

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК ГТД СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КАЖДОГО СЛОЯ

Дмитрий Александрович Михайлов¹, канд. техн. наук

Александр Владимирович Хандожко², д-р техн. наук

Александр Николаевич Михайлов³, д-р техн. наук

Елена Александровна Шейко⁴, канд. техн. наук

^{1,4} Донецкий институт ГПС МЧС России, г. Донецк, Россия

² Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

³ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия

Тел.: +7 949 3821135; E-mail: dmitry.michailov@mail.ru

Аннотация. В работе выполнен анализ особенностей эксплуатации лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), при этом установлено, что они имеют неравномерный абразивно-эрозионный износ рабочих поверхностей, который имеет некоторые закономерности их износа, что приводит к снижению ресурса и технико-экономических показателей авиационных двигателей. Для решения этих вопросов в работе предложено применение многослойных функционально-ориентированных покрытий (ФОП) лопаток компрессора, выполняемых на базе функционально-ориентированного подхода, обеспечивающих возможность повышения параметров качества их эксплуатации. В работе приведена структурно-логическая формула многослойного ФОП, которая позволяет решать вопросы синтеза множества возможных вариантов таких покрытий лопаток для ГТД. Для этого предложено применение точных и приближенных вариантов пространственных контуров границ (ПКГ) каждого слоя многослойного ФОП. Разработан алгоритм синтеза структуры технологического процесса формирования многослойного ФОП лопаток компрессора вертолетного ГТД. Проведенные исследования позволили установить технологические параметры напыления вакуумного ионно-плазменного покрытия в зависимости от особенностей эксплуатации лопаток компрессора ГТД. Предложена методика ускоренного получения технологических и эксплуатационных параметров.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, компрессор, лопатки, многослойное покрытие, функционально-ориентированное покрытие, вакуумное ионно-плазменное покрытие, технологические параметры.

FEATURES OF FORMATION OF A MULTILAYER FUNCTIONALLY ORIENTED COATING OF GAS TURBINE ENGINE BLADES WITH SPECIAL PARAMETERS OF EACH LAYER

Dmitriy A. Mikhaylov, Ph. D.

Alexander V. Handozhko, D. Eng.,

Alexander N. Mikhaylov, D. Eng.,

Elena A. Sheiko, Ph. D.

Abstract. The paper analyzes the operational characteristics of gas turbine engine (GTE) compressor blades. It was found that they exhibit uneven abrasive-erosive wear of the work-

ing surfaces, which has certain wear patterns, leading to a reduction in the service life and technical and economic performance of aircraft engines. To address these issues, the paper proposes the use of multilayer function-oriented coatings (FOC) for compressor blades, manufactured using a function-oriented approach, which provides the possibility of improving their operational quality parameters. The paper presents a structural and logical formula for a multilayer FOC, which allows for solving the issues of synthesizing a variety of possible variants of such coatings for GTE blades. For this purpose, the use of exact and approximate variants of the spatial boundary contours (SBC) of each layer of the multilayer FOC is proposed. An algorithm for synthesizing the structure of the technological process for forming a multilayer FOC for helicopter GTE compressor blades is developed. The conducted research made it possible to establish the technological parameters for spraying a vacuum ion-plasma coating depending on the operating characteristics of the gas turbine engine compressor blades. A method for the accelerated determination of technological and operational parameters is proposed.

Keywords: gas turbine engine, compressor, blades, multilayer coating, function-oriented coating, vacuum ion-plasma coating, technological parameters.

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FRRF-2025-0004 (2025-2027 г.), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования ДонНТУ.

Введение

Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) показывает, что они работают в сложных условиях [1, 2, 3]. При этом в особенно тяжелых эксплуатационных условиях работают элементы ГТД, расположенные в проточной части авиационного двигателя. К таким элементам относятся лопатки компрессора, которые испытывают при работе ГТД целый комплекс эксплуатационных воздействий, а именно абразивно-эрозионного, кислотного, окислительного и другого ха-

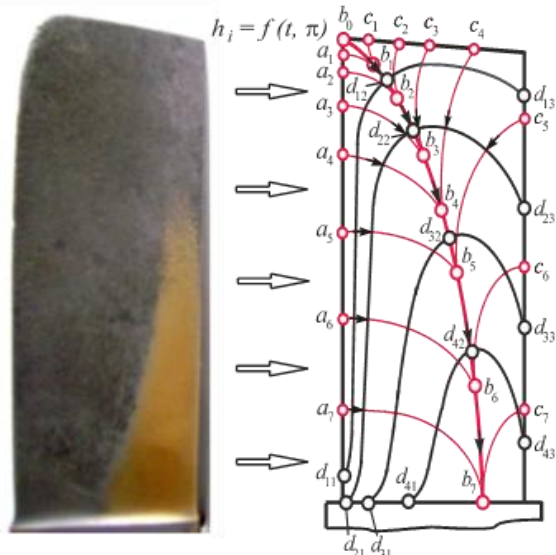


Рисунок 1. Схема закономерностей абразивно-эрозионного износа поверхности корытца пера лопатки компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117

рактеров [4, 5]. Проведенные исследования особенностей их работы показали, что эти воздействия приводят к неравномерному износу элементов (поверхностных слоев) каждой лопатки. При этом неравномерность износа элементов лопаток обусловлена особенностями действия среды на каждую лопатку двигателя, составом этой среды и плотностью абразива в потоке, кинематикой среды и лопаток, их пространственной геометрией, структурой ступеней лопаток и характеристиками проточной части компрессора, а также целым рядом других особенностей эксплуатации двигателя [5]. Все это приводит к снижению ресурса и технико-экономических показателей эксплуатации ГТД.

Выполненные исследования особенностей неравномерного износа лопаток компрессора показали, что этот процесс имеет определенные закономерности износа [6]. При этом установлено, что неравномерности износа лопаток компрессора действуют как по поверхностям лопатки, так и по ступеням лопаток, расположенных по длине проточной части двигателя.

В качестве примера на рисунке 1 представлена схема закономерностей неравномерного износа поверхности корытца пера лопатки компрессора вертолетного ГТД серии ТВЗ-117. Здесь, процесс износа поверхности пера корытца лопатки компрессора начинается в точке b_0 и распространяется по линии $b_0, b_1, b_2, \dots, b_7$ (линия максимального износа поверхностного слоя) в данный момент времени. При этом каждая изометрическая линия d_{i1}, d_{i2}, d_{i3} износа поверхности имеет равную толщину износа, характеризующую i -м пространственным контуром границ (ПКГ) износа поверхности с равной толщиной износа поверхности пера. Можно отметить, что процесс образования изометрических линий реализуется в направлениях $a_i - b_i$ и $c_i - b_i$.

Таким образом, проведенные исследования особенностей процесса абразивно-эрозионного износа пера лопаток компрессора позволил установить, что он имеет определенные закономерности. Это позволило сделать вывод, что в соответствии с этими закономерностями износа можно реализовывать многослойное функционально-ориентированное покрытие (ФОП) лопаток, выполняемое в соответствии с особенностями их эксплуатации [6, 7] и функционально-ориентированным подходом [8] в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток ГТД [6]. Поэтому в данной работе, для повышения ресурса лопаток компрессора предложено применение многослойного ФОП [8] лопаток компрессора ГТД.

Многослойное ФОП лопаток компрессора ГТД [9] это специальное покрытие пера лопаток имеющее ряд слоев покрытия, например, выполняемых из нитрида титана или из других сверхпрочных композиций, каждый из которых имеет свои физико-механические свойства и/или толщину, и свой пространственный контур границ (ПКГ) каждого слоя, параметры которого определяются в соответствии с функционально-ориентированным подходом, и обеспечивающее выполнение равного ресурса их поверхностного слоя, повышение эксплуатационного потенциала и технико-экономических показателей авиационного двигателя. Можно отметить, что особенности формирования ФОП лопаток ГТД рассмотрено в целом ряде работ [6, 7], которые поясняют процессы создания таких покрытий. Вместе с тем, в этих работах не приведены общие алгоритмы синтеза структуры технологического процесса формирования многослойного ФОП лопаток компрессора для его различных ступеней, нет данных по созданию точного и упрощенного ПКГ каждого слоя многослойного покрытия и не приведены рациональные технологические параметры реализации этих покрытий на конкретном технологическом оборудовании.

Целью данной работы является анализ особенностей износа лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий, синтез для этих условий специального многослойного ФОП, определение технологических параметров его формирования - на базе вакуумного ионно-плазменного метода, которые комплексно обеспечивают повышение ресурса и технико-экономических показателей эксплуатации ГТД.

В соответствии с поставленной целью в данной работе определены следующие задачи: выполнить анализ особенностей износа пера лопатки компрессора и установить закономерности этого процесса в условиях действия неравномерных воздействий абразивно-эрозионного характера на элементы пера; исследовать особенности формирова-

ния многослойного ФОП лопатки компрессора на основе функционально-ориентированного подхода в реализации данного покрытия; предложить варианты формирования ПКГ слоев многослойного ФОП лопатки; разработать технологическое обеспечение в формировании многослойного ФОП лопатки компрессора и установить технологические параметры синтеза покрытия на базе вакуумного ионно-плазменного метода (метод КИБ).

Эти задачи решаются в данной работе.

1. Особенности формирования многослойного ФОП лопаток компрессора вертолетного ГТД

Рассматривая многослойное ФОП i -й лопатки компрессора F_i , его можно представить в виде структурно-логической формулы (1). Оно структурировано из n слоев $\{p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{in}\}$, каждый из которых имеет свой ПКГ $\{ПКГ_{i1}, ПКГ_{i2}, ПКГ_{i3}, \dots, ПКГ_{in}\}$. В формуле (1) знак $\odot$ обозначает декомпозицию параметров ФОП. При этом любой j -й слой многослойного ФОП можно описывать, как единовременно-единовременный слой схемы технологического воздействия [8] с картежом параметров (m_j, e_j, i_j) материального m_j , энергетического e_j и информационного i_j характеров. Здесь, пространственный контур границ (ПКГ) каждого слоя покрытия лопатки компрессора можно координировать последовательным множеством координат $ПКГ_{ij} \rightarrow \{(x_{j1}, y_{j1}, z_{j1}), (x_{j2}, y_{j2}, z_{j2}), (x_{j3}, y_{j3}, z_{j3}), \dots, (x_{jk_n}, y_{jk_n}, z_{jk_n})\}$, где (x_{jk}, y_{jk}, z_{jk}) - координаты k -ой точки ПКГ j -го слоя покрытия i -й лопатки.

Структурно-логическая формула многослойного ФОП для i -й лопатки ГТД имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 F_i \rightarrow & \odot \begin{cases} f_{i1} \rightarrow \odot \begin{cases} p_{i1} \rightarrow \{(m_1, e_1, i_1), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v)\}; \\ ПКГ_{i1} \rightarrow \{(x_{11}, y_{11}, z_{11}), (x_{12}, y_{12}, z_{12}), \dots, (x_{1k_1}, y_{1k_1}, z_{1k_1})\}; \end{cases} \\ f_{i2} \rightarrow \odot \begin{cases} p_{i2} \rightarrow \{(m_2, e_2, i_2), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v)\}; \\ ПКГ_{i2} \rightarrow \{(x_{21}, y_{21}, z_{21}), (x_{22}, y_{22}, z_{22}), \dots, (x_{2k_2}, y_{2k_2}, z_{2k_2})\}; \end{cases} \\ f_{i3} \rightarrow \odot \begin{cases} p_{i3} \rightarrow \{(m_3, e_3, i_3), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v)\}; \\ ПКГ_{i3} \rightarrow \{(x_{31}, y_{31}, z_{31}), (x_{32}, y_{32}, z_{32}), \dots, (x_{3k_3}, y_{3k_3}, z_{3k_3})\}; \end{cases} \\ \vdots \\ f_{in} \rightarrow \odot \begin{cases} p_{in} \rightarrow \{(m_n, e_n, i_n), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v)\}; \\ ПКГ_{in} \rightarrow \{(x_{n1}, y_{n1}, z_{n1}), (x_{n2}, y_{n2}, z_{n2}), \dots, (x_{nk_n}, y_{nk_n}, z_{nk_n})\}; \end{cases} \end{cases}
 \end{aligned} \quad (1)$$

где F_i – многослойное ФОП для i – й лопатки вертолетного ГТД;

$\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v$ - схема формирования единовременно-единовременного слоя многослойного ФОП [8].

Структурно-логическую формулу (1) многослойного ФОП для i -й лопатки ГТД можно представить в сокращенной записи:

$$\left. \begin{aligned} F_i &\rightarrow \{(m_j, e_j, i_j), [\bigvee_{v=1}^n dl_v (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t)]\}; \\ ПКГ_{ij} &\rightarrow \{(x_{j1}, y_{j1}, z_{j1}), (x_{j2}, y_{j2}, z_{j2}), (x_{j3}, y_{j3}, z_{j3}), \dots, (x_{jk_j}, y_{jk_j}, z_{jk_j})\}; \\ j &= 1, 2, 3, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

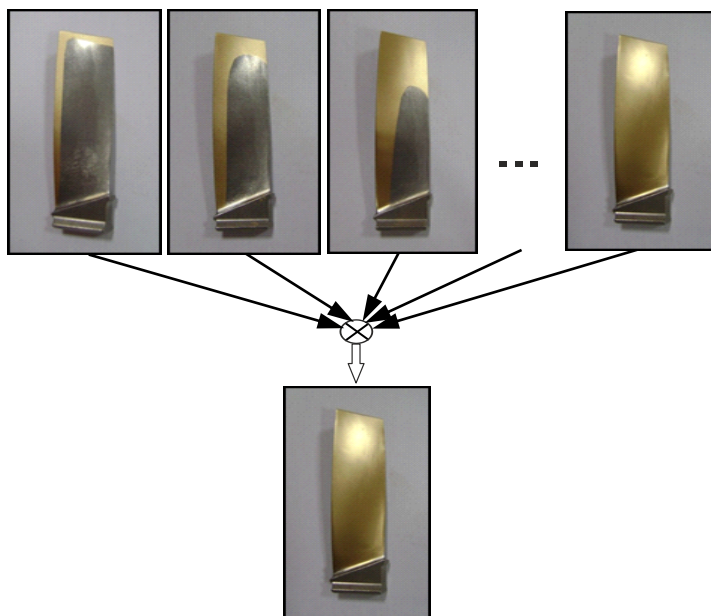
где k_j – общее количество рассматриваемых точек ПКГ j – го слоя i – й лопатки ГТД;

n – количество слоев многослойного ФОП i – й лопатки ГТД;

$\wedge$ и $\vee$ – предикаты алгебры логики, а именно знаки конъюнкции и дизъюнкции.

Выполняя анализ выражений (1) и (2) можно сделать выводы о том, что многослойное ФОП лопаток компрессора имеет варьируемые параметры покрытия:

- количество слоев многослойного ФОП лопатки;
- толщина покрытия каждого слоя покрытия (постоянная, переменная, функционально – зависимая или другие параметры);
- толщины покрытий слоев в многослойном ФОП (одинаковые, переменные, функционально–зависимые параметры);
- физико-механические свойства каждого слоя многослойного ФОП (постоянные, переменные, ступенчатые, функционально-изменяющиеся и тому подобные);
- физико-механические свойства слоев относительно друг друга в многослойном ФОП (одинаковые, различные, функционально-зависимые и другие параметры);
- геометрические параметры ПКГ каждого слоя многослойного ФОП (точные



параметры в соответствии с принципами функционально-ориентированного подхода [8] или упрощенные параметры);

- комбинированные параметры.

В качестве примера, на рисунке 2 представлена схема формирования многослойного ФОП лопатки компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117. Здесь, показано последовательное формирование нескольких слоев вакуумного ионно-плазменного покрытия из нитрида титана в соответствии с принципами функционально-ориентированного подхода [8]. В результате по-

Рисунок 2. Схема формирования многослойного ФОП лопатки компрессора ГТД ТВ3-117

лучается многослойное ФОП переменной толщины сформированное из слоев равной толщины [9] с точными геометрическими параметрами ПКГ, выполняемого в зависи-

мости от особенностей абразивно-эрозионного износа поверхности (рисунок 1). В данном случае, при формировании ПКГ каждого слоя многослойного ФОП используется специальный защитный экран с соответствующим ПКГ экрана данного слоя или может использоваться при формировании ПКГ каждого слоя покрытия специальный метод отображающих масок.

В процессе напыления многослойного ФОП на лопатке последовательно добавляются слои покрытия, имеющих ПКГ каждого слоя, на основе принципа топографической ориентации каждого слоя в соответствии с особенностями износа лопатки при эксплуатации (рисунок 1). В результате композиции ряда слоев, имеющих ПКГ каждого слоя, получаем многослойное ФОП лопатки с переменной толщиной покрытия по перу лопатки. На рисунке 2 знак $\otimes$ обозначает операцию композиции слоев покрытия с ПКГ каждого слоя.

Таким образом, выполненный анализ особенностей формирования ФОП лопаток компрессора позволил установить, что этот процесс многовариантен и зависит от ряда варьируемых параметров. При этом особый интерес представляет вопрос формирования ПКГ каждого слоя и композиции этих слоев в ФОП лопатки. Вместе с тем, можно отметить, что процесс формирования точного ПКГ каждого слоя является достаточно трудоемким, требующим изготовления специальных защитных экранов. Поэтому далее рассмотрим вопросы формирования упрощенных ПКГ каждого слоя ФОП лопатки, которые позволяет решать вопросы создания многослойных ФОП более простым методом, но по сути близким по своей сущности к точным методам формирования многослойного ФОП лопатки.

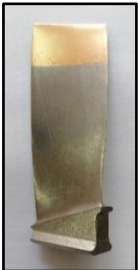
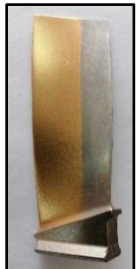
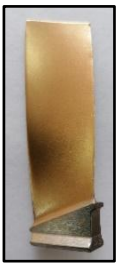
2. Варианты формирования упрощенных ПКГ слоев многослойного ФОП лопатки

Выполнив анализ особенностей абразивно-эрозионного износа поверхности корытца пера лопатки компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117 установлено, что процессы износа лопаток ротора и статора компрессора имеют определенные закономерности, например, у рабочих лопаток компрессора (лопатки ротора) процесс износа начинается в точке b_0 и далее распространяется по линии $b_0, b_1, b_2, \dots, b_7$ (линия максимального износа поверхностного слоя) в данный момент времени. При этом угол α по этой линии, лежащий между касательной к этой линии и вертикалью (рисунок 1) в точках $b_0, b_1, b_2, \dots, b_7$ изменяется от 90° до 0° . На основании этой закономерности, в данной работе, предложено выполнение нескольких вариантов упрощенных ПКГ слоев многослойного ФОП лопаток компрессора, а именно следующие варианты:

- горизонтальный ПКГ слоев при $\alpha = 0^\circ$ для всех слоев f_1, f_2, f_3 многослойного ФОП лопатки компрессора, покрытие f_4 формируется для всего пера лопатки;
- вертикальный ПКГ слоев при $\alpha = 90^\circ$ для всех слоев f_1, f_2, f_3 многослойного ФОП лопатки компрессора, покрытие f_4 формируется для всего пера лопатки;
- угловой ПКГ слоев при $\alpha = 45^\circ$ для всех слоев f_1, f_2, f_3 многослойного ФОП лопатки компрессора, покрытие f_4 формируется для всего пера лопатки;
- угловой ПКГ слоев при $\alpha_1 = 25^\circ$ для f_1 , $\alpha_2 = 35^\circ$ для f_2 , $\alpha_3 = 45^\circ$ для f_3 каждого слоя многослойного ФОП лопатки компрессора, покрытие f_4 формируется для всего пера лопатки.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований по напылению многослойного ФОП с упрощенными вариантами ПКГ слоев покрытия лопаток компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117.

Таблица 1. Упрощенные варианты ПКГ слоев многослойного ФОП лопаток компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117 (вакуумное ионное плазменное покрытие из нитрида титана)

№ п/п	Наименование вариантов слоев	Общий вид ПКГ слоев покрытия (четыре слоя покрытия)			
		f_1	f_2	f_3	f_4
1	Горизонтальный ПКГ слоев при $\alpha = 0^\circ$ для всех слоев				
2	Вертикальный ПКГ слоев при $\alpha = 90^\circ$ для всех слоев				
3	Угловой ПКГ слоев при $\alpha = 45^\circ$ для всех слоев				
4	Угловой ПКГ слоев при $\alpha_1 = 25^\circ$, $\alpha_2 = 35^\circ$, $\alpha_3 = 45^\circ$. каждого слоя				

В данном случае, многослойное ФОП сформировано из 4-х слоев, толщина каждого слоя составляет 3 мкм, четырехслойное покрытие в точке b_0 (рисунок 1) имеет толщину 12 мкм, выполнено из нитрида титана катодами из титана марки ВТ1-0. Покрытие напылено на рабочую лопатку 1-й ступени. Для напыления, представленных в

таблице вариантов покрытий, использовались специальные экраны из медной фольги (медный сплав), которые устанавливались на лопатку компрессора и закреплялись зажимами. Процесс напыления данных вариантов слоев покрытий выполнялся на вакуумной ионно-плазменной установке ННВ 6.6-И1. Перед напылением каждого слоя многослойного ФОП лопатки монтировались на специальную многоместную оснастку. Технологические режимы напыления многослойного ФОП определялись в соответствии с данными, приведенными далее.

Можно отметить, что многослойное ФОП лопатки компрессора представляет собой композицию вариантов слоев покрытий f_1, f_2, f_3, f_4 , каждый из которых имеет свой упрощенный ПКГ слоя. На основании приведенных в таблице 1 вариантов многослойного ФОП можно составлять множество вариантов данных покрытий и выявлять наиболее приемлемые варианты покрытий лопаток компрессора для конкретных условий их эксплуатации в ГТД.

Анализируя представленные в таблице 1 варианты ПКГ слоев многослойного ФОП лопаток компрессора можно отметить, что особый интерес для широкого применения данных покрытий является четвертый вариант покрытий с угловым ПКГ слоев с различными углами контура. Это связано с тем, что угол α_j можно ориентировать в соответствии с изменяющимися геометрическими параметрами линии $b_0, b_1, b_2, \dots, b_7$ (рисунок 1), что обеспечивает получение соответствия упрощенных ПКГ каждого слоя покрытия точному ПКГ многослойного ФОП (рисунок 2).

Таким образом, представленные варианты формирования ПКГ слоев многослойного ФОП лопатки дают возможность проектировщику выполнять выбор наиболее приемлемых вариантов покрытий лопаток с учетом их эксплуатационных свойств и технико-экономических параметров изготовления.

3. Технологические особенности формирования многослойного вакуумного ионно-плазменного ФОП лопаток компрессора ГТД

В данной работе предлагается для формирования многослойного ФОП использовать слои из нитрида титана реализуемые на основе вакуумного ионно-плазменного метода (КИБ) [10, 11]. Можно отметить, что слои многослойного ФОП лопатки структурируются из нитрид титанового покрытия, которое обычно имеет среднее значение микротвердости по Виккерсу - 22 ГПа и модуль Юнга – 590 кН/мм³ [11]. При этом для реализации данного многослойного покрытия необходимо решить целый комплекс вопросов, главные из них следующие:

1. Необходимо создание структуры технологического процесса формирования многослойного ФОП лопаток компрессора [6].

2. Требуется определение технологических параметров напыления слоев покрытия в зависимости от особенностей формирования многослойного ФОП и его эксплуатации [7].

В данной работе, для создания структуры технологического процесса формирования многослойного ФОП лопаток разработан специальный алгоритм синтеза его структуры. На рисунке 3 представлен алгоритм синтеза структуры технологического процесса для формирования многослойного ФОП лопаток компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117. Представленный алгоритм состоит из двух этапов:

- подготовительный этап, предназначенный для подготовки формирования многослойного ФОП [12];
- основной этап, предназначенный для формирования многослойного ФОП.

На подготовительном этапе (операции от исходных данных до точки a_1) реализуется первый комплекс операций данного технологического процесса (рисунок 3) и выполняется напыление связующего покрытия между материалом лопатки и первым слоем многослойного покрытия. На основном этапе технологического процесса (от точки a_2 до *END*) производится второй комплекс этого технологического процесса (рисунок 3), и здесь производится процесс итерационно-рекуррентного формирования многослойного покрытия. Процесс напыления покрытия будет происходить до тех пор, пока все n покрытий будут нанесены на лопатку.

Можно отметить, что при напылении многослойного ФОП лопатки, варьируемыми параметрами являются следующие величины (рисунок 3):

1. ПКГ i –й лопатки j –го слоя покрытия, особенности определения данных параметров выполняются в соответствии с работой [9].

2. Общая толщина покрытия h_i в точке b_0 (рисунок 1) и толщина слоев покрытия

h_{ij} . Можно отметить, что общая толщина покрытия лопатки определяется в соответствии с выражением:

$$h_i = \sum_{j=1}^n h_{ij}, \quad (3)$$

где h_{ij} – толщина j –го слоя покрытия i –й лопатки;
 n – количество слоев многослойного ФОП.

Если толщина всех слоев покрытия одинаковая, то выражение (3) примет следующий вид

$$h_i = n h_{ij}. \quad (4)$$

В этом случае, толщина каждого слоя покрытия определяется на основании следующего выражения:

$$h_{ij} = \mu_{ij} \frac{T_0}{n}, \quad (5)$$

где T_0 – назначенный ресурс эксплуатации лопаток и ГТД;

μ_{ij} – эксплуатационная интенсивность износа нитрид титанового покрытия лопатки.

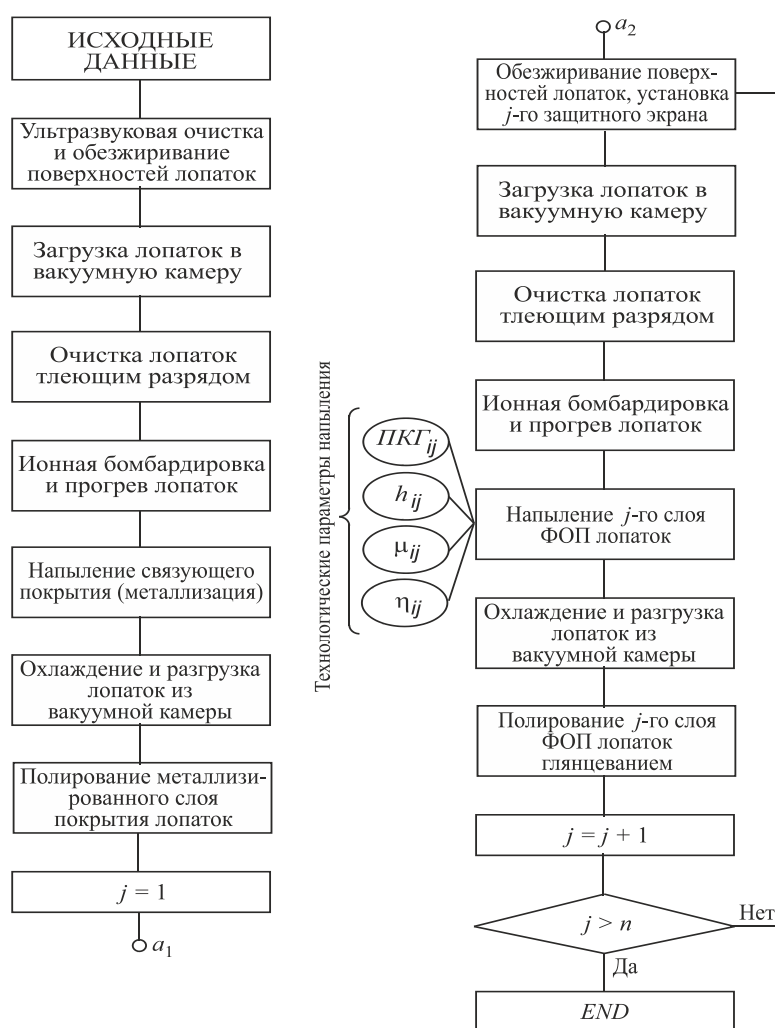


Рисунок 3. Алгоритм синтеза структуры технологического процесса для формирования многослойного ФОП лопаток компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117

3. Эксплуатационная интенсивность абразивно-эрозионного износа μ_{ij} нитрид титанового покрытия лопатки в зависимости от технологических режимов нанесения данного покрытия.

4. Технологическая интенсивность процесса напыления η_{ij} нитрид титанового покрытия на поверхность пера лопатки компрессора.

Анализируя выражение (5) можно отметить, что толщина каждого слоя многослойного ФОП определяется в зависимости от эксплуатационной интенсивности абразивно-эрозионного износа покрытия, назначенного ресурса и количества слоев ФОП. При этом назначенный ресурс эксплуатации ГТД и количество слоев покрытия определяется проектировщиком. В этом случае, здесь важнейшим параметром является эксплуатационная интенсивность износа нитрид титанового покрытия лопатки μ_{ij} . Следует отметить, что проведенные исследования показали, что значение интенсивности абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия переменны, и в целом определяются рядом технологических параметров его напыления. Поэтому далее, выполним исследования этого вопроса, как влияют технологические параметры на интенсивность абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия, определяемые ускоренным методом износа.

Можно отметить, что параметры эксплуатационной и ускоренной интенсивности износа нитрид титанового покрытия лопатки зависит от целого ряда технологических режимов осаждения покрытия, к основным из которых можно отнести следующие:

- давление азота в вакуумной камере P , Па;
- ток дуги на катоде I , А;
- напряжение смещения на лопатках (опорное напряжение) U , В;
- получаемое совершенство структуры покрытия (значение микротвердости, особенности структуры зерен, структура покрытия и другие параметры покрытия).

Методика проведения экспериментальных исследований по определению зависимости интенсивности абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия в зависимости от технологических режимов осаждения нитрид титанового покрытия включает следующее:

1. Напыляемое покрытие – нитрид титановое покрытие, метод напыления - вакуумное ионно-плазменное напыление (метод КИБ) [10], средняя толщина покрытия – 10 мкм.

2. Оборудование по напылению покрытия – вакуумная ионно-плазменная установка модели ННВ 6.6-И1. Катоды - изготовлены из титанового сплава ВТ 1-00.

3. Напыляемые образцы – образцы-свидетели прямоугольной формы ($25 \times 60 \dots 70$ мм), толщина образцов - 3 мм, материал - сталь 08Х13.

4. Оборудование для проведения абразивно-эрозионного износа покрытия – абразивно-струйная установка (рисунок 4, а). Применяемый абразив - карбид кремния черный, зернистость 63/40. Давление воздуха в системе ресивера абразивно-струйной установки - $P = 2 \text{ кг/см}^2$. Метод подачи абразива в струю воздуха – метод эжекции, порционная подача через специальное сопло.

5. Метод проведения экспериментальных исследований по определению интенсивности абразивно-эрозионного износа покрытия – ускоренный метод определения параметра абразивно-эрозионного износа покрытия. Износ нитрид титанового покрытия ускоренным методом останавливается при образовании на пластине пятна износа диаметром 5 мм (рисунок 4, б), износ покрытия реализуется высотный по толщине слоя.

Ускоренная интенсивность абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия образца-свидетеля определяется по следующей формуле:

$$\mu_v = \frac{h_j}{t_j}, \quad (6)$$



а)



б)

Рисунок 4. Общий вид абразивно-струйной установки и образцов-свидетелей с результатами воздействий:

а – абразивно-струйная установка, б – образцы-свидетели с нитрид титановым покрытием и пятнами воздействий

где μ_v – ускоренная интенсивность абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия ускоренным методом;

h_j – толщина покрытия образца-свидетеля при ускоренных испытаниях износа покрытия;

t_j – длительность абразивно-эрозионного износа покрытия по его толщине при ускоренных испытаниях.

6. Получение и обработка результатов экспериментальных ускоренных испытаний по определению ускоренной интенсивности износа нитрид титанового покрытия на образцах-свидетелях.

Проведение ускоренных экспериментальных исследований по определению ускоренной интенсивности абразивно-эрозионного износа выполнялось со следующими характеристиками процесса:

- концентрация карбида кремния черного составляла 50 г/дм^3 в потоке обрабатывающей среды;

- средняя микротвердость нитрид титанового покрытия составляла $H_\mu = 22 \text{ ГПа}$, средняя

толщина нитрид титанового покрытия на образцах свидетелей составляла $h = 10 \text{ мкм}$;

- микротвердость карбида кремния черного (абразива) составляла $H_{\mu 1} = 32,4...35,3 \text{ ГПа}$

- зернистость карбида кремния черного - 63/40 мкм.

Количество испытаний по износу нитрид титанового покрытия и определению ускоренной интенсивности его износа на образцах-свидетелях вычислялось на основании таблицы Дэвиса. При этом количество испытаний абразивно-эрозионного износа покрытия составляет 8 зон на каждом образце-свидетеле при одинаковых технологических режимах обработки покрытия каждого образца-свидетеля. При данных экспериментальных исследованиях принят доверительный интервал попадания времени абра-

зивно-эрозионного износа покрытия поверхностного слоя со степенью достоверности 95% и ошибкой первого рода или риском не включения параметра совокупности в доверительный интервал $\alpha = 0,05$. Далее, по каждой пластине образца-свидетеля определялось среднее время абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия, и в соответствии с выражением (6) вычислялась ускоренная интенсивность абразивно-эрозионного износа его покрытия.

Ускоренные экспериментальные исследования по определению ускоренной интенсивности абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия выполнялись

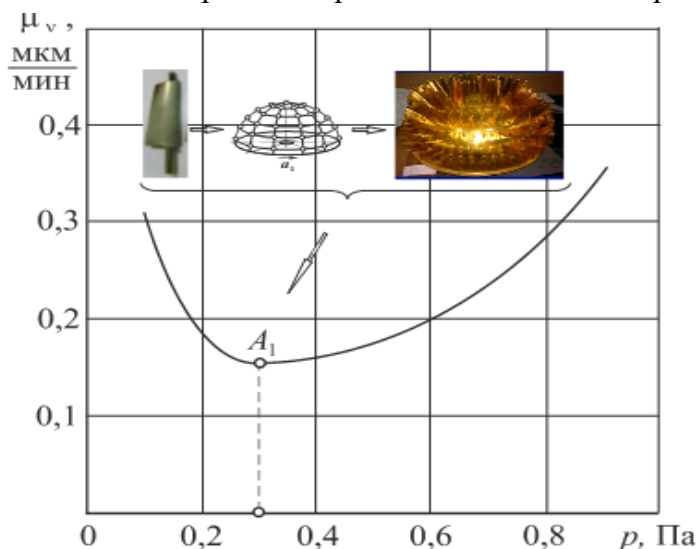


Рисунок 5. Зависимость интенсивности μ_v абразивно-эрозионного износа вакуумного нитрид титанового покрытия лопатки компрессора от технологического параметра – давления p реакционного газа

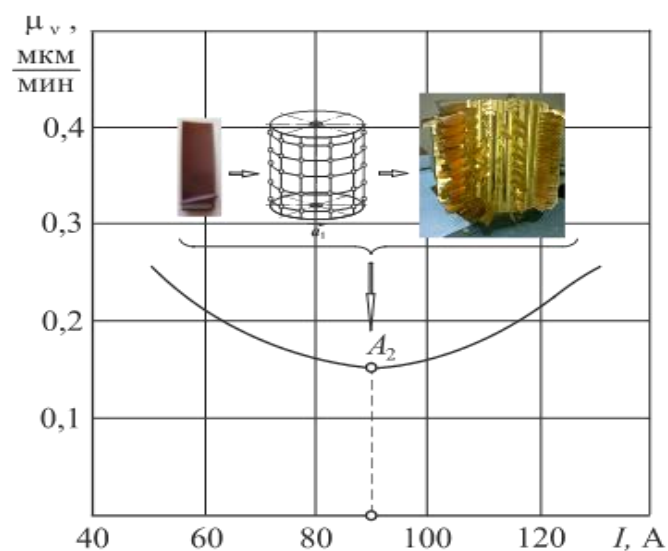


Рисунок 6. Зависимость интенсивности μ_v абразивно-эрозионного износа вакуумного нитрид титанового покрытия лопатки компрессора от технологического параметра – тока I дуги катода

в зависимости от следующих технологических параметров напыления вакуумного нитрид титанового покрытия:

– давление азота в вакуумной камере (реакционный газ) p , Па (рисунок 5);

– ток дуги на катоде I , А (рисунок 6);

– напряжение смещения на лопатках (опорное напряжение) U , В (рисунок 7).

Полученные результаты приведены на рисунках 5, 6 и 7

На рисунке 5 представлена зависимость интенсивности μ_v абразивно-эрозионного износа вакуумного нитрид титанового покрытия лопатки компрессора от технологического параметра – давления p реакционного газа. Процесс установления этой зависимости выполнялся в соответствии с методикой, представленной ранее.

Можно отметить, что процесс абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия зависит от давления реакционного газа в вакуумной камере установки. С изменением давления реакционного газа в вакуумной камере, в определенных пределах (рисунок 5), происходит изменение свойств нитрид титанового покрытия, а именно изменяется его твердость, параметры кристаллической решетки и фазовый состав материала. В данном случае, можно выделить три зоны осо-

бенностей абразивно-эрозионного износа покрытия, характеризующихся интенсивностью его износа в зависимости от давления реакционного газа:

- первая зона изменения интенсивности износа покрытия, образованного при давлении реакционного газа $p < 0,3$ Па; в этой зоне интенсивность абразивно-эрозионного износа покрытия достаточно высокая, но она имеет тенденцию к уменьшению с увеличением давления реакционного газа в вакуумной камере до 0,3 Па; эта зона характеризуется высокой твердостью покрытия и искажениями кристаллической решетки [10, 11], которые наибольшие при давлении реакционного газа 0,1 Па, однако с увеличением давления реакционного газа эти параметры снижаются при еще достаточной твердости нитрид титанового покрытия, получаемого при давлении 0,3 Па; поэтому в данном случае, происходит снижение интенсивности абразивно-эрозионного износа покрытия;

- вторая зона абразивно-эрозионного износа покрытия, располагающаяся в окрестности точки A_1 при давлении реакционного газа 0,3 Па; в этом случае, интенсивность абразивно-эрозионного износа покрытия минимальная, это обусловлено тем, что твердость покрытия еще значительная, а искажения кристаллической решетки покрытия минимальные, а именно в этой зоне наилучшее сочетание параметров твердости и искажений кристаллической решетки покрытия;

- третья зона изменения интенсивности абразивно-эрозионного износа покрытия, образованного при давлении реакционного газа $p > 0,3$ Па; в этой зоне интенсивность абразивно-эрозионного износа покрытия с повышением давления реакционного газа начинает увеличиваться; при давлении реакционного газа $p > 0,4$ Па, интенсивность износа покрытия увеличивается из-за снижения его твердости и возникновения процессов интенсивного и катастрофического износа нитрид титанового покрытия.

Далее, были проведены исследования по определению зависимости интенсивности μ_v абразивно-эрозионного износа вакуумного нитрид титанового покрытия лопатки компрