

УДК 620.197:669.017.165

*Д.С. Горлов¹, Д.А. Александров¹, О.В. Замякова¹, Е.Н. Азаровский¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЩИТЫ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА
ОТ ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ
ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ**

DOI: 10/18577/2307-6046-2018-0-4-51-58

Приведены исследования фреттингостойкости и жаростойкости покрытий, нанесенных вакуумно-дуговым методом на установке МАП-3 и магнетронным среднечастотным осаждением на установке SEO-TEC K71 – «Квадро».

Показаны зависимости удельного изменения массы образцов из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытиями и без них после испытаний на жаростойкость при температуре 700°C на базе 150 ч.

Оптимальным комплексом свойств обладают покрытия, нанесенные вакуумно-дуговым методом при распылении литого трубного катода из нихрома (Ni–Cr) с подачей в камеру напыления реакционного газа азота и ацетилена.

Ключевые слова: *интерметаллид титана, ионно-плазменные покрытия, вакуумно-дуговое нанесение, магнетронное осаждение, фреттинг, фреттинг-износ, жаростойкость, металлография, микрорентгеноспектральный анализ.*

*D.S. Gorlov¹, D.A. Alexandrov¹, O.V. Zaklyakova¹, E.N. Azarovskiy¹***INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF PROTECTION
OF INTERMETALLIC TITANIUM ALLOY
AGAINST FRETTING WEAR BY ION-PLASMA COATING**

This article presents a study of the fretting resistance and heat resistance of coatings applied by vacuum-arc method on the installation of MAP-3 and magnetron mean-frequency deposition on the SEO-TEC K71 – «Quadro».

Dependences of specific mass change of samples of intermetallic titanium alloy Ti_2AlNb with and without coatings after tests for heat resistance at a temperature of 700°C on the basis of 150 people are shown.

The optimal complex of properties of coatings deposited by vacuum arc spraying method at the cast tube cathodes made of nichrome (Ni–Cr) is supplied into the chamber spraying the reaction gas of nitrogen and acetylene.

Keywords: *titanium intermetallic compounds, ion-plasma coatings, vacuum-arc coating, magnetron deposition, fretting, fretting wear, heat resistance, metallography, microrentgen-spectral analysis.*

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

Во время эксплуатации детали газотурбинных двигателей (ГТД) подвергаются воздействиям высоких температур, больших растягивающих напряжений, действиям агрессивных сред и знакопеременных нагрузок при вибрации. При этом возникающие усталостные разрушения деталей в основном связаны (до 84% случаев) с повреждениями

контактных поверхностей. Анализируя причины отказов узлов и агрегатов ГТД в ходе их длительной эксплуатации, а также результатов стендовых испытаний, пришли к выводу, что основной причиной зарождения большинства усталостных дефектов, приводящих к разрушению, является фреттинг. Под общим *термином* фреттинг принято понимать развитие следующих процессов: фреттинг-износ, фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость [1–3].

В настоящее время существуют различные конструктивные и технологические способы защиты контактных поверхностей от фреттинга. К технологичным способам можно отнести нанесение различных типов упрочняющих покрытий. Основной задачей покрытия по снижению фреттинга является способность к многократному деформированию без значительного разрушения под действием контактных и сдвиговых сил без образования продуктов износа, а также высокая стойкость материала к воздействию окислительной среды. На современных отечественных предприятиях по производству ГТД для защиты замков лопаток вентилятора применяется покрытие из технического серебра, наносимое гальваническим способом, для компрессора – твердосмазочное покрытие типа ВАП-2. Данные покрытия повышают долговечность деталей в 1,5–2,0 раза. Кроме того, для уменьшения фреттинг-износа широко применяют гальванические покрытия на никель-кадмиевой и кадмиевой основе, а также слои меди, золота и олова. Основой эффективности применения защитных покрытий является наличие жертвенного слоя из менее прочного, но пластичного материала, что приводит к уменьшению напряжений и деформаций в узле трения. Этот слой выполняет функции смазочного материала, а также предохраняет материал от воздействия кислорода и развития фреттинг-коррозии. При этом будет увеличиваться фактическая площадь зоны контакта, снижаться удельное давление и, как следствие, интенсивность износа [4–7].

