

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-105-114

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В.В. Антипов¹, Д.С. Горлов¹, Д.В. Чесноков¹, П.Л. Журавлева¹, И.М. Иванов¹

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

Аннотация. Приведены результаты сравнительных испытаний коррозионной стойкости ионно-плазменных покрытий системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученные после вакуумного отжига и насыщения в металлической плазме для защиты титанового ортосплава ВИТ6. Проведены металлографические и металлофизические исследования после ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С на базе 10 циклов. Установлено повышение коррозионной стойкости композиции «сплав–покрытие» при применении вакуумного отжига при температуре 700 °С в течение 5 ч относительно насыщения в металлической плазме.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, ускоренные циклические коррозионные испытания, ионно-плазменные покрытия, деформируемый интерметаллидный титановый сплав

Для цитирования: Антипов В.В., Горлов Д.С., Чесноков Д.В., Журавлева П.Л., Иванов И.М. Исследование коррозионной стойкости ионно-плазменных покрытий для защиты интерметаллидного титанового сплава // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-105-114.

Scientific article

INVESTIGATION OF CORROSION RESISTANCE OF ION-PLASMA COATINGS FOR THE PROTECTION OF INTERMETALLIC TITANIUM ALLOY

V.V. Antipov¹, D.S. Gorlov¹, D.V. Chesnokov¹, P.L. Zhuravleva¹, I.M. Ivanov¹

¹Federal 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 comparative tests of corrosion resistance of ion-plasma layered coatings of the (Ti–TiN) + VSDP-13 system obtained after vacuum annealing and after saturation in metal plasma to protect the deformable intermetallic titanium ortho-alloy VIT6. Metallographic studies and studies of the phase composition were carried out after accelerated cyclic corrosion tests at a temperature of 700 °C on the basis of 10 cycles. An increase in the corrosion resistance of the alloy-coating composition was found when vacuum annealing was applied at a temperature of 700 °C for 5 hours relative to saturation in metal plasma.

Keywords: corrosion resistance, accelerated cyclic corrosion tests, ion-plasma coatings, deformable intermetallic titanium alloy

For citation: Antipov V.V., Gorlov D.S., Chesnokov D.V., Zhuravleva P.L., Ivanov I.M. Investigation of corrosion resistance of ion-plasma coatings for the protection of intermetallic titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-105-114.

Введение

При создании авиационной техники, преимущественно гражданского назначения, большое внимание уделяют ее противокоррозионной защите для повышения ресурса конструкций, изготовленных из металлических материалов [1]. В настоящее время материалы на основе интерметаллидной орто-фазы Ti_2AlNb представляются наиболее перспективными для применения в аэрокосмической отрасли. Преимущество данных материалов заключается в комплексном сочетании свойств, таких как низкая плотность, высокая весовая эффективность и хорошее сопротивление окислению при повышенных температурах [2]. Но при этом имеются и недостатки, характерные для интерметаллидных сплавов, а именно – низкая пластичность и неудовлетворительная технологичность как при обработке давлением, так и при резании и литье [3].

Сплавы, получаемые деформацией, на основе орторомбического алюминиды титана Ti_2AlNb (их называют орто-сплавами благодаря повышенным удельным прочностным характеристикам, жаростойкости и жаропрочности) являются в настоящее время преимущественно перспективным классом материалов для создания изделий современных авиационных двигателей, предельная рабочая температура которых находится в диапазоне от 600 до 700 °С [4, 5].

Данные материалы создают для замены жаропрочных сталей и сплавов на основе никеля, обладающих значительно большей плотностью (до 8,5 г/см³). Существенное снижение массы изделий за счет применения интерметаллидных титановых орто-сплавов может повысить экономичность, мощность и ресурс эксплуатации двигателей [6–8].

При работе современных газотурбинных двигателей (ГТД) одним из факторов, воздействующих на детали горячего тракта турбореактивного двухконтурного двигателя, является высокотемпературная коррозия, протекающая под действием хлоридов и/или серы и их соединений при температуре >600 °С. Такой вид коррозионных локальных поражений на поверхности «металл–защитное покрытие», являющихся концентраторами напряжений, может привести к преждевременному выходу из строя детали [9, 10].

