

Научная статья

УДК 621.357.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ АБРАЗИВНО-ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Р.К. Салахова¹, А.Б. Тихообразов¹, Д.П. Фарафонов¹, Т.Б. Смирнова¹

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

Аннотация. Предложен электролитический способ осаждения композиционных абразивно-износостойких покрытий на основе никеля, содержащих в металлической матрице микрочастицы диоксида циркония дисперсностью 120–200 мкм. Разработаны установка нанесения никелевого абразивно-износостойкого покрытия и схема технологического процесса, обеспечивающая равномерное внедрение частиц в покрытие с формированием так называемого абразивного ножа. Представлены результаты металлографического исследования структуры, микрорентгеноспектрального анализа никелевой матрицы и испытаний покрытия на термоциклическую стойкость и врезание (истирание уплотнительного материала).

Ключевые слова: никелирование, абразивные микрочастицы, диоксид циркония, износостойкость, алитирование, термоциклическая стойкость, испытание на врезание

Для цитирования: Салахова Р.К., Тихообразов А.Б., Фарафонов Д.П., Смирнова Т.Б. Особенности электролитического осаждения абразивно-износостойких покрытий на основе никеля // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.

Scientific article

FEATURES OF ELECTROLYTIC DEPOSITION OF ABRASIVE-WEAR-RESISTANT NICKEL-BASED COATINGS

R.K. Salakhova¹, A.B. Tikhobrazov¹, D.P. Farafonov¹, T.B. Smirnova¹

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

Abstract. An electrolytic method of deposition of composite abrasive-wear-resistant coatings based on nickel containing microparticles of zirconium dioxide with a dispersion of 120–200 microns in a metal matrix is proposed. A device for the application of a nickel abrasive-wear-resistant coating and a technological process diagram have been developed, which ensures uniform introduction of particles into the coating with the formation of the so-called «abrasive knife». The results of a metallographic study of the structure, micro-x-ray spectral analysis of a nickel matrix and tests of the coating for thermal cyclic resistance and penetration (abrasion of the sealing material) are presented.

Keywords: nickel plating, abrasive microparticles, zirconium dioxide, wear resistance, aluminizing, thermal cyclic resistance, penetration test

For citation: Salakhova R.K., Tikhobrazov A.B., Farafonov D.P., Smirnova T.B. Features of electrolytic deposition of abrasive-wear-resistant nickel-based coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.

Введение

Для обеспечения мирового уровня и глобальной конкурентоспособности российских материалов и технологий необходим качественный скачок в области материаловедения. Это позволит достичь принципиально новых показателей и характеристик сложных технических систем, в том числе в области авиа- и двигателестроения [1, 2]. Авиационное двигателестроение является одной из отраслей, базирующихся исключительно на высоких технологиях и передовых достижениях науки. В связи с созданием газотурбинного двигателя (ГТД) пятого поколения актуальными задачами для обеспечения расчетного ресурса лопаток и других ответственных деталей компрессора является создание упрочняющих эрозионноустойчивых покрытий, работоспособных во всеклиматических условиях [3–5].

Одним из ключевых направлений деятельности НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) является разработка работающих в паре высокотемпературных истираемых уплотнительных и абразивно-износостойких покрытий, обеспечивающих существенное улучшение эксплуатационных характеристик газовых турбин при повышенных температурах и нагрузках, а также стойкость к коррозии, эрозии и износу. Внедрение новых упрочняющих покрытий для прирабатываемой пары системы уплотнения турбовинтовых двигателей (ТВД) позволит снизить расход топлива и повысить КПД благодаря уменьшению радиальных зазоров между кончиками лопаток и рабочими кольцами, а также зазоров в лабиринтных уплотнениях [6–8].

История ВИАМ в области разработки теплозащиты авиационной и ракетно-космической техники насчитывает десятилетия [9]. Наряду с ВИАМ наиболее значительных результатов в этой области изысканий достигли Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» [10]. В рамках поисковых и научно-исследовательских работ ученые ВИАМ на разных этапах неуклонно совершенствовали составы абразивно-износостойких материалов и способы осаждения покрытий данного функционального назначения, что позволило в настоящее время определиться с выбором наиболее эффективных теплозащитных материалов и технологий получения композиционных абразивно-износостойких покрытий. В качестве перспективных способов нанесения таких покрытий, работающих при температуре не менее 1000 °С, можно выделить следующие методы:

- детонационного напыления порошковых композиций на основе жаростойкого сплава системы Ni–Cr–Al, содержащего в качестве твердого наполнителя микрочастицы ZrO_2 – Y_2O_3 или Al_2O_3 ;

- пайки на рабочие поверхности деталей ротора пластин из композиционного абразивно-износостойкого материала, изготавливаемых горячим прессованием;

- электролитического осаждения композиционных никелевых покрытий, содержащих в качестве дисперсной фазы абразивные микрочастицы оксидов металлов.