Среди различных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на контактирующие поверхности для предотвращения фреттинга наиболее технологичными являются вакуумно-плазменные и ионно-имплантационные технологии обработки, а также их комбинации. Преимущества этих технологий наиболее полно используются при изготовлении ответственных деталей ГТД и лопаток турбин паровых энергетических установок из титановых сплавов, работающих в условиях высоких температур, давлений и агрессивных сред. Во ФГУП «ВИАМ» разработана вакуумно-плазменная технология высоких энергий (ВПТВЭ), позволяющая наносить защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для защиты конструкционных материалов, в том числе интерметаллидов титана [8–11].

Перспективным классом материалов для изготовления деталей современных авиационных двигателей с максимальной рабочей температурой в диапазоне от 600 до 700°C и высокими удельными прочностными характеристиками (жаропрочности и жаростойкости) являются деформируемые сплавы на основе орторомбического алюминид-титана Ti_2AlNb , которые разработаны специалистами ФГУП «ВИАМ» и известны как орто-сплавы [12–14].

Цель данной работы – исследование использования ионно-плазменных покрытий для защиты интерметаллидного сплава Ti_2AlNb от фреттинг-износа и повышения жаростойкости композиции «покрытие–сплав».

Работа выполнена в рамках стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия», комплексная проблема 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионные и коррозионностойкие, 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») [15].

Материалы и методы

Покрyтия наносили вакуумно-дуговым методом на ионно-плазменной установке МАП-3 и магнетронным среднечастотным осаждением на магнетронной установке SEO-TEC K71 – «Квадро».

Внешний вид промышленной ионно-плазменной установки МАП-3 для вакуумно-дугового нанесения и магнетронной установки SEO-TEC K71 – «Квадро» для магнетронного среднечастотного осаждения представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид промышленной ионно-плазменной установки МАП-3 для вакуумно-дугового нанесения (а) и магнетронной установки SEO-TEC K71 – «Квадро» для магнетронного среднечастотного осаждения (б)

Согласно СТО 1-595-2-507–2016 исследование фреттинг-износа проводили на универсальном трибометре SETR UMT-3MT с использованием привода R33HE1000 для возвратно-поступательного движения. Режимы испытания на фреттинг-износ: амплитуда колебаний 300 мкм, температура испытаний 20 и 700°C, нагрузка 10 Н, частота относительных колебаний 13 Гц, длительность 10^5 циклов или 128 мин.

Для оценки триботехнических свойств интерметалида титана с ионно-плазменными покрытиями и без них в паре с жаропрочным никелевым сплавом выбран метод «пальчик-по-пластине», в котором пальчик трется по двигающемуся возвратно-поступательно образцу в виде пластины.

В качестве образцов для контроля фреттинг-износа использовали пластины (25×43 мм) из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с нанесенными покрытиями и без них и контртела из жаропрочного никелевого сплава, представлявшего собой цилиндрические пальчики $\varnothing 2$ мм.

Испытания на жаростойкость проводили согласно ГОСТ 6130–71 при температуре 700°C на базе 150 ч в муфельной печи LE 14/11 фирмы Nabertherm в воздушной среде. В качестве образцов использовали диски из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb диаметром 14 и толщиной 2,5 мм.

Исследование микроструктуры образцов интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с ионно-плазменными покрытиями в исходном состоянии и после испытаний на жаростойкость проводили на металлографическом оптическом микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения. Для выявления микроструктуры изготовленные микрошлифы протравливали в 3%-ном растворе плавиковой кислоты.

Исследование локального химического состава образцов с покрытиями и без них после испытаний на жаростойкость при температуре 700°C на базе 150 ч проводили на сканирующем растровом электронном микроскопе (РЭМ) Inspect F50 фирмы FEI (США) с использованием энергодисперсионного анализатора (EDS/ЭДА).

Результаты и обсуждение

В качестве объектов исследования рассматривали несколько вариантов покрытий, нанесенных на образцы в виде пластин (для испытаний на фреттинг-износ) и дисков (для испытаний на жаростойкость).

Покрытия конструировали таким образом, чтобы получить композицию из пластичной, жаростойкой матрицы с равномерно распределенными частицами твердой фазы (карбидов или нитридов), с чередованием более твердых слоев с более мягкими слоями относительно друг друга, полученными при плазмохимической реакции на поверхности образцов.

