

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья  
УДК 621.7

### ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ДУПЛЕКСНЫХ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ TiZrAlN ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Сергей Николаевич Григорьев<sup>1</sup>, Марина Александровна Волосова<sup>2</sup>, Надежда Александровна Сухова<sup>3</sup>, Семен Романович Шехтман<sup>4</sup>✉

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

Москва, Россия

<sup>1</sup> s.grigoriev@stankin.ru

<sup>2</sup> m.volosova@stankin.ru

<sup>3</sup> nad\_suhova@mail.ru

<sup>4</sup> shex@inbox.ru ✉

**Аннотация.** Разработана технология синтеза дуплексных вакуумно-плазменных покрытий системы TiZrAlN для деталей авиационных двигателей и энергоустановок, включающая в себя последовательно выполняемые процессы ионно-плазменного азотирования поверхностного слоя и синтеза многослойного покрытия с ионным ассистированием и сепарацией потока плазмы в одном операционном пространстве. Реализация технологии синтеза дуплексных покрытий осуществлялась с помощью плазменного источника с накальным катодом, помещенного на модернизированной ионно-плазменной установке камерного типа ННВ 6.6 – И1, и системы магнитно-дуговой фильтрации электродугового испарителя с Al-катодом. Представлены физико-механические и эксплуатационные свойства многослойных и дуплексных вакуумно-плазменных покрытий, синтезированных с ионным ассистированием и сепарацией потока плазмы. Приведены результаты экспериментальных исследований микротвердости, адгезионной прочности и коррозионной стойкости многослойных и дуплексных покрытий, сформированных на поверхности образцов из сплава ВТ8 вакуумно-плазменным методом в условиях плазменного ассистирования. Показано, что дуплексные покрытия по сравнению с многослойным покрытием имеют более высокую микротвердость благодаря с нанесению покрытия на уже упрочненную ионно-плазменным азотированием поверхность. Установлено, что дуплексное покрытие, синтезированное по разработанной технологии, имеет более высокую стойкость к коррозии и адгезионную прочность по сравнению с многослойным вакуумно-плазменным покрытием и дуплексным покрытием, синтезированным без сепарации плазменного потока.

**Ключевые слова:** вакуумно-плазменные покрытия, дуплексные покрытия, ионное ассистирование, магнитно-дуговая фильтрация, азотирование

**Финансирование:** настоящие исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект № FSFS-2021-0003).

**Для цитирования:** Григорьев С.Н., Волосова М.А., Сухова Н.А., Шехтман С.Р. Технология синтеза дуплексных вакуумных ионно-плазменных покрытий системы TiZrAlN для деталей энергоустановок // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 201–208.

# MACHINE-BUILDING ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

## DUPLEX VACUUM ION-PLASMA COATINGS SYNTHESIS TECHNOLOGY OF THE TiZrAlN SYSTEM FOR ENERGY INSTALLATIONS PARTS

Sergei N. Grigor'ev<sup>1</sup>, Marina A. Volosova<sup>2</sup>, Nadezhda A. Sukhova<sup>3</sup>, Semen R. Shekhtman<sup>4</sup>✉

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Moscow State University of Technology "STANKIN",

Moscow, Russia

<sup>1</sup> s.grigoriev@stankin.ru

<sup>2</sup> m.volosova@stankin.ru

<sup>3</sup> nad\_suhova@mail.ru

<sup>4</sup> shex@inbox.ru ✉

### Abstract

The article considers the up-to-date problem of the power plant parts resource enhancing. One of this problem solution consists in synthesis of duplex coatings, representing multi-layer coatings being created by successive surface modification, and coating precipitation in the unitary operational space. The surface layer ion-plasma nitration in the plasma of non-self-maintained high-current discharge, generated by the "PINK" plasma generator is employed as a surface modification method. A method of condensation with ion bombardment is applied as a plasma-ion method for protective coatings obtaining. The authors proposed obtaining duplex coatings of the TiZrAlN system on the HNV 6.6-11 modernized chamber-type installation equipped with the electric arc evaporators with Ti, Zr and Al cathodes.

