида титана выполняет возложенную на него функцию и не позволяет формировать в процессе высокотемпературной выдержки нежелательные фазы на основе никеля, хрома и титана, которые снижают выносливость интерметаллидного титанового сплава.

Исследование свидетельствует о повышении фреттингостойкости интерметаллидного титанового сплава  $Ti_2AlNb$  благодаря применению ионно-плазменного покрытия, конструктивные особенности которого в перспективе позволят применять его для защиты замков лопаток турбины низкого давления из интерметаллидного титанового  $\gamma$ -сплава.

**Библиографический список**

1. Смыслов А.М., Селиванов К.С. Разработка и исследование технологических методов повышения фреттинг-стойкости рабочих лопаток из титановых сплавов // Вестник УГАТУ. Сер.: Машиностроение. 2007. Т. 9. №1 (19). С. 77–83.
2. Лесневский Л.Н. Фреттинг-коррозия покрытий типа «твердая смазка» в экстремальных условиях эксплуатации // Вестник научно-технического развития. 2009. №2 (18). С. 31–35.
3. Селиванов К.С., Галиакбаров Р.Ф. Повышение фреттинг-стойкости деталей машин комплексной вакуумной плазменной обработкой // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. №7 (84). С. 29–32.
4. Горлов Д.С., Скрипак В.И., Мубояджян С.А., Егорова Л.П. Исследование фреттинг-износа твердосмазочного, шликерного и ионно-плазменного покрытий // Труды ВИАМ. 2017. №3 (51). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-7-7.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 13–19.
6. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
7. Путьрский С.В., Арисланов А.А., Артеменко Н.И., Яковлев А.Л. Различные методы повышения износостойкости титановых сплавов и сравнительный анализ их эффективности применительно к титановому сплаву BT23M // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 19–24. DOI: 10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24.
8. Сибилева С.В., Козлова Л.С. Обзор технологий получения покрытий на титановых сплавах плазменным электролитическим оксидированием // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S2. С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-3-10.
9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Конверсия в машиностроении. 1999. №2. С. 42–47.
10. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
11. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Новак А.В. Исследование структуры и свойств жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана с микродобавками гадолиния // Материаловедение. 2017. №3. С. 3–10.
12. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
13. Новак А.В., Алексеев Е.Б., Иванов В.И., Дзунович Д.А. Изучение влияния параметров закалки на структуру и твердость интерметаллидного титанового орто-сплава ВТИ-4 // Труды ВИАМ. 2018. №2 (62). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-5-5.
14. Курзина И.А., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Калашников М.П., Савкин К.П., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В. Формирование наноразмерных интерметаллидных фаз в условиях имплантации ионами алюминия титановых мишеней // Известия РАН. Сер. физическая. 2012. Т. 76. №1. С. 74–78.
15. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Горлов Д.С. Исследование жаростойкости и кинетики изменения элементного состава композиции из титанового сплава BT41 с жаростойкими покрытиями // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S5. С. 61–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-61-66.
16. Горлов Д.С., Александров Д.А., Заклякова О.В., Азаровский Е.Н. Исследование возможности защиты интерметаллидного титанового сплава от фреттинг-износа путем нанесения ионно-плазменного покрытия // Труды ВИАМ. 2018. №4 (64). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-51-58.
17. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.