За последний период пока не создано ни одного жаропрочного сплава, который был бы невосприимчив к высокотемпературной солевой коррозии (ВТСК). Не разработаны также и национальные стандарты для проведения испытаний материалов на стойкость к ВТСК, что свидетельствует о сложности решения данной проблемы. Поэтому особенно важным условием длительной безаварийной эксплуатации ГТД является высокая коррозионная стойкость жаропрочных сплавов, применяемых в конструкции двигателя, и использование эффективных конструкций защитных покрытий. При оценке перспективности применяемых материалов и защитных покрытий требуется понимание механизма коррозии при повышенных температурах, возможность ее моделирования и прогнозирования в условиях лабораторий [11].

В данной статье представлены результаты сравнительных исследований коррозионной стойкости вакуумно-дуговых слоистых покрытий системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученные после вакуумного отжига и насыщения в металлической плазме для коррозионной защиты деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава ВИТ6 [12–17].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при реализации комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинг-покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18].

Материалы и методы

Для проведения исследований изготовлены образцы деформируемого титанового интерметаллидного орто-сплава ВИТ6 в виде дисков диаметром 18 и 20 мм и толщиной 3 мм с отверстием для подвеса при нанесение покрытия.

Для нанесения использовали паянные к катодной оправке катоды из титанового сплава ВТ1-0 и из сплава ВСДП-13 на основе алюминия, легированного кремнием, никелем и бором. Паяный катод из титанового сплава позволит уменьшить капельную фазу при конденсации материала и тем самым снизить остаточную пористость слоев покрытия при создании барьера для молекул воздуха.

Перед нанесением покрытия на образцах деформируемого титанового интерметаллидного сплава ВИТ6 проводили поверхностную обработку в круговом и лотковом вибраторах с целью создания сжимающих напряжений в поверхностном слое и уменьшения микронеровностей.

Напыление проводили на ионно-плазменной установке МАП-3 в автоматическом режиме. Сначала наносили подслои из чередующихся твердых и мягких слоев нитрида титана и титана (их наносили дважды), а затем после смены титанового катода на катод сплава ВСДП-13 наносили верхний слой. Для сравнения первый вариант покрытия наносили по схеме конденсационно-диффузионного покрытия с последующим вакуумным отжигом в вакуумной печи ВПН-12 при температуре 700 °С и выдержкой 5 ч, а второй вариант предполагал формирование конечного состава покрытия путем насыщения в металлической плазме (повышения потенциала на образцах), тем самым увеличивалась энергия бомбардировки поверхности ионами катода сплава ВСДП-13. Таким образом наносили слоистое ионно-плазменное покрытие системы (Ti–TiN) + ВСДП-13.

Для сравнительного анализа коррозионной стойкости ионно-плазменных покрытий выбрана методика ускоренных циклических коррозионных испытаний, применяемая для сталей с максимальной рабочей температурой 650 °С.

Сравнительные ускоренные циклические коррозионные испытания образцов из деформируемого титанового интерметаллидного сплава ВИТ6 с двумя вариантами покрытий и без них проводили в камерной электропечи ПЛ 20/12,5 при температуре 700 °С в соответствии с РТМ 1.2.189–2006. Режим ускоренных циклических коррозионных испытаний отражен в работе [9]. Продолжительность испытаний 10 циклов.

Металлографические исследования образцов из указанного сплава с двумя вариантами покрытий и без них после коррозионных испытаний проводили на оптическом микроскопе с цифровой системой обработки изображения фирмы Olympus при увеличениях до $\times 500$. Шлифы перед съемкой травились раствором $15\text{HNO}_3 + 5\text{HF}$.

Качественный фазовый анализ образцов с ионно-плазменными покрытиями и без них проводили с применением дифрактометра Empyrean в стандартной геометрии Брэгга–Брентано в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении, интервал сканирования $2\theta = 20\text{--}145$ градусов.

Результаты и обсуждение

После сравнительных ускоренных циклических коррозионных испытаний проводили гравиметрические исследования, в результате которых построены гистограммы удельного изменения массы образцов с покрытиями и без них с продуктами коррозии и после их удаления.

Зависимость удельного изменения массы образцов из деформированного титанового интерметаллидного сплава ВИТ6 без покрытия и с покрытиями после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С с продуктами коррозии и без них представлена на рис. 1.