Способ электроосаждения абразивно-износостойких покрытий имеет ряд преимуществ: отсутствует необходимость в последующей механической обработке покрытий заданной толщины; процесс электролиза не оказывает влияния на структуру материала детали и абразивных частиц, сохраняющих исходную осколочную форму с острыми гранями. В УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» накоплен опыт нанесения композиционно-кластерных гальванических покрытий на основе никеля и хрома из электролитов, содержащих смесь нано- и микрочастиц оксидов металлов, предназначенных для защиты от износа пар трения скольжения [11, 12]. Получению композиционных электролитических покрытий (КЭП) на основе никеля с включением добавок различной природы

(органических и неорганических) посвящено большое количество публикаций [13–15]. Выбор функционального наполнителя металлической матрицы для получения теплозащитных абразивно-износостойких никелевых покрытий прирабатываемой пары ТВД определяется сочетанием таких физико-механических свойств, как высокая твердость, термостойкость и повышенная химическая инертность к агрессивным средам [16]. Одним из таких материалов является диоксид циркония (ZrO_2) кубической фазы, который и использовали в качестве модифицирующей добавки композиционных никелевых покрытий. Наибольший интерес представляют кристаллы частично стабилизированного ZrO_2 как прочного и износостойкого материала. Диоксид циркония в метастабильных модификациях (тетрагональной и кубической) благодаря уникальному набору свойств является предметом достаточно большого числа исследований. Добавление к ZrO_2 стабилизирующих кубическую решетку оксидов металлов расширяет область стабильности кубической кристаллографической формы диоксида циркония от точки плавления до комнатной температуры. Это позволяет избежать изменений объема, связанных с фазовыми превращениями. Стабилизаторы помогают получить многофазный материал при комнатной температуре, в котором кубическая фаза (С) – главная, а моноклинная (М) и тетрагональная фазы (Т) – второстепенные [17, 18].

В данной статье рассмотрены особенности процесса электролитического осаждения композиционного абразивно-износостойкого покрытия на основе никеля с микрочастицами диоксида циркония кубической модификации дисперсностью 160–200 мкм, обеспечивающего получение прочно сцепленного покрытия с равномерно внедренными в никелевую матрицу абразивными частицами, и представлены результаты исследований эксплуатационных характеристик (циклическая термостойкость, абразивность) получаемых покрытий.

Материалы и методы

Композиционные никелевые покрытия осаждали на образцы из жаропрочных никелевых сплавов. Для отработки технологического процесса никелирования использовали образцы размером $10 \times 70 \times 2$ мм, для испытаний на термостойкость – образцы размером $30 \times 30 \times 2$ мм, для испытаний на врезание (абразивность) – кольца диаметром 70 мм с шестью прямоугольными в радиальном сечении стержнями площадью 9 мм^2 . Никелирование производили в электролите Уоттса (состав 1, ГОСТ 9.305–84), содержащем в качестве дисперсной фазы абразивные микрочастицы диоксида циркония кубической модификации, стабилизированного оксидом кальция ($ZrO_2\text{--CaO}$). Внешний вид порошка диоксида циркония представлен на рис. 1. Видно, что микрочастицы имеют осколочную форму, что является необходимым условием для формирования абразивной поверхности композиционного покрытия.

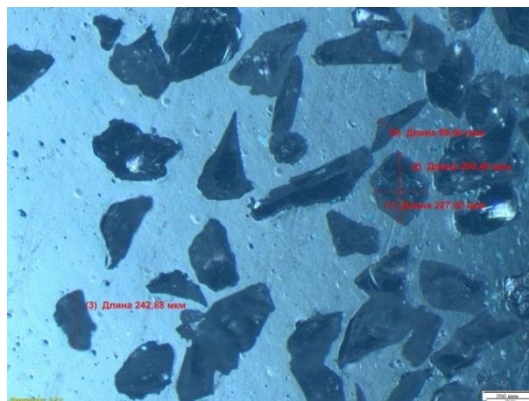


Рис. 1. Внешний вид микрочастиц диоксида циркония ($\times 25$)

С помощью ситового (гранулометрического) анализа отобраны фракции диоксида циркония дисперсностью 120–200 мкм; использовали вибрационные сита с сетками № 0100, № 0160 и № 0200 в соответствии с ГОСТ 6613–86.

Фазовый состав порошка определяли снятием рентгенограммы в монохроматическом $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано. Расшифровка дифрактограмм проведена с применением специализированной программы HighScore Plus и структурной базы данных PDF-2. Рентгеновскую съемку выполняли в диапазоне углов $2\theta = 20\text{--}120$ градусов (рис. 2).

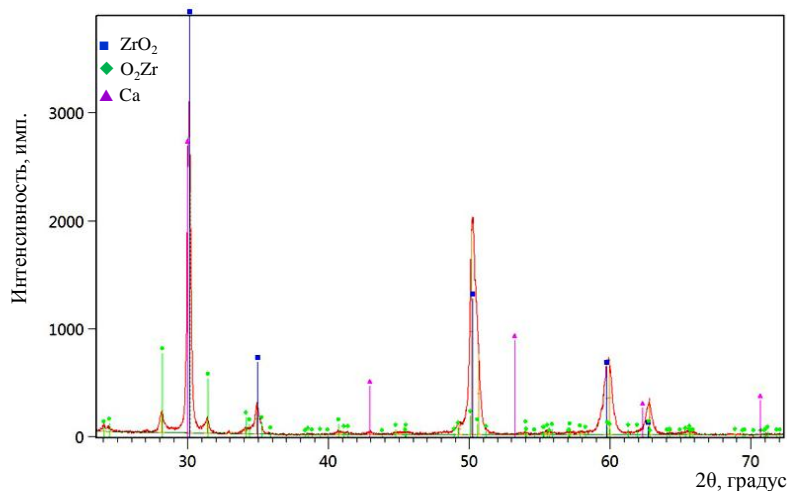


Рис. 2. Рентгенограмма стабилизированного кубического диоксида циркония $\text{ZrO}_2\text{--CaO}$

Установлено, что в пробе порошка $\text{ZrO}_2\text{--CaO}$ основной фазой является диоксид циркония ($\text{Fm}\bar{3}\text{m}$) с кубической кристаллической решеткой, вторыми фазами с линиями меньшей интенсивности – диоксид циркония с моноклинной решеткой ($\text{P}121/\text{c}1$) и Ca.

Толщину никелевых покрытий определяли металлографическим методом с использованием инвертируемого микроскопа Olympus GX-41. С помощью данного микроскопа также проводили оптическое исследование морфологии получаемых композиционных покрытий.

Прочность сцепления абразивно-износостойкого никелевого покрытия с подложкой оценивали методом изменения температур по ГОСТ 9.302–88 и методом удара на вертикальном копке Константа У-2М.

Для обеспечения адгезии осаждаемого покрытия к никелевому сплаву при высоких температурах выполнен термодиффузионный вакуумный отжиг образцов при температуре 900 °С.

Для повышения термостойкости никелированных образцов проведено порошковое термодиффузионное алитирование никелевого слоя по режимам, отработанным для алитирования жаропрочных никелевых сплавов типа ВЖМ4.

После алитирования покрытий выполнен микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) никелевой матрицы абразивно-износостойкого покрытия с использованием растрового электронного микроскопа Hitachi SU 8010.

Проведено испытание образцов с покрытием на термостойкость. Метод испытаний заключается в определении количества рабочих теплосмен, приводящих материал к разрушению. Под рабочей теплосменой подразумевают цикл нагрева материала до заданной температуры с последующим его охлаждением до температуры окружающей среды. За показатель термостойкости принимают число теплосмен до начала образования

хорошо различимых невооруженным глазом трещин на поверхности или отслоений покрытия от подложки. Образцы с нанесенным абразивно-износостойким покрытием загружали на специальном поддоне в камерную высокотемпературную электропечь, нагретую до температуры 1300 °С, и выдерживали при этой температуре в течение 5 мин. Затем выгруженные из печи образцы охлаждали струей сжатого воздуха с помощью специального приспособления, обеспечивающего их равномерный обдув. Образцы считают выдержавшими испытание на термостойкость в том случае, если при количестве циклов 20 ± 1300 °С не менее 100 на них не будут обнаружены видимые разрушения и отслаивания от подложки.

Испытания на врезание абразивного покрытия в уплотнительный материал проводили на смонтированной на базе испытательной машины ИМ-58 лабораторной высокоскоростной установке при торцевом трении подвижного (абразивно-износостойкий материал) и неподвижного образцов (истираемый материал). В качестве истираемого материала для проведения испытаний использовали высокотемпературные керамические покрытия на основе $ZrO_2-Y_2O_3$, которые наносили методом газотермического напыления.

С учетом того, что в реальных условиях эксплуатации площадь торцов лопаточного диска составляет ~10 % от ометаемой площади, на образце, имитирующем материал лопатки, предусмотрены вместо сплошного кольца шесть прямоугольных в радиальном сечении стержней площадью 9 мм².

За результаты испытаний на врезание принимали линейный износ гребешков контртела, максимальную глубину дорожки трения истираемого уплотнительного материала и состояние поверхностей трения, определяемое визуально. Оптимальное соотношение износов истираемого уплотнительного покрытия на основе керамики к абразивно-износостойкому материалу (КЭП на основе никеля), обеспечивающее повышенный ресурс прирабатываемой пары, должно быть не менее 2:1.

Результаты и обсуждение

Суть электролитического способа получения композиционного абразивно-износостойкого покрытия заключается в равномерном заравнивании абразивных частиц в никелевой матрице. При этом острые грани микрочастиц должны выступать над поверхностью покрытия и формировать так называемый абразивный нож [19, 20].

Оптимальная концентрация микрочастиц в электролите-суспензии, обеспечивающая их седиментационную и коагуляционную устойчивость при перемешивании, а также равномерное распределение частиц в никелевой матрице (расстояние между частицами в покрытии соизмеримо с размером частиц), составила 100 г/л. При увеличении концентрации вводимых микропорошков происходят агломерация частиц и их седиментация.

Для получения прочно сцепленного с основой покрытия образцы из никелевого сплава подвергали пескоструйной обработке электрокорундом марки 25А F100 при давлении сжатого воздуха 2,5–3 ат и активации в смеси кислот $HCl + H_2SO_4$ (100 г/л) в течение 1 мин.

После подготовки поверхности образцов под покрытие выполнено предварительное никелирование в электролите-суспензии без перемешивания (частицы на дне ванны) для получения подслоя чистого никеля с целью закрепления, внедрения и заравнивания частиц в никелевой матрице при последующем никелировании в электролите-суспензии с перемешиванием электролита. Образцы размещали в электролите под током, угол наклона образца к горизонту составлял 45 градусов. Рабочий

режим никелирования согласно ГОСТ 9.305–84 следующий: рН электролита 4,2–5,8; температура 20–55 °С, плотность тока 2,5–5 А/дм².

Схема установки никелирования представлена на рис. 3, операции технологического процесса осаждения абразивно-износостойкого никелевого покрытия приведены в табл. 1.

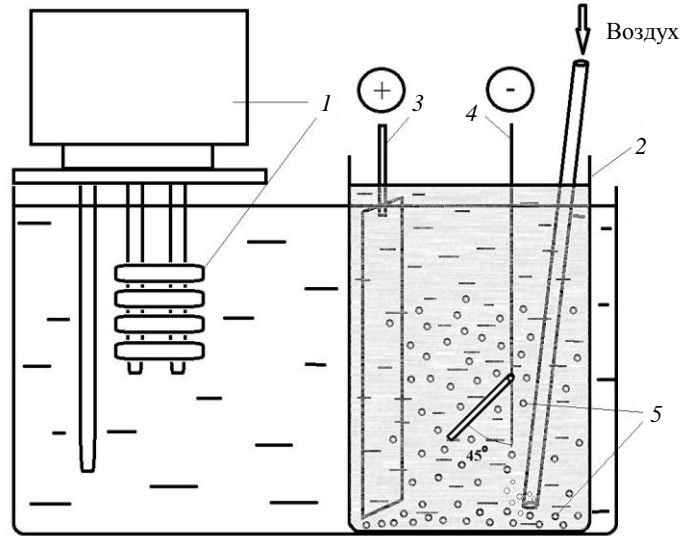


Рис. 3. Схема установки нанесения никелевого абразивно-износостойкого покрытия: 1 – водяная баня; 2 – емкость для электролита-суспензии (электролизер); 3 – никелевый анод; 4 – катод (образец); 5 – микрочастицы диоксида циркония

Таблица 1

Технологические операции процесса осаждения абразивно-износостойкого никелевого покрытия

Технологическая операция	Продолжительность обработки	Толщина покрытия, мкм (не более)
Предварительное никелирование (получение подслоя чистого никеля)	15–20 мин	20
Никелирование с перемешиванием (взмучивание частиц)	5–10 с	85
Никелирование без перемешивания	1,5–2,5 ч	

На рис. 4 представлена морфология поверхности образцов с никелевым композиционным покрытием.

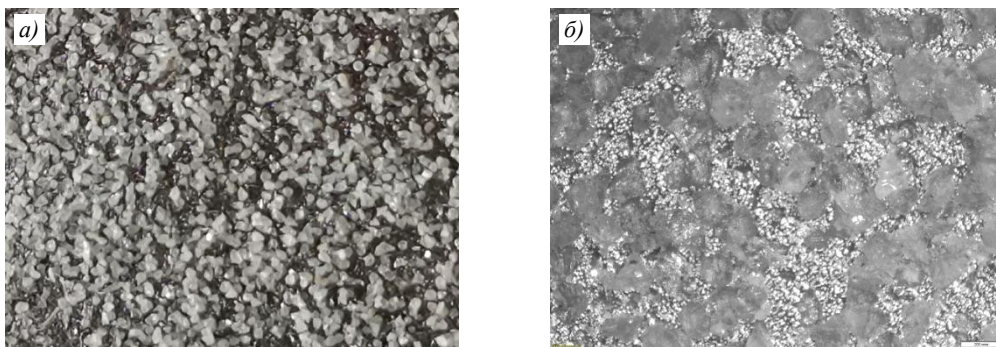


Рис. 4. Морфология поверхности (а – ×10; б – ×25) композиционного абразивно-износостойкого никелевого покрытия с микрочастицами диоксида циркония

Толщину покрытия и равномерность внедрения микрочастиц диоксида циркония в никелевую матрицу контролировали на поперечном шлифе с помощью микроскопа Olympus GX-41 (рис. 5). Для прочного сцепления с матрицей микрочастицы должны внедряться в покрытие не менее чем на 1/3 своей высоты. Допускается полное зарастание в покрытие единичных мелких микрочастиц.

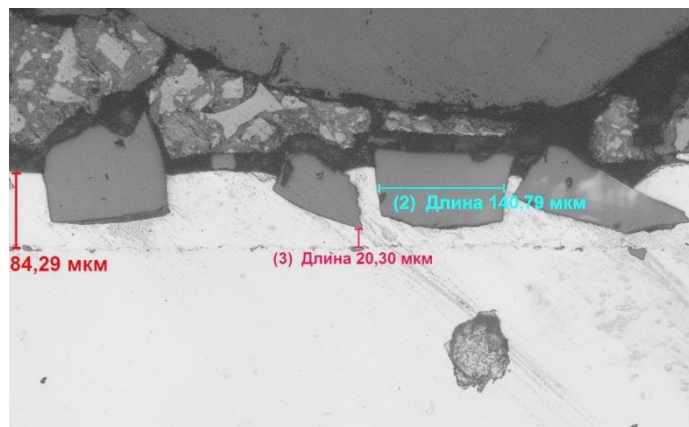


Рис. 5. Поперечный шлиф ($\times 200$) композиционного никелевого покрытия

Адгезию композиционного никелевого покрытия к основе оценивали методом изменения температур и методом удара с применением вертикального копра Константа У-2М. Установлено, что прочность сцепления никелевого покрытия, измеренная методом изменения температур, соответствует требованию ГОСТ 9.302–88 (отсутствие вздутий и отслаиваний). Испытание методом удара показало, что композиционное никелевое покрытие выдерживает энергию удара не менее 9,8 Дж.

Для улучшения эксплуатационных характеристик полученного композиционного никелевого покрытия проведен термодиффузионный вакуумный отжиг при температуре 850–900 °С.

С целью повышения жаростойкости абразивно-износостойкого никелевого покрытия выполнено алитирование никелевого слоя по режимам, отработанным для алитирования жаропрочных никелевых сплавов.

Комбинированное абразивно-износостойкое покрытие с алюминидным слоем представлено на рис. 6.

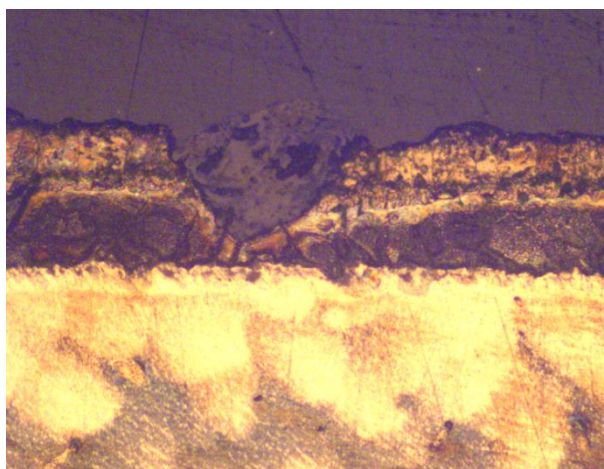


Рис. 6. Поперечный шлиф ($\times 500$) комбинированного абразивно-износостойкого покрытия на основе никеля (травленный)

На рис. 7 представлены результаты МРСА никелевой матрицы абразивно-износостойкого покрытия, которые свидетельствуют о диффузии алюминия в никелевый слой на всю его толщину. По-видимому, часть алюминия образует с никелем твердый раствор, а часть идет на образование фаз типа Ni_3Al и $NiAl$. При этом содержание алюминия в матрице покрытия изменяется от 2–3 % в зоне соединения с подложкой до 18–20 % у внешней поверхности покрытия.

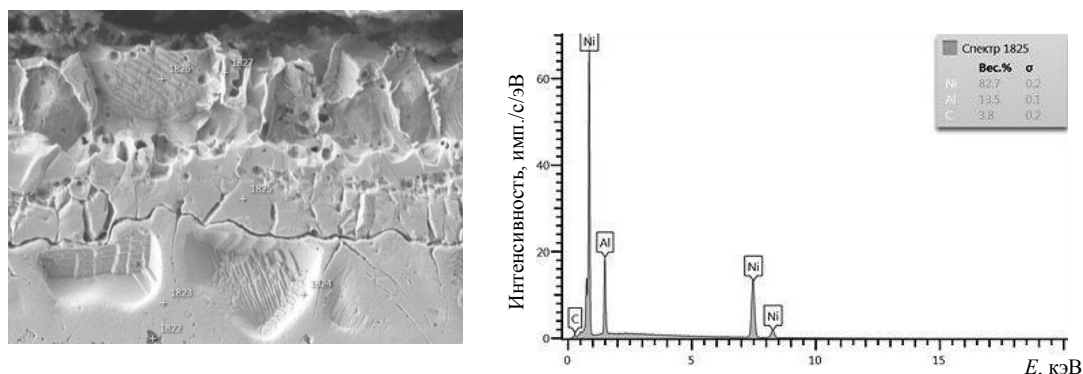


Рис. 7. Результаты микрорентгеноспектрального анализа матрицы абразивно-износостойкого покрытия после алитирования

По методике, представленной ранее, образцы с полученным комбинированным покрытием $Ni-ZrO_2 + Al$ испытаны на термоциклическую стойкость. По результатам испытания на термостойкость определяют способность материалов противостоять отрицательному воздействию теплосмен. Повторяющиеся теплосмены нарушают качество уплотнений проточной части ГТД, вызывают появление поверхностных и внутренних трещин, а в дальнейшем приводят к короблению и отслаиванию уплотнительного материала и покрытий от подложки. Термостойкость характеризует способность материала сохранять прочность и форму деталей при теплосменах [8, 21]. Испытания образцов прекращают после выполнения следующих условий: количество теплосмен – 100, состояние образцов – без разрушений и отслаиваний покрытий от подложки. Выдержка в 100 циклов $20 \leftrightarrow 1300$ °C принята за критерий термостойкости высокотемпературных материалов с рабочей температурой до 1300 °C.

Функциональное назначение никелевого покрытия, модифицированного микрочастицами диоксида циркония, как абразивно-износостойкого подтверждено результатами испытаний на врезание на лабораторной установке торцевого трения прирабатываемой пары «истираемый материал/контртело». Для проведения испытаний использовали кольца из жаропрочного никелевого сплава с истираемыми керамическими покрытиями, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты испытаний на врезание пары
«керамическое истираемое покрытие/контртело»**

Материал контртела	Соотношение износов истираемого материала к контртелу	Глубина врезания (канавки в истираемом материале), мм
Никелевый сплав с абразивно-износостойким электролитическим покрытием с частицами диоксида циркония	(2–3):1	0,5–0,7
Никелевый сплав	(1–1,5):1	0,2–0,3

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что нанесение абразивно-износостойких электролитических покрытий с частицами ZrO_2 на никелевые сплавы улучшает эксплуатационные характеристики прирабатываемых пар в 1,5–2 раза, исключает явление переноса материала контртела при врезании на поверхность истираемого покрытия, приводящее к значительному перегреву контртела и повышению его износа (рис. 8).