With a view to vacuum ion-plasma coatings with the complex of enhanced operational properties creating a technology for duplex coatings of the TiZrAlN system, including successive employment of ion-plasma nitration and ion-plasma deposition in the unitary operational space was created. These two technological processes combining in the unitary operational space is performed without vacuum chamber depressurizing and overloading substrates being processed. The TiZrAlN system coatings synthesis was being performed under conditions of plasma assisting by the "PINK" plasma generator. A system of the magnetic-arc filtration for the electric arc evaporator with Al-cathode is being employed while coatings deposition, which allows accomplishing separation of the drop phase of low-melting aluminum, and contributes to substantial drop phase reduction in the coating and initial substrate roughness retention.

Samples of the 20 mm diameter and 3 mm height were obtained for studying micro-hardness, adhesive strength and corrosion resistance. The studies of the duplex coating of the TiZrAlN system synthesized by the developed technology were being performed in comparison with the multi-layer coating obtained by the vacuum ion-plasma method, as well as with the duplex coating obtained by successive pursuance of the ion-plasma nitration, and synthesis of the vacuum-ion coating (without plasma current separation).

The synthesized coatings surface micro-hardness measuring revealed that duplex coatings micro-hardness was higher compared to the multilayer coating, which is being associated with the coating surface layer application on the surface already strengthened by the ion-plasma nitration. Surface micro-hardness of the duplex coating being synthesized, obtained without plasma separation was 45.2 GPa, 46.6 GPa fabricated by the developed technology, while the multi-layer coating micro-hardness was 35.3 GPa.

The study of micro-photos of scratches and profile protocols of the fracture zones obtained while scratch-testing revealed that duplex coatings synthesized by the developed technologies was being characterized by the enhanced adhesive strength. Loading of the first cracks origination in the duplex coatings is 20 mN, whereas the one of multilayer coatings is 14.83 mN.

Corrosion rate studies revealed that with the duplex coating with plasma flux separation it was 11.7% less than the samples with duplex coating without plasma flux separation and 30.1% less than for the samples with multilayer coating. Consequently, the surface of the coating synthesized by the developed technology is more passive, which indicates its higher corrosion resistance.

The conducted studies results confirmed the prospective of the developed technology of duplex coatings synthesis application for the power plants parts protection from abrasive, corrosive and erosion impacts.

**Keywords:** vacuum-plasma coatings, duplex coatings, ion assisting, magnetic arc filtering, nitriding

**Funding:** the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State assignment in the field of scientific activity (project No. FSFS-2021-0003).

**For citation:** Grigor'ev S.N., Volosova M.A., Sukhova N.A., Shekhtman S.R. Duplex Vacuum Ion-Plasma Coatings Synthesis Technology of the TiZrAlN System for Energy Installations Parts. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 201-208.

## Введение

Всё более высокие требования, предъявляемые к надежности основных деталей и узлов авиадвигателей и энергоустановок, при одновременном ужесточении условий их эксплуатации, диктуют необходимость внедрения новых технологических решений и технологий, основанных на высокоэффективных методах обработки [1, 2]. В сложившихся условиях производства для повышения эксплуатационных свойств ответственных деталей энергетических установок все большее применение находят вакуумно-плазменные технологии создания различного типа защитных покрытий [3–8].

В последние годы среди наиболее интенсивно развивающихся вакуумных ионно-плазменных технологий нанесения защитных покрытий особый интерес вызывают технологии синтеза дуплексных покрытий, представляющих собой многослойные покрытия, создаваемые путем последовательной модификации поверхности и осаждения покрытия в одном операционном пространстве [5, 9–14].

В качестве метода модификации поверхности наиболее широко применяется метод ионного азотирования, повышающий твердость упрочненной поверхности, коррозионную стойкость, сопротивление усталости и износостойкость. Современные методы азотирования от простого ионного азотирования до ионно-плазменного азотирования и азотирования в скрещенных магнитных и электрических полях позволяют не только получить вышеперечисленные свойства, но и значительно сократить время обработки, увеличить толщину модифицированного слоя, обеспечить получение диффузионных слоев требуемого состава и строения, повысить чистоту поверхности и эксплуатационные свойства [6, 15–20].