Покрытия наносили вакуумно-дуговым методом при распылении литого трубного катода из нихрома (Ni–Cr) с подачей в камеру напыления газообразного азота и ацетилен. Наносили также нанослойное покрытие системы «нитрид титана/нитрид хрома» (TiN/CrN) при распылении составного катода, состоящего из хрома марки Х99Н1 и титана марки ВТ1-0, при одновременной подаче газообразного азота.

Методом магнетронного среднечастотного осаждения наносили покрытие системы «нитрид титана/нитрид алюминия» (TiN/AlN). Осаждение покрытия TiN/AlN проводили послойно путем отключения и включения рабочих мишеней из титана марки ВТ1-0 и алюминия марки А99 при достижении заданного времени напыления каждого слоя в отдельности с одновременной подачей газообразного азота [16].

Перед нанесением ионно-плазменных покрытий проводили подготовку поверхности образцов виброобработкой в круговом вибраторе.

Известно, что ионно-плазменные покрытия при значительной толщине снижают прочность конструкционных материалов при испытании на многоцикловую усталость, поэтому нанесение проводили по отработанным технологическим режимам для формирования покрытий с толщиной не более 25 мкм.

После напыления образцов из них изготавливали поперечные микрошлифы с нанесенными покрытиями. Установлено, что толщина покрытий, нанесенных вакуумно-дуговым методом и методом магнетронного осаждения, составляет в среднем от 10 до 20 мкм. Средняя толщина покрытий систем (Ni–Cr)C и (Ni–Cr)N составила 20 мкм; 18 мкм – для покрытий системы TiN/CrN; 10 мкм – для покрытия системы TiN/AlN, нанесенного магнетронным способом.

Результаты испытаний на фреттинг-износ образцов из интерметаллидного сплава Ti₂AlNb с покрытиями систем (Ni–Cr)C, (Ni–Cr)N, TiN/CrN при вакуумно-дуговом осаждении и TiN/AlN при магнетронном среднечастотном нанесении, а также сплава без покрытий приведены на рис. 2 в виде гистограмм суммарного линейного износа и коэффициентов трения при температурах 20 и 700°C.

Установлено, что при испытаниях на фреттинг-износ при температуре 20°C наименьший суммарный линейный износ в 20 мкм показал образец из интерметаллидного сплава Ti₂AlNb с покрытием системы TiN/CrN толщиной 18 мкм. Далее располагаются образцы с покрытиями (Ni–Cr)C и (Ni–Cr)N толщиной 20 мкм и образец из интерметаллидного сплава Ti₂AlNb без покрытия с линейным суммарным износом 30 мкм. Самый большой линейный суммарный износ (40 мкм) показал образец с покрытием системы TiN/AlN при нанесении магнетронным осаждением.

Самый низкий суммарный линейный износ в 70 мкм при испытаниях при температуре 700°C показали образцы из интерметаллидного сплава Ti₂AlNb с покрытиями систем (Ni–Cr)C и (Ni–Cr)N толщиной 20 мкм. Образцы интерметаллидного сплава Ti₂AlNb без покрытия и с покрытиями систем TiN/CrN и TiN/AlN показали суммарный линейный износ в паре с контртелом из жаропрочного никелевого сплава 200 мкм.

Одновременно с измерением суммарного линейного износа измеряли коэффициент трения в зоне контакта контртела и образца с покрытием и без него.