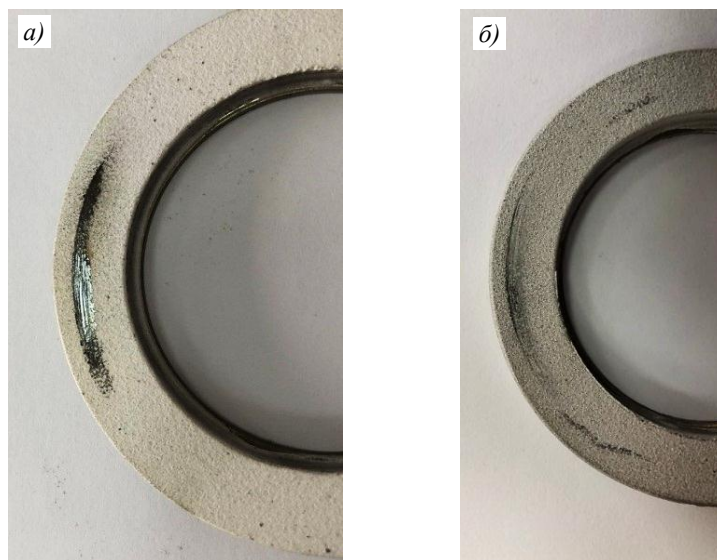


Рис. 8. Внешний вид поверхности истираемого керамического покрытия после испытаний на врезание: *a* – в паре с образцом из никелевого сплава (перенос материала контртела на истираемое покрытие); *б* – в паре с абразивно-износостойким материалом (перенос материала отсутствует)

Заключения

Предложен способ электролитического осаждения абразивно-износостойких композиционных покрытий на основе никеля, обеспечивающий равномерное внедрение в металлическую матрицу микрочастиц диоксида циркония кубической модификации.

Комбинированное покрытие $Ni-ZrO_2 + Al$ характеризуется термоциклической стойкостью, образцы выдержали испытание 100 циклов 20 ± 1300 °С без образования трещин и отслоений покрытий от подложек.

Анализ проведенных испытаний на врезание показал, что нанесение никелевых абразивно-износостойких покрытий на жаропрочные сплавы на основе никеля повышает истирание уплотнительного материала в 1,5–2 раза, что обеспечивает улучшение эксплуатационных характеристик прирабатываемой пары.

Абразивно-износостойкое электролитическое никелевое покрытие может быть рекомендовано в качестве упрочняющего покрытия торцов рабочих лопаток турбины ГТД.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // Деловая слава России. 2013. № 2. С. 4–9.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбин высокого давления перспективных ГТД // Металлы. 2012. № 1. С. 5–13.

4. 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.
5. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании авиационных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Сараев А.А., Лещев Н.Е. Истираемость и коррозионная стойкость уплотнительных материалов проточной части ГТД // *Труды ВИАМ*. 2018. № 8 (68). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
7. Ивахненко Ю.А., Баруздин Б.В., Варрик Н.М., Максимов В.Г. Высокотемпературные волкнистые уплотнительные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 272–289. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289.
8. Фарафонов Д.П., Лещев Н.Е., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Артеменко Н.И. Абразивно-износостойкие материалы для уплотнений проточной части ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
9. Балашова Ю.А., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Бабашов В.Г. и др. Высокотемпературные теплозащитные керамические и металлокерамические композиционные материалы для авиационной техники нового поколения // *Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2020. № 2 (33). С. 83–92.
10. Барвинок В.А., Шитарев И.А., Богданович В.И., Докукина И.А. и др. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2009. № 3 (19). С. 11–28.
11. Салахова Р.К., Семенычев В.В., Тюриков Е.В. Технологические особенности осаждения композиционно-кластерных гальванических покрытий на основе никеля и хрома (III) // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. № 6. С. 82–87.
12. Салахова Р.К., Семенычев В.В., Тихообразов А.Б. Исследование гальванических композиционных покрытий металлофизическими методами // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2013. Т. 21. № 3. С. 45–49.
13. Хайбиева В.Ш., Фомина Г.Г., Сайфуллин Р.С. и др. Исследование влияния ZrO_2 различной дисперсности на электроосаждение никелевых покрытий и их свойства // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 9. С. 129–131.
14. Целуйкин В.Н. Композиционные электрохимические покрытия: получение, структура, свойства // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2009. Т. 45. № 3. С. 287–301.
15. Целуйкин В.Н., Яковлев А.В. Об электрохимическом осаждении и свойствах композиционных покрытий на основе никеля // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2020. Т. 56. № 2. С. 197–201.
16. Горохова Е.О., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е. Синтез, структура и свойства кристаллов диоксида циркония, легированных ионами Yb^{3+} // *Успехи в химии и химической технологии*. 2016. Т. 30. № 3. С. 123–125.
17. Кузнецова Л.И., Обухова А.В., Бондаренко Г.Н., Фетисова О.Ю. и др. Структурные свойства и состояние поверхностного слоя диоксида циркония, модифицированного катионами Me^{3+} // *Журнал физической химии*. 2018. Т. 92. № 9. С. 1470–1477.
18. Девойно О.Г., Оковитый В.В. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью // *Наука и техника*. 2015. № 1. С. 35–39.
19. Abrasive ceramic matrix turbine blade tip and method for forming: pat. 5952110 US; filed 12.24.96; publ. 09.14.99.
20. Gas-turbine engine sealing device (versions), gas-turbine engine blade and gas-turbine engine sharp edge: pat. 2 229031 RU; filed 11.24.98; publ. 05.20.04.
21. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б. Термостойкость электролитических хромовых покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67.

References

1. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
2. Kablov E.N. Materials are the basis of any business. *Delovaya Slava Rossii*, 2013, no. 2, pp. 4–9.
3. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-shielding coatings for high-pressure turbine blades of advanced gas turbine engines. *Metaly*, 2012, no. 1, pp. 5–13.
4. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
6. Farafonov D.P., Migunov V.P., Sarayev A.A., Leshchev N.E. Abradability and erosion resistance of seals in turbine engine air-gas channel. *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
7. Ivakhnenko Yu.A., Baruzdin B.V., Varrik N.M., Maksimov V.G. High-temperature fibrous sealing materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, No. S, pp. 272–289. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289.
8. Farafonov D.P., Leshchev N.E., Afanasiev-Khodykin A.N., Artemenko N.I. Abrasive wear-resistant seal materials of the gas turbine engine flow section. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, No. 3 (56), pp. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
9. Balashova Yu.A., Grashchenkov D.V., Shavnev A.A., Babashov V.G. High-temperature heat-shielding ceramic and metal-ceramic composite materials for a new generation of aircraft. *Vestnik kontserna VKO «Almaz-Antey»*, 2020, no. 2 (33). pp. 83–92.
10. Barvinok V.A., Shitarev I.A., Bogdanovich V.I., Dokukina I.A. and others. Triggered, wear-resistant and heat-shielding coatings for parts of the gas path of the turbine, compressor and combustion chamber of the gas turbine engine. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2009, no. 3 (19). pp. 11–28.
11. Salakhova R.K., Semenychev V.V., Tyurikov E.V. Technological features of deposition of composite-cluster galvanic coatings based on nickel and chromium (III). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2013, vol. 15, no. 6, pp. 82–87.
12. Salakhova R.K., Semenychev V.V., Tikhobrazov A.B. Study of galvanic composite coatings by metal-physical methods. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 45–49.
13. Khaibieva V.Sh., Fomina G.G., Saifullin R.S. et al. Investigation of the influence of ZrO₂ of various dispersions on the electrodeposition of nickel coatings and their properties. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 9, pp. 129–131.
14. Tseluykin V.N. Composite electrochemical coatings: obtaining, structure, properties. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 287–301.
15. Tseluykin V.N., Yakovlev A.V. On electrochemical deposition and properties of nickel-based composite coatings. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 197–201.
16. Gorohova E.O., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E. Synthesis, structure and properties of zirconium dioxide crystals doped with Yb³⁺ ions. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2016, vol. 30, no. 3, pp. 123–125.
17. Kuznetsova L.I., Obukhova A.V., Bondarenko G.N., Fetisova O.Yu. Structural properties and state of the surface layer of zirconium dioxide modified with Me³⁺ cations. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2018, vol. 92, no. 9, pp. 1470–1477.
18. Devoino O.G., Okovity V.V. Plasma heat-shielding coatings based on zirconium dioxide with increased thermal stability. *Nauka i tekhnika*, 2015, no. 1, pp. 35–39.

19. *Abrasive ceramic matrix turbine blade tip and method for forming*: pat. 5952110 US; filed 12.24.96; publ. 09.14.99.
20. *Gas-turbine engine sealing device (versions), gas-turbine engine blade and gas-turbine engine sharp edge*: pat. 2229031RU; filed 11.24.98; publ. 05.20.04.
21. Salakhova R.K., Tikhobrazov A.V. Thermal resistance of electrolytic chromium coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67.

Информация об авторах

Салахова Роза Кабировна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Тихообразов Андрей Борисович, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фарафонов Дмитрий Павлович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Смирнова Татьяна Борисовна, инженер-технолог 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Roza K. Salakhova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey B. Tikhobrazov, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry P. Farafonov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatiana B. Smirnova, First category engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.12.2021.
The article was submitted 06.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 13.12.2021.