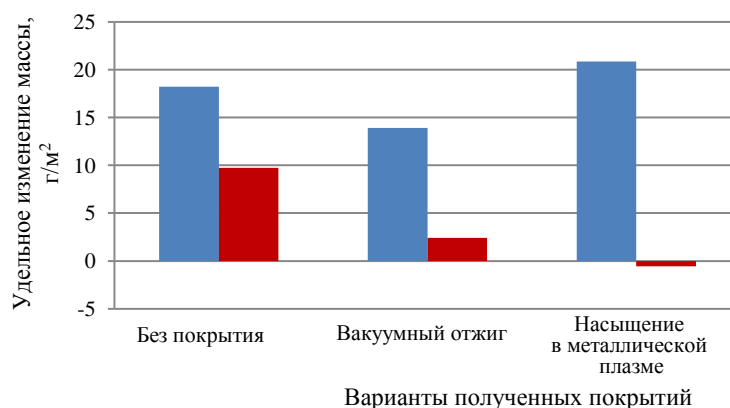


Рис. 1. Зависимость удельного изменения массы образцов из деформированного титанового интерметаллидного сплава ВИТ6 без покрытия и с покрытиями после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С с продуктами коррозии (■) и без них (■)

Исходя из того, что на рис. 1 представлены гистограммы удельного изменения массы образцов из деформированного титанового интерметаллидного сплава ВИТ6 без покрытия и с покрытиями после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С с продуктами коррозии и без них, то и анализ полученных результатов целесообразно проводить отдельно.

Показано, что минимальное значение удельного изменения массы (13,9 г/м²) – у образца из сплава ВИТ6 со слоистым ионно-плазменным покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным после вакуумного отжига. Этот показатель в 1,3 раза меньше показателя образца из сплава ВИТ6 без покрытия и в 1,5 раза меньше показателя образца из сплава ВИТ6 с покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным путем насыщения в металлической плазме.

Аналогичным образом коррелируют данные с образцами после удаления продуктов коррозии: значение удельного изменения массы (2,4 г/м²) образца из сплава ВИТ6 со слоистым ионно-плазменным покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным после вакуумного отжига при температуре 700 °С и выдержки 5 ч, в 4 раза меньше значения для образца из сплава ВИТ6 без покрытия, но в 4,5 раза больше значения для образца из сплава ВИТ6 с покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным путем насыщения, – удельное изменение массы имеет отрицательное значение: –0,5 г/м².

Данные результаты свидетельствуют о защитном эффекте в условиях солевой коррозии покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученного после вакуумного отжига на образце из сплава ВИТ6. Установлено также существенное преимущество технологии получения покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13 с использованием вакуумного отжига для формирования окончательной структуры перед технологией насыщения. По-видимому, при насыщении сформирована нестабильная структура покрытия из-за недостаточной энергии при регулировании вольт-амперных характеристик.

В подтверждение полученных данных на рис. 2 представлен внешний вид образцов из деформированного титанового интерметаллидного сплава ВИТ6 без покрытия и с покрытиями после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С после удаления продуктов коррозии.

Видно, что на образце из указанного сплава без покрытия вся поверхность покрыта осветленной пленкой с мелкими точками серого цвета. По-видимому, пленка состоит из плотных шпинелей, возникших в результате взаимодействия продуктов коррозии с агрессивным раствором соли NaCl под воздействием повышенной температуры.

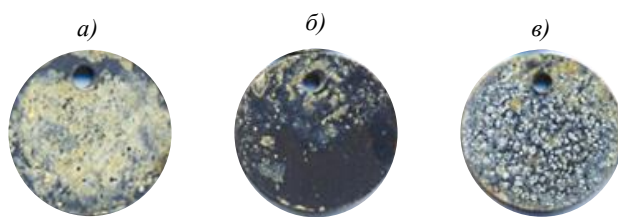


Рис. 2. Внешний вид образцов из деформированного титанового интерметаллидного сплава ВИТ6 без покрытия (*a*) и с покрытиями, полученными после вакуумного отжига (*б*) и насыщения в рабочей камере установки МАП-3 (*в*) после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С после удаления продуктов коррозии

На поверхности образца из сплава ВИТ6 со слоистым ионно-плазменным покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным после вакуумного отжига, наблюдается темно-серая пленка с редкими вкраплениями светлых точек. Внешний вид данного образца визуально отличается от внешнего вида образца из сплава ВИТ6 с покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным путем насыщения: темно-серый фон и наличие очень большого количества светлых точек, которые равномерно распределены по всей поверхности.