Наиболее эффективным вакуумным ионно-плазменным методом получения покрытий является метод конденсации с ионной бомбардировкой. Данный метод позволяет синтезировать покрытия с повышенной твердостью и прочностью, высокой трещиностойкостью, эрозионной и коррозионной стойкостью, стойкостью к абразивному и фреттинг-износу [2, 7, 13–18].

Несмотря на значительный интерес к возможностям дуплексных покрытий, синтезируемых вакуумно-плазменными методами, поиск технических решений по разработке эффективных способов и процессов синтеза дуплексных покрытий, обладающих комплексом высоких защитных свойств и обеспечивающих надежность и долговечность деталей энергетических установок, является актуальной задачей.

На сегодняшний день в практике защиты поверхности от агрессивного воздействия хорошо зарекомендовали себя вакуумно-плазменные покрытия на основе Al и Ti, позволяющие повысить прочность, тепло-, жаро- и износостойкость [5, 7]. Однако такие покрытия характеризуются недостаточной стойкостью к коррозии [1, 11, 12, 21]. Добавление в композицию покрытия коррозионно-стойкого циркония позволяет повысить антикоррозионные свойства поверхностного слоя.

Целью работы является исследование и разработка технологии синтеза дуплексных покрытий системы TiZrAlN путем последовательного азотирования в плазме диффузионного разряда и вакуумно-плазменного напыления.

## Методы и материалы

Нанесение дуплексных вакуумных ионно-плазменных покрытий (ВИП-покрытий) системы TiZrAlN осуществлялось на модернизированной установке камерного типа ННВ 6.6–И1, оснащенной тремя торцевыми электродуговыми испарителями с Ti-, Zr- и Al-катадами. Модернизация заключалась в установке плазмогенератора ПИНК, позволяющего создавать плазму повышенной плотности и однородности, а также системы магнитно-дуговой фильтрации, позволяющей значительно снизить капельную фазу в покрытиях. В качестве реакционного газа использовали N<sub>2</sub>. Для получения многослойной структуры с равномерным распределением толщины слоев покрытия образцы располагались на рабочем столе установки и при нанесении покрытий равномерно планетарно вращались относительно оси стола и собственной оси.

В качестве подложек использовались цилиндрические образцы диаметром 20 мм и толщиной 3 мм,

изготовленные из наиболее распространенного в энергомашиностроении титанового сплава ВТ 8 (шероховатость поверхности  $Ra = 1,6$  мкм).

Предварительная подготовка поверхности подложек заключалась в химической очистке ацетоном в вытяжном шкафу и очистке в ультразвуковой мойке.

Для определения толщины покрытий использовался прибор Calotest Industrial CSM Instruments. Для оценки адгезионной прочности покрытий применялся метод царапания (scratch-test) на установке CSEM Micro Scratch Tester. Микротвердость образцов с покрытием определялась с помощью микротвердомера ПМТ-3. Коррозионная стойкость образцов с покрытием исследовалась весовым методом согласно ГОСТ 30630.2.5–2013 с использованием аналитических весов OHAUS PA64C и электрохимическим методом.

### Вакуумно-плазменная технология синтеза дуплексных покрытий системы TiZrAlN

С целью создания ВИП-покрытий с комплексом повышенных эксплуатационных свойств была разработана технология синтеза дуплексных покрытий

системы TiZrAlN, включающая последовательное применение в одном операционном пространстве ионно-плазменного азотирования и вакуумно-плазменного напыления (рис. 1).

Совмещение двух технологических процессов в одном операционном пространстве происходит без разгерметизации вакуумной камеры и без перегрузки обрабатываемых подложек.

На первом этапе создания дуплексного покрытия проводится ионно-плазменное азотирование поверхности плазмой несамостоятельного сильно-точного диффузионного разряда, создаваемой плазмодогенератором ПИНК. Данный процесс включает следующие действия: предварительную обработку, заключающуюся в ионной очистке поверхности и ее активации; ионно-плазменное азотирование поверхности подложки.

Ионная очистка поверхности и ее активация с целью очистки поверхностного слоя от загрязнений и создания активных центров адсорбции проводится непосредственно в вакуумной камере после создания предварительного давления. В качестве рабочего газа используется инертный газ аргон. Давление в вакуумной камере  $5,2 \cdot 10^{-2}$  Па.

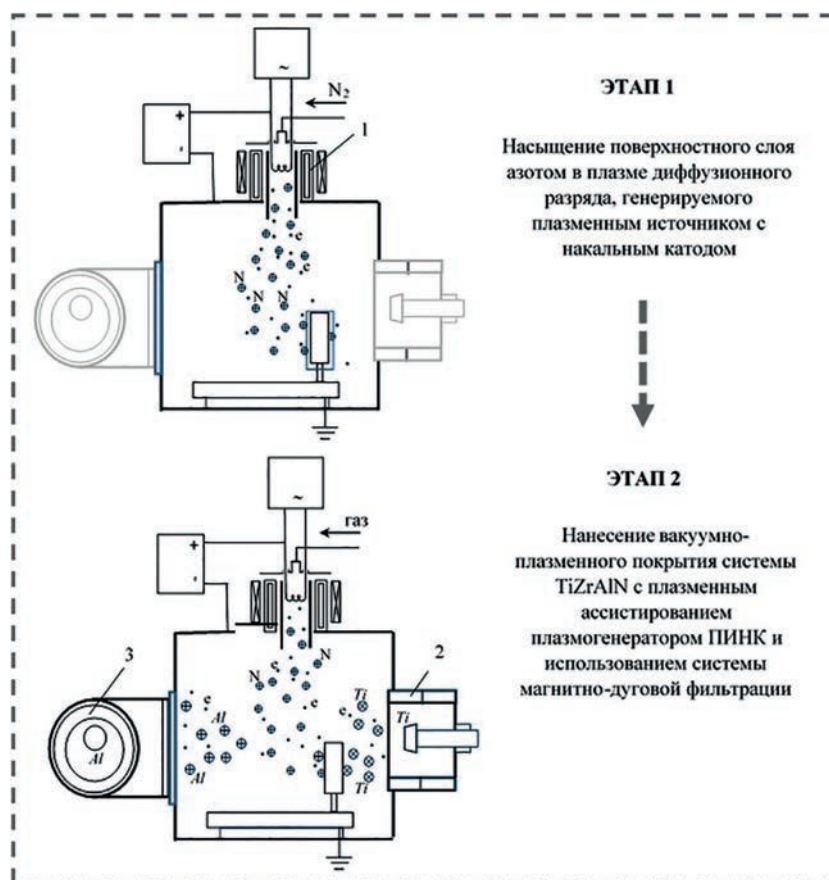


Рис. 1. Технологическая схема синтеза дуплексных покрытий:  
1 – плазмодогенератор ПИНК; 2 – электродуговой испаритель;  
3 – система магнитно-дуговой фильтрации Al-катода



На подложку подается отрицательное смещение 900–1000 В.

Очистка низкоэнергетическими ионами аргона поверхности в плазме несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда позволяет получить атомарно чистую поверхность без нагрева подложки по глубине и исключить привязывание микродуг к поверхности, а также снизить температуру предварительного нагрева. Время обработки 3–5 мин.

Процесс ионно-плазменного азотирования поверхности осуществляется при температуре 600°C, которая контролируется пирометром, расположенным на внешнем держателе у смотрового окна вакуумной камеры. Длительность процесса ионно-плазменного азотирования составляет 60 мин. В качестве реакционного газа применяется азот. Давление в камере 0,2 Па, ток накала 120 А и ионный ток 5 А, напряжение смещения 1000 В, импульсный режим работы источника опорного напряжения, частота 25 кГц и скважность 80%. Ионное азотирование позволит сократить длительность технологического цикла, обеспечить равномерность распределения концентрации азота по толщине упрочненного слоя, значительно снизить температуру процесса за счет ускорения процесса диффузии азота в подложку. В отличие от ионного азотирования в тлеющем разряде, ионно-плазменное азотирование в несамостоятельном сильноточном диффузионном разряде позволяет исключить образование дефектов во время возможного срыва аномального тлеющего разряда в дугу и повысить качество модифицированной поверхности за счет сохранения структуры в объеме материала благодаря реализации процесса при более низких температурах.

На втором этапе создания дуплексного покрытия наносится многослойное ВИП-покрытие системы TiZrAlN с плазменным ассистированием источником ПИНК и использованием системы магнитно-дуговой фильтрации для электродугового испарителя с Al-катодом. Длительность процесса осаждения покрытий составляет 60 мин. Давление в камере 0,133 Па, потенциал на подложке Ti – 160 В, Zr – 120 В, Al – 80 В, ток дуги электродуговых испарителей 100 А. Ток плазмодгенератора 10 А. Толщина синтезированного покрытия  $3 \pm 0,1$  мкм.

Синтез покрытия системы TiZrAlN в условиях плазменного ассистирования источником ПИНК позволяет предотвратить рост столбчатой структуры покрытия, снизить плотность дефектов и внутренних напряжений в поверхностном слое [11, 12].

Использование при нанесении покрытий системы магнитно-дуговой фильтрации для электродугового испарителя с Al-катодом позволяет осуществлять сепарацию капельной фазы легко-

плавкого алюминия и способствует значительному уменьшению капельной фазы в покрытии и сохранению исходной шероховатости подложки.

Процесс синтеза дуплексных покрытий завершается охлаждением подложки совместно с вакуумной камерой в течение 30–40 мин.

### Результаты и их обсуждение

Свойства дуплексных покрытий, нанесенных по разработанной технологии, исследовались в сравнении с многослойным покрытием, полученным вакуумно-плазменным методом, а также с дуплексным покрытием, полученным путем последовательного ионно-плазменного азотирования и синтеза ВИП-покрытия (без сепарации плазменного потока). Все рассматриваемые технологии синтеза покрытия системы TiZrAlN предусматривали реализацию процесса в условиях ионного ассистирования плазмодгенератором ПИНК. Параметры процессов нанесения ВИП-покрытия системы TiZrAlN на поверхности образцов были идентичны.

В ходе измерения микротвердости поверхности синтезируемых покрытий установлено, что дуплексные покрытия по сравнению с многослойным покрытием имели более высокую микротвердость, что связано с нанесением поверхностного слоя покрытия на уже упрочненную ионно-плазменным азотированием поверхность. Микротвердость поверхности синтезируемого дуплексного покрытия, полученного без использования плазменной сепарации, составила 45,2 ГПа, по разработанной технологии – 47,6 ГПа, тогда как микротвердость многослойного покрытия составила 35,3 ГПа.

Исследование микрофотографий царапин и протоколов профиля зоны разрушения, полученных при скретч-тестировании, показало, что дуплексные покрытия, синтезированные по разработанной технологии, характеризуются повышенной адгезионной прочностью. Нагрузка, при которой появляются первые трещины на дуплексных покрытиях, – 20,8 мН, тогда как на многослойных покрытиях они появляются при нагрузке 14,83 мН.

Анализ экспериментальных зависимостей электродного потенциала покрытий системы TiZrAlN от времени испытаний показал смещение электродного потенциала в отрицательном направлении за первые 30 мин испытаний, после чего он стабилизируется для всех рассматриваемых типов покрытий (рис. 2).

Согласно полученным данным, покрытия, созданные по разработанной технологии, имели более высокий электродный потенциал, следовательно, стойкость к коррозии таких покрытий будет выше по сравнению со стойкостью многослойных по-

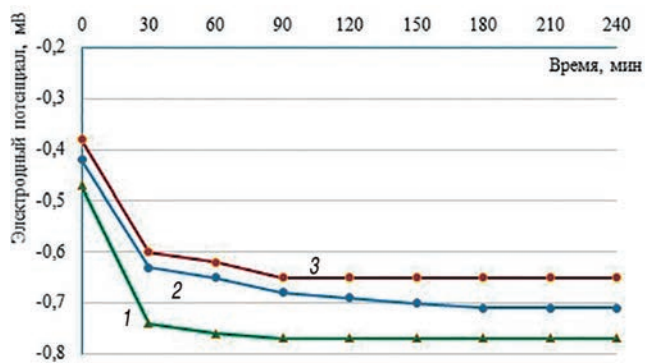


Рис. 2. Изменение электродных потенциалов покрытий системы TiZrAlN в 5%-ном растворе NaCl во времени: 1 — многослойное покрытие; 2 — дуплексное покрытие без сепарации плазменного потока; 3 — дуплексное покрытие с сепарацией плазменного потока

крытий и дуплексным покрытием без сепарации плазменного потока.

Для оценки скорости коррозии весовым методом образцы с покрытиями помещались в камеру соляного тумана согласно методике (ГОСТ 30630.2.5-2013). Результаты измерения массы образцов с покрытиями (средние значения по пяти образцам) до и после экспозиции в коррозионной среде представлены в таблице.

#### Результаты измерения массы образцов с покрытием системы TiZrAlN

Тип покрытия	Масса, г	
	до экспозиции в коррозионной среде	после экспозиции в коррозионной среде
Многослойное покрытие	5,3958	5,3228
Дуплексное покрытие без сепарации плазменного потока	4,6933	4,6355
Дуплексное покрытие с сепарацией плазменного потока	3,8978	3,8918

Согласно результатам расчета, проведенного по данным таблицы, скорость коррозии многослойного покрытия составила  $0,096868 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , дуплексного покрытия без сепарации плазменного потока —  $0,07664 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , дуплексного покрытия с сепарацией плазменного потока —  $0,067675 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Скорость коррозии у образцов с дуплексным покрытием с сепарацией плазменного потока на 11,7% меньше, чем у образцов с дуплексным покрытием без сепара-

ции плазменного потока, и на 30,1%, чем у образцов с многослойным покрытием. Следовательно, поверхность покрытия, полученного по разработанной технологии, в большей степени пассивна, что свидетельствует о ее более высокой коррозионной стойкости. Повышение антикоррозионных свойств дуплексных покрытий, полученных в условиях магнитно-дуговой фильтрации, достигается благодаря увеличению микротвердости и адгезионной прочности поверхности вследствие ее упрочнения ионно-плазменным азотированием и снижению содержания капельной фазы в покрытии вследствие сепарации плазменного потока от Al-анода. Полученные результаты оценки коррозионной стойкости по скорости коррозии полностью согласуются с экспериментальными данными по электродному потенциалу.

#### Выводы

Разработана технология синтеза дуплексных вакуумно-плазменных покрытий системы TiZrAlN для деталей авиадвигателей и энергоустановок, включающая ионно-плазменное азотирование поверхности и синтез многослойного покрытия с ионным ассистированием и сепарацией потока плазмы. Свойства дуплексного ВИП-покрытия, нанесенного по разработанной технологии, сравнивались со свойствами многослойного покрытия, полученного вакуумно-плазменным методом, а также дуплексного покрытия, полученного путем последовательного ионно-плазменного азотирования и синтеза ВИП-покрытия (без сепарации плазменного потока). Результаты проведенных исследований подтвердили перспективность использования разработанной технологии синтеза дуплексных покрытий для защиты деталей авиадвигателей и энергетических установок от абразивного, коррозионного и эрозионного воздействия.

#### Список источников

1. Корсунов К.А., Ашихмина Е.А. Защитное покрытие TiZrN в авиадвигателестроении // Вестник двигателестроения. 2007. № 1. С. 110–112.
2. Смыслов А.М., Дыбленко Ю.М., Смылова М.К. и др. Новая вакуумная установка и технология комбинированной упрочняющей обработки, нанесения покрытий на детали ГТД и энергетических установок // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 1(54). С. 108–113.
3. Grigor'ev S.N., Gurin V.D., Volosova M.A., Cherkasova N.Y. Development of residual cutting tool life prediction algorithm by processing on CNC machine tool // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2013. Vol. 44. No. 9, pp. 790–796. DOI: 10.1002/mawe.201300068
4. Сухова Н.А., Семенов А.С. Основные тенденции развития перспективных технологий в авиадвигателе-

4. строении // Наука – производству: ежегодный научно-технический сборник. Уфа: Электронное изд-во «Вагант», 2012. С. 93–104.
5. Rolinski E., Cowell B. Plasma Nitride Surface Hardening of Titanium for Aerospace and Armament Applications // *Aerospace & Defense Technology*. 2012, pp. 10–12.
6. Крымов В.В., Фомина Л.П. Технология ионной химико-термической обработки деталей ГТД // *Авиационная промышленность*. 2014. № 4. С. 19–22.
7. Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокрывтий для применения в инструментальном производстве // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010. № 6(66). С. 37–42.
8. Li C.X., Bell T. Corrosion properties of plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel in 3.5% NaCl and 1% HCl aqueous solutions // *Corrosion Science*. 2006. Vol. 48. No. 8, pp. 2036–2049. DOI: 10.1016/j.corsci.2005.08.011
9. Arushanov K.A., Zeltser I.A., Karabanov S.M. et al. New technology of ion-plasma modification of the contact surfaces of reed switches in oscillatory discharge // *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. Vol. 345. No. 1: 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/345/1/012003
10. Grigoriev S.N., Migranov M.Sh., Shekhtman S.R. et al. Sensor Information Processing in the Control of Quality Parameters of Functional Coatings of Products Deposited by Vacuum-Arc Spraying // *SPIE Future Sensing Technologies*. 2021. Vol. 11914. DOI: 10.1117/12.2605753
11. Крысина О.В., Коваль Н.Н., Лопатин И.В., Шугуров В.В. Генерация низкотемпературной плазмы дуговых разрядов низкого давления для синтеза износостойких нитридных покрытий // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014. Т. 57. № 11/3. С. 88–92.
12. Мухин В.С., Шехтман С.Р. (ред.) *Физические методы нанесения нанопокровтий: Учебное пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2023. – 333 с.*
13. Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Сухова Н.А., Гусев А.С. Износостойчивые комплексы инструментального назначения для эксплуатации в условиях повышенной теплосиловой нагрузки // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29. № 3. С. 211–219. DOI: 10.34759/vst-2022-3-211-219
14. Weinhold T., Dalke A., Schramm A., Biermann H. Sliding wear behavior of duplex coatings with different plasma nitride layers and a Cr-Al-Ti-B-N coating // *Engineering Reports*. 2022. 4(3). DOI: 10.1002/eng2.12377
15. Сухова Н.А. Реализация новых подходов к оценке эффективности инновационных технологий производства деталей ГТД // *Наука – производству: Ежегодный научно-технический сборник*. Уфа: Электронное изд-во «Вагант», 2014. С. 88–97.
16. Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Мигранов А.М. Трибо-технические характеристики режущего инструмента с ионно-модифицированной поверхностью // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2019. № 10. С. 464–469.
17. Олейник М.А., Балякин А.В., Скуратов Д.Л., Петров И.Н., Мешков А.А. Влияние режимов прямого лазерного выращивания на формообразование одиночных валиков и стенок из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29. № 4. С. 243–255. DOI: 10.34759/vst-2022-4-243-255
18. Григорьев С.Н., Волосова М.А. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики // *Вестник машиностроения*. 2005. № 9. С. 32–36.
19. Ушаков И.В., Ошоров А.Д. Микроразрушение многослойного композита на основе аморфно-нанокристаллического металлического сплава // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29. № 3. С. 246–252. DOI: 10.34759/vst-2022-3-246-252
20. Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Sotova E.S., Vereschaka A.A. Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nanoscale multilayered coatings // *Advanced Materials Research*. 2013. Vols. 712–715, pp. 391–394. DOI: 4028/www.scientific.net/AMR.712-715.391
21. Suhova N.A., Shekhtman S.R., Migranov M.S. Synthesis of nanostructured composite coatings in ARC discharge plasma // *4th International conference on industrial engineering ICIE 2018. Lecture notes in mechanical engineering*. Springer, Cham. 2019, pp. 1393–1399. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_147

## References

1. Korsunov K.A., Ashikhmina E.A. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2007, no. 1, pp. 110–112.
2. Smyslov A.M., Dyblenko Yu.M., Smyslova M.K. et al. *Vestnik UGATU*, 2013, vol. 17, no. 1(54), pp. 108–113.
3. Grigoriev S.N., Gurin V.D., Volosova M.A., Cherkasova N.Y. Development of residual cutting tool life prediction algorithm by processing on CNC machine tool. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2013, vol. 44, no. 9, pp. 790–796. DOI: 10.1002/mawe.201300068
4. Sukhova N.A., Semenov A.S. *Nauka – proizvodstvu: ezhegodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik*. Ufa, Vagant, 2012, pp. 93–104.
5. Rolinski E., Cowell B. Plasma Nitride Surface Hardening of Titanium for Aerospace and Armament Applications. *Aerospace & Defense Technology*, 2012, pp. 10–12.
6. Krymov V.V., Fomina L.P. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2014, no. 4, pp. 19–22.
7. Volosova M.A., Grigor'ev S.N. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2010, no. 6(66), pp. 37–42.
8. Li C.X., Bell T. Corrosion properties of plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel in 3.5% NaCl and 1% HCl

- aqueous solutions. *Corrosion Science*, 2006, vol. 48, no. 8, pp. 2036–2049. DOI: 10.1016/j.corsci.2005.08.01
9. Arushanov K.A., Zeltser I.A., Karabanov S.M. et al. New technology of ion-plasma modification of the contact surfaces of reed switches in oscillatory discharge. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, vol. 345, no. 1: 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/345/1/012003
  10. Grigoriev S.N., Migranov M.Sh., Shekhtman S.R. et al. Sensor Information Processing in the Control of Quality Parameters of Functional Coatings of Products Deposited by Vacuum-Arc Spraying. *SPIE Future Sensing Technologies*, 2021, vol. 11914. DOI: 10.1117/12.2605753
  11. Krysina O.V., Koval' N.N., Lopatin I.V., Shugurov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 11/3, pp. 88–92.
  12. Mukhin V.S., Shekhtman S.R. (eds) *Fizicheskie metody nanoseniya nanopokrytii* (Physical methods of nanocoating), 3rd ed. Moscow, Yurait, 2023, 333 p.
  13. Migranov M.S., Shekhtman S.R., Sukhova N.A., Gusev A.S. Wear-resistant complexes of instrumental purpose for operation under increased thermal-power loading. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 211–219. DOI: 10.34759/vst-2022-3-211-219
  14. Weinhold T., Dalke A., Schramm A., Biermann H. Sliding wear behavior of duplex coatings with different plasma nitride layers and a Cr-Al-Ti-B-N coating. *Engineering Reports*. 2022. 4(3). DOI: 10.1002/eng2.12377
  15. Sukhova N.A. *Nauka – proizvodstvu: ezhegodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik*. Ufa, Vagant, 2014, pp. 88–97.
  16. Migranov M.Sh., Shekhtman S.R., Migranov A.M. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2019, no. 10, pp. 464–469.
  17. Oleinik M.A., Balyakin A.V., Skuratov D.L., Petrov I.N., Meshkov A.A. The effect of direct laser beam energy deposition modes on single rollers and walls shaping from the HN50VMTUB heat resisting alloy. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 243–255. DOI: 10.34759/vst-2022-4-243-255
  18. Grigor'ev S.N., Volosova M.A. *Vestnik mashinostroeniya*, 2005, no. 9, pp. 32–36.
  19. Ushakov I.V., Oshorov A.D. Micro-fracture of multilayer composites based on morphous-nanocrystalline metal alloy. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 246–252. DOI: 10.34759/vst-2022-3-246-252
  20. Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Sotova E.S., Vereschaka A.A. Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nanoscale multilayered coatings. *Advanced Materials Research*, 2013, vols. 712–715, pp. 391–394. DOI: 4028/www.scientific.net/AMR.712-715.391
  21. Sukhova N.A., Shekhtman S.R., Migranov M.S. Synthesis of nanostructured composite coatings in ARC discharge plasma. *4th International conference on industrial engineering ICIE 2018. Lecture notes in mechanical engineering*. - Springer, Cham. 2019, pp. 1393–1399. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_147

Статья поступила в редакцию 24.07.2023; одобрена после рецензирования 16.08.2023; принята к публикации 20.08.2023.

The article was submitted on 24.07.2023; approved after reviewing on 16.08.2023; accepted for publication on 20.08.2023.