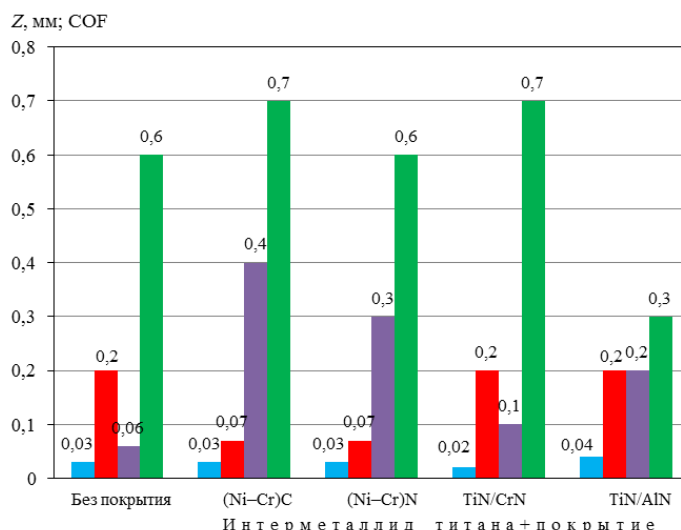


Рис. 2. Результаты испытаний на фреттинг-износ образцов из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb без покрытия и с покрытиями систем (Ni-Cr)C, (Ni-Cr)N, TiN/CrN при вакуумно-дуговом осаждении и TiN/AlN при магнетронном среднечастотном нанесении в виде гистограмм суммарного линейного износа (Z; ■, ■) и коэффициентов трения (COF; ■, ■) при температурах 20 и 700°C соответственно

Самое минимальное значение коэффициента трения (0,3) при испытаниях при температуре 20°C показал образец из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытием системы TiN/AlN при взаимодействии с контртелом из никелевого жаропрочного сплава. Далее следует вариант покрытия системы (Ni-Cr)N и образец из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb без покрытия (0,6). Самый большой коэффициент трения, равный 0,7, показали варианты покрытий систем (Ni-Cr)C и TiN/CrN.

При испытаниях на фреттинг-износ при температуре 700°C самый низкий коэффициент трения (0,06) показал образец из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с контртелом из никелевого жаропрочного сплава. Далее варианты покрытий с возрастающими значениями коэффициента трения располагаются в следующей последовательности – покрытия систем: TiN/CrN (0,1); TiN/AlN (0,2); (Ni-Cr)N (0,3); (Ni-Cr)C (0,4).

Для контроля стойкости нанесенных покрытий к высокотемпературному окислению проведены испытания на жаростойкость при температуре 700°C на базе 150 ч. Зависимость удельного изменения массы образцов из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытиями и без них при испытаниях на жаростойкость при температуре 700°C на базе 150 ч приведена на рис. 3.

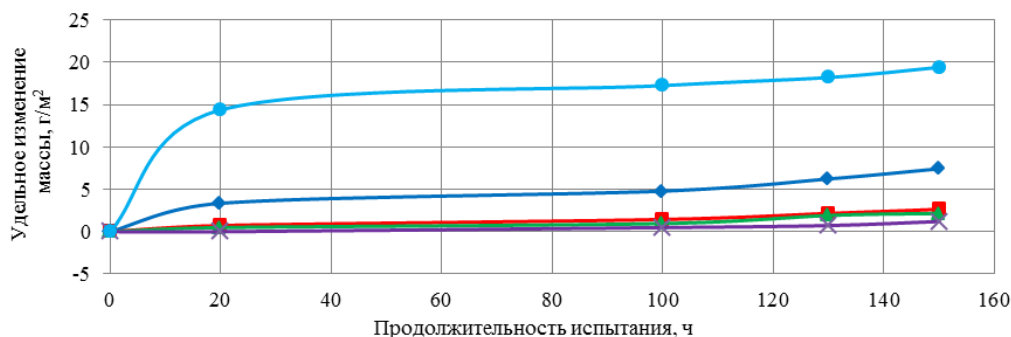


Рис. 3. Зависимость удельного изменения массы образцов из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb без покрытия (◆) и с покрытиями систем (Ni-Cr)C (■), (Ni-Cr)N (▲), TiN/CrN (×) и TiN/AlN (●) при испытаниях на жаростойкость при температуре 700°C на базе 150 ч

Показано, что высокой жаростойкостью при температуре 700°C на базе 150 ч обладает композиция интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытием системы TiN/CrN – удельное изменение массы $\Delta m=1,2$ г/м²; у образцов с покрытием систем: $(Ni-Cr)N$ – $\Delta m=2,2$ г/м² и $(Ni-Cr)C$ – $\Delta m=2,6$ г/м²; у образца интерметаллидного сплава Ti_2AlNb без покрытия – $\Delta m=7,4$ г/м², а самую низкую жаростойкость показал образец с покрытием TiN/AlN – $\Delta m=19,4$ г/м².

Для анализа изменения микроструктуры интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытиями и без них, после проведения испытаний на жаростойкость изготавливали микрошлифы. Микроструктуры образцов из интерметаллида титана с покрытиями и без них после испытаний на жаростойкость при температуре 700°C на базе 150 ч представлены на рис. 4.

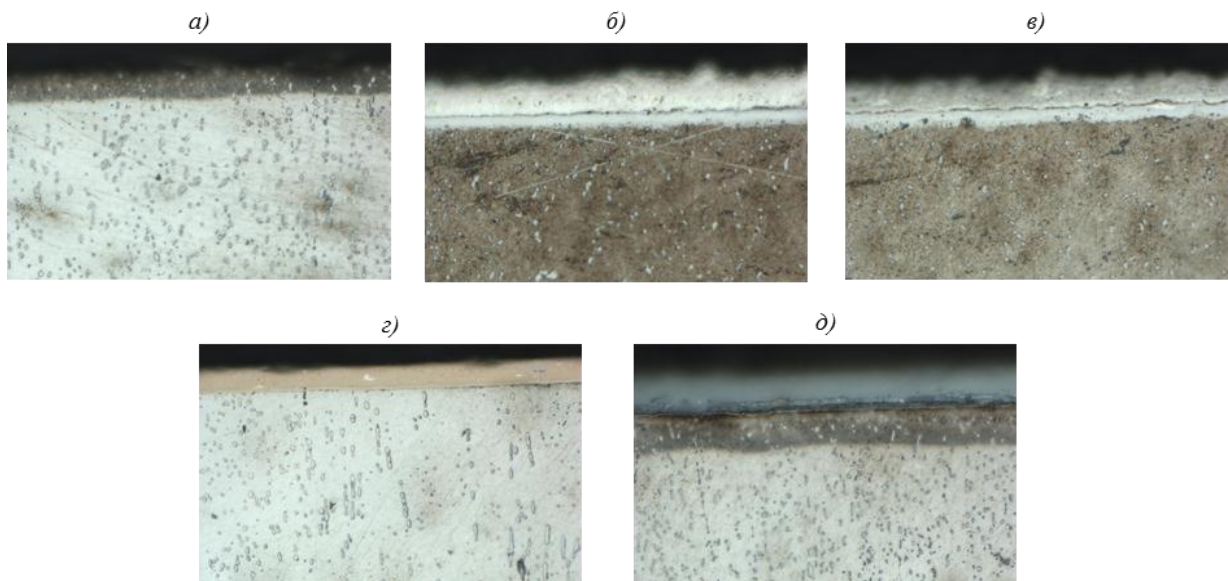


Рис. 4. Микроструктуры ($\times 500$) образцов из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb без покрытия (а) и с покрытиями систем $(Ni-Cr)C$ (б), $(Ni-Cr)N$ (в), TiN/CrN (г) и TiN/AlN (д) после испытаний на жаростойкость при температуре 700°C на базе 150 ч

Показано, что после проведения испытаний на жаростойкость при температуре 700°C на базе 150 ч в микроструктуре образцов интерметаллидного сплава Ti_2AlNb без покрытия и с покрытием системы TiN/AlN выявлена зона взаимодействия толщиной 20 мкм, аналогичная зона выявлена на образцах с покрытиями систем $(Ni-Cr)C$ и $(Ni-Cr)N$ толщиной 6 мкм. В микроструктуре образца из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытием системы TiN/CrN зоны взаимодействия не обнаружено. Покрытие не имело отслоений и деградации.

Для объяснения полученных результатов испытаний на жаростойкость использовали металлографические исследования покрытий и микрорентгеноспектральный анализ с целью выбора защиты интерметаллидного сплава Ti_2AlNb от окисления.

С помощью металлографических исследований установлено наличие измененного поверхностного слоя в образце из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb на глубине 20 мкм от поверхности границы раздела «материал–атмосфера». Данные микрорентгеноспектрального анализа показали наличие в этом слое кислорода. На образце из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытием системы TiN/CrN кислород определяется

в покрытии на глубине 3 мкм от поверхности раздела «покрытие–атмосфера». Под покрытием диффузионной зоны не обнаружено.

На образцах из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытиями систем $(Ni-Cr)C$ и $(Ni-Cr)N$ наличие кислорода под покрытием не обнаружено, но обнаружено наличие никеля на глубине 2 мкм от границы раздела «сплав–покрытие». По-видимому, это вызвано диффузионной подвижностью атомов никеля из покрытия в интерметаллид титана. Наличие светлой зоны на микрошлифах, возможно, является подтверждением образования соединений никеля и титана.

На образце из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb с покрытием системы TiN/AlN присутствие кислорода обнаружено по всей толщине покрытия, а также на глубине 20 мкм под покрытием в сторону к металлической поверхности.

Заключения

Исследовали фреттингостойкость и жаростойкость ионно-плазменных покрытий различных составов толщиной от 10 до 20 мкм, нанесенных вакуумно-дуговым методом на установке МАП-3 и магнетронным среднечастотным осаждением на установке SEO-ТЕС К71 – «Квадро» при плазмохимическом синтезе.

Показано, что наименьший суммарный линейный износ (20 мкм) при температуре 20°C показал образец с покрытием системы TiN/CrN толщиной 18 мкм, а при температуре 700°C образцы с покрытиями систем $(NiCr)C$ и $(NiCr)N$ толщиной 20 мкм в паре с контртелом из жаропрочного никелевого сплава показали линейный износ 70 мкм. Образец интерметаллидного сплава Ti_2AlNb без покрытия в паре с жаропрочным никелевым сплавом показал суммарный линейный износ 30 мкм при температуре 20°C и 200 мкм при 700°C.

Самый низкий коэффициент трения показал образец из интерметаллидного сплава Ti_2AlNb в паре с жаропрочным никелевым сплавом при температуре 700°C, который равен 0,06, а самый высокий, равный 0,7, показали варианты покрытий систем $(Ni-Cr)C$ и TiN/CrN при температуре 20°C.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что оптимальным комплексом свойств обладает покрытие системы $(Ni-Cr)N$ толщиной 20 мкм, которое повышает фреттингостойкость интерметаллидного сплава Ti_2AlNb в 2,8 раза.

Высокую жаростойкость интерметаллидному сплаву Ti_2AlNb при температуре 700°C на базе 150 ч обеспечивает покрытие системы TiN/CrN с удельным изменением массы 1,2 г/м², самую низкую – композиция с покрытием системы TiN/AlN с привесом 19,4 г/м². Интерметаллидный сплав Ti_2AlNb без покрытий показал среднее значение удельного изменения массы, равное 7,42 г/м².

С помощью микрорентгеноспектрального анализа и металлографических исследований выявлена склонность интерметаллидного сплава Ti_2AlNb к образованию альфирированного слоя толщиной до 20 мкм после испытаний при температуре 700°C на базе 150 ч.

При использовании покрытий систем $(Ni-Cr)C$ и $(Ni-Cr)N$ на интерметаллидном сплаве Ti_2AlNb при температуре 700°C на базе 150 ч под покрытием происходит образование зоны соединений никеля и титана толщиной до 6 мкм.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования ионно-плазменных покрытий для защиты интерметаллидного сплава Ti_2AlNb от фреттинг-износа и повышения жаростойкости при рабочих температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смыслов А.М., Селиванов К.С. Разработка и исследование технологических методов повышения фреттинг-стойкости рабочих лопаток из титановых сплавов // Вестник УГАТУ. Сер.: Машиностроение. Т. 9. №1 (19). С. 77–83.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 13–19.
3. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. С. 531–534.
4. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.
5. Горлов Д.С., Скрипак В.И., Мубояджян С.А., Егорова Л.П. Исследование фреттинг-износа твердосмазочного, шликерного и ионно-плазменного покрытий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №3. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-7-7.
6. Лесневский Л.Н. Фреттинг-коррозия покрытий типа «твердая смазка» в экстремальных условиях эксплуатации // Вестник научно-технического развития. 2009. №2 (18). С. 31–35.
7. Путырский 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 ВТ23М // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1. С. 19–24. DOI: 10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24.
8. 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.
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. Сибилева С.В., Козлова Л.С. Обзор технологий получения покрытий на титановых сплавах плазменным электролитическим оксидированием // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S2 (44). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-3-10.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №2. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-5-5.
15. 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.
16. Курзина И.А., Попова Н.А., Никоненко Е.Л. и др. Формирование наноразмерных интерметаллидных фаз в условиях имплантации ионами алюминия титановых мишеней // Известия РАН. Сер.: Физическая. 2012. Т. 76. №1. С. 74–78.