Для подтверждения полученных данных для деформированного интерметаллидного титанового сплава ВИТ6 без покрытия и с двумя вариантами покрытий после проведения 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С после удаления продуктов коррозии, изготовлены микрошлифы.

Микроструктуры указанного сплава без покрытия и с двумя вариантами покрытий представлены на рис. 3.

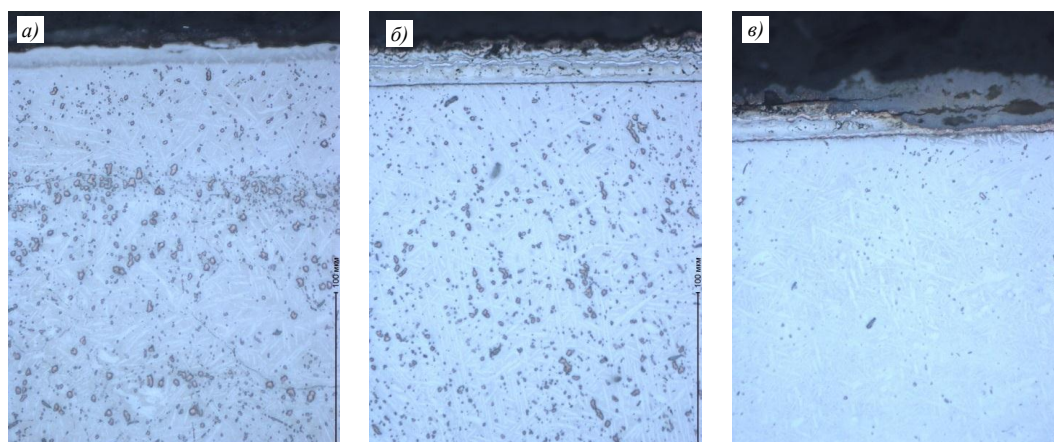


Рис. 3. Микроструктуры деформированного интерметаллидного титанового орто-сплава ВИТ6 без покрытия (*a*) и с двумя вариантами покрытий, полученных после вакуумного отжига (*б*) и насыщения в рабочей камере установки МАП-3 (*в*) после 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С после удаления продуктов коррозии

Установлено, что на микроструктуре сплава ВИТ6 без покрытия четко видны альфированная зона (толщиной ~8 мкм), а также оксидная пленка толщиной 10 мкм, образовавшаяся при взаимодействии продуктов окисления поверхностных слоев данного сплава с 3%-ным раствором NaCl при повышенной температуре.

На микроструктуре образца из сплава ВИТ6 со слоистым ионно-плазменным покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным после вакуумного отжига, очень четко видна граница раздела «сплав–покрытие», как, впрочем, и на образце из сплава

ВИТ6 с покрытием, полученным путем насыщения, что является следствием применения поверхностной обработки данных образцов перед нанесением покрытия в круговом и лотковом вибраторе. Кроме того, видна слоистая структура, полученная в результате технологического приема периодической подачи реакционного газа азота в рабочую камеру ионно-плазменной установки во время распыления паяного катода из сплава ВТ1-0. Толщина покрытия составила ~30 мкм. На границе «покрытие–атмосфера» наблюдается окисленный слой, состоящий из продуктов окисления покрытия после взаимодействия с 3%-ным раствором NaCl при повышенной температуре. Толщина зоны окисления покрытия составила ~5 мкм.

На микроструктуре образца из сплава ВИТ6 со слоистым ионно-плазменным покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным путем насыщения, видна зона с окислением покрытия практически по всей его толщине, а также наблюдается увеличение толщины окисленной зоны покрытия после взаимодействия с 3%-ным раствором NaCl при повышенной температуре.

Металлографический анализ подтвердил данные гравиметрического анализа и наглядно показал преимущество применения вакуумного отжига для формирования более стойкой структуры для защиты деформированного интерметаллидного титанового орто-сплава ВИТ6 от солевой коррозии.

Для оценки влияния технологии нанесения на фазовый состав покрытий в исходном состоянии и после проведения ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °C проведен рентгеноструктурный анализ.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что после нанесения покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13 с вакуумным отжигом на образце из сплава ВИТ6 формируется поверхностный слой, содержащий интерметаллидные фазы Al_3Ti , Ti_3Al (α_2), $TiAl$ (γ), $TiAl_2$ и незначительное количество силицида титана Ti_5Si_3 . После нанесения покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13 с применением насыщения основная фаза, формирующая поверхностный слой, – интерметаллид Al_3Ti с небольшим содержанием α -Ti и Al_3Ni .

После проведения 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °C и удаления продуктов коррозии на поверхности образца из сплава ВИТ6 без покрытия окисленный слой содержит шпинель $NbNaO_3$ и оксид TiO_2 (рутил), а также сложный оксид Ti_3AlNaO_8 и оксид Al_2O_3 в меньшем количестве. На образцах из сплава ВИТ6 со слоистым покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным двумя вариантами, после проведения 10 циклов ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °C и удаления продуктов коррозии, окисленный слой состоит из оксидов титана – рутила и анатаза, с частичным сохранением основной интерметаллидной фазы покрытий Al_3Ti . В небольшом количестве в поверхностном слое образцов содержатся соединения Ni_4Ti_3 и Al_2O_3 .

В результате исследований установлено, что при вакуумном отжиге при температуре 700 °C в течение 5 ч на поверхности сплава в исходном состоянии формируется структура покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13 с широким спектром фаз – в частности, с самой жаростойкой для поверхностного слоя покрытия фазой Al_3Ti относительно технологии насыщения. После проведения ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °C в течение 10 циклов и после удаления продуктов коррозии на поверхности деформированного интерметаллидного титанового сплава ВИТ6 остается плотная оксидная пленка, состоящая из шпинели $NbNaO_3$ и оксида TiO_2 , а также сложного оксида Ti_3AlNaO_8 и оксида Al_2O_3 . Такие соединения не образуются на поверхности покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученного как вакуумным отжигом, так и путем насыщения на образцах сплава ВИТ6 после проведения ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °C в течение 10 циклов и

после удаления продуктов коррозии. У данных образцов – идентичный фазовый состав после проведения испытаний, который сформировался при повышенной температуре и выдержке.

Заключения

Приведены результаты работ по защите деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава ВИТ6 от солевой коррозии путем варьирования технологии нанесения ионно-плазменного слоистого покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13. Оценку коррозионной стойкости сплава ВИТ6 делали после проведения сравнительных ускоренных циклических коррозионных испытаний при температуре 700 °С на базе 10 циклов. Сравнивали образцы сплава ВИТ6 без покрытия и с ионно-плазменными покрытиями, полученными после вакуумного отжига при температуре 700 °С в течение 5 ч и после насыщения в металлической плазме.

Анализ данных коррозионных испытаний образцов с продуктами коррозии показал защитный эффект от применения покрытия, полученного по технологии вакуумного отжига, с удельным изменением массы 13,9 г/м², что в 1,3 раза меньше по сравнению со значениями образца из сплава ВИТ6 без покрытия и в 1,5 раза меньше по сравнению со значениями образца из сплава ВИТ6 с покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным путем насыщения.

Если рассматривать результаты коррозионных испытаний после удаления продуктов коррозии, то также наблюдается защитный эффект от применения покрытия, полученного по технологии вакуумного отжига, со значением удельного изменения массы 2,4 г/м², что в 4 раза меньше по сравнению с образцом из сплава ВИТ6 без покрытия, но в 4,5 раза больше по сравнению с образцом из сплава ВИТ6 с покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным путем насыщения, – показатель рассматриваемой характеристики имеет отрицательное значение: –0,5 г/м². Данные значения свидетельствуют о деградации структуры покрытия и частичном скалывании и осыпании.

Внешний вид образцов косвенно подтверждает данные гравиметрического анализа. Значительно меньшее количество коррозионных повреждений поверхности наблюдается на образце из сплава ВИТ6 со слоистым ионно-плазменным покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным после вакуумного отжига, по сравнению с образцом без покрытия и с покрытием, полученным насыщением из металлической плазмы.

Металлографический анализ показал разные структуры деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава ВИТ6 без покрытия и с ионно-плазменными слоистыми покрытиями системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученными после вакуумного отжига при температуре 700 °С в течение 5 ч и после насыщения в металлической плазме. На микроструктуре образца из сплава ВИТ6 без покрытия четко видны альфированная зона (толщиной ~8 мкм), а также оксидная пленка толщиной 10 мкм, образовавшаяся при взаимодействии продуктов окисления поверхностных слоев сплава ВИТ6 с 3%-ным раствором NaCl при повышенной температуре. На микроструктуре образца из сплава ВИТ6 со слоистым ионно-плазменным покрытием системы (Ti–TiN) + ВСДП-13, полученным после вакуумного отжига, очень четко видна граница раздела «сплав–покрытие», как и на образце из сплава ВИТ6 с покрытием, полученным путем насыщения, что является следствием применения поверхностной обработки образцов из данного сплава перед нанесением покрытия в круговом и лотковом вибраторах. Толщина покрытия составила 30 мкм.

Рентгеноструктурным анализом установлены формирующиеся фазы после нанесения покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13 с варьированием технологии. После вакуумного отжига при температуре 700 °С в течение 5 ч, формируется поверхностный

слой покрытия с интерметаллидными фазами Al_3Ti , Ti_3Al (α_2), $TiAl$ (γ), $TiAl_2$ и незначительным количеством силицида титана Ti_5Si_3 ; после насыщения в металлической плазме – Al_3Ti с небольшим содержанием $\alpha-Ti$ и Al_3Ni .

После проведения коррозионных испытаний и удаления продуктов коррозии на поверхности образца сплава ВИТ6 без покрытия окисленный слой содержит шпинель $NbNaO_3$ и оксид TiO_2 (рутил), а также сложный оксид Ti_3AlNaO_8 и оксид Al_2O_3 в меньшем количестве. На поверхности покрытий, полученных по разным технологиям, окисленный слой состоит из оксидов титана – рутила и анатаза, с частичным сохранением основной интерметаллидной фазы покрытий Al_3Ti . В небольшом количестве в поверхностном слое образцов содержатся соединения Ni_4Ti_3 и Al_2O_3 .

Очевидным преимуществом для повышения коррозионной стойкости деформированного интерметаллидного титанового сплава ВИТ6 является применение защитного покрытия системы (Ti–TiN) + ВСДП-13 толщиной 30 мкм, полученного по ионно-плазменной технологии с формированием окончательной структуры с помощью вакуумного отжига.

Список источников

1. Антипов В.В., Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Фомина М.А., Французова Т.П., Козлов И.А. 90-летняя практика противокоррозионной защиты // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-108-126.
2. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
3. Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Шарапкин Д.С. Комплекс механических и эксплуатационных свойств катаных заготовок из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
4. Григоренко С.Г., Григоренко Г.М., Задорожнюк О.М. Интерметаллиды титана. Особенности, свойства применения (обзор) // Современная электрометаллургия. 2017. № 3 (128). С. 51–58. DOI: 10.15407/sem2017.03.08.
5. 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.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кучеряев В.В. и др. Термомеханическое поведение интерметаллидных сплавов систем Ni–Al–Co и Ti–Al–Nb при изотермической деформации // Письма о материалах. 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 189–194. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-3-189-194.
7. Капустин В.И., Захарченко К.В., Черепанова В.К., Шаяпов В.Р. Исследование диссипативных процессов сплава ВТ6 при усталости // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.
8. Польшкин И.С., Гребенюк О.Н., Саленков В.С. Интерметаллиды на основе титана // Технология легких сплавов. 2010. № 2. С. 59–15.
9. Каблов Е.Н., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В., Виноградов С.С. Перспективные покрытия для защиты от коррозии углеродистых сталей // Сталь. 2016. № 6. С. 70–81.
10. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
11. Шубин И.Ю., Никитин Я.Ю., Пучков Ю.А. и др. Исследование стойкости к высокотемпературной газовой и солевой коррозии жаропрочного и интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2020. № 6. С. 83–105. DOI: 10.18698/0236-3941-2020-6-83-105.

12. Еремин Е.Н., Юров В.М., Лауринас В.Ч., Сыздыкова А.Ш. Влияние технологических параметров нанесения многоэлементных ионно-плазменных покрытий на их качество // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 9–13. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-9-13.
13. Хамин О.Н., Лавро В.Н. Использование ионно-плазменных покрытий для пайки титановых сплавов со сталями // Современные материалы, техника и технологии. 2019. № 4 (26). С. 196–201.
14. Лавро В.Н. Исследование влияния технологических параметров нанесения ионно-плазменных покрытий на их качество // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 4 (19). С. 63–69.
15. Мухин В.С., Будилов В.В., Шехтман С.Р. Методология создания покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами и технологии их нанесения на лопатки компрессора ГТД // Вестник УГАТУ. 2012. № 5 (50). Ст. 16. С. 149–153.
16. Терюкалова Н.В., Новицкая О.С., Сизова О.В. Микроструктура и триботехнические свойства многослойных ионно-плазменных покрытий CrN–TiN // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 12 (114). Ч. 1. С. 81–85. DOI: 10.23670/IRJ.2021.114.12.011.
17. Доронин О.Н., Горлов Д.С., Азаровский Е.Н., Кочетков А.С. Исследование структуры и свойств жаростойкого покрытия при высокотемпературной деформации образцов из интерметаллидного титанового сплава // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
18. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.

References

1. Antipov V.V., Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Fomina M.A., Frantsuzova T.P., Kozlov I.A. 90-year practice of anticorrosive protection. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 26, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-108-126.
2. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallic alloys based on titanium and nickel*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 308 p.
3. Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A., Sharapkin D.S. Complex of mechanical and operational properties of rolled blanks from metastable- β -titanium alloy VT47. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 26, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
4. Grigorenko S.G., Grigorenko G.M., Zadorozhnyuk O.M. Titanium intermetallics. Features, application properties (review). *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2017, no. 3 (128), pp. 51–58. DOI: 10.15407/sem2017.03.08.
5. 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– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
6. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Kucheryaev V.V. Thermomechanical behavior of intermetallic alloys of Ni–Al–Co and Ti–Al–Nb systems during isothermal deformation. *Pisma o materialakh*, 2016, vol. 6, no. 3 (23), pp. 189–194. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-3-189-194.
7. Kapustin V.I., Zakharchenko K.V., Cherepanova V.K., Shayapov V.R. Investigation of dissipative processes of VT6 alloy under fatigue. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (69), paper no. 09. (accessed: January 26, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.
8. Polkin I.S., Grebenyuk O.N., Salenkov V.S. Intermetallic compounds based on titanium. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2010, no. 2, pp. 59–15.
9. Kablov E.N., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V., Vinogradov S.S. Promising coatings for corrosion protection of carbon steels. *Stal*, 2016, no. 6, pp. 70–81.
10. Kablov E.N., Kuttyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 26, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

11. Shubin I.Yu., Nikitin Ya.Yu., Puchkov Yu.A. et al. Investigation of resistance to high-temperature gas and salt corrosion of heat-resistant and intermetallic titanium alloy VTI-4. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mechanical engineering*, 2020, no. 6, pp. 83–105. DOI: 10.18698/0236-3941-2020-6-83-105.
12. Eremin E.N., Yurov V.M., Laurinas V.Ch., Syzdykova A.Sh. Influence of technological parameters of application of multi-element ion-plasma coatings on their quality. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2019, no. 4 (166), pp. 9–13. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-9-13.
13. Khamin O.N., Lavro V.N. The use of ion-plasma coatings for soldering titanium alloys with steels. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 4 (26). pp. 196–201.
14. Lavro V.N. Investigation of the influence of technological parameters of applying ion-plasma coatings on their quality. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2018, no. 4 (19), pp. 63–69.
15. Mukhin V.S., Budilov V.V., Shekhtman S.R. Methodology for creating coatings with improved performance properties and technologies for their application to the blades of a gas turbine engine compressor. *Vestnik UGATU*, 2012, no. 5 (50), art. 16, pp. 149–153.
16. Terukalova N.V., Novitskaya O.S., Sizova O.V. Microstructure and tribotechnical properties of multilayer CrN–TiN ion-plasma coatings. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2021, no. 12 (114), part 1, pp. 81–85. DOI: 10.23670/IRJ.2021.114.12.011.
17. Doronin O.N., Gorlov D.S., Azarovskiy E.N., Kochetkov A.S. Study of the structure and properties of a heat-resistant coating at high-temperature deformation of samples from titanium intermetallic alloy. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 26, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
18. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.

Информация об авторах

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Горлов Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чесноков Дмитрий Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Журавлева Полина Леонидовна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Иванов Иван Максимович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav V. Antipov, Deputy Director General for Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry S. Gorlov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry V. Chesnokov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Polina L. Zhuravleva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan M. Ivanov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.03.2023.
The article was submitted 15.02.2023; approved and accepted for publication after reviewing 01.03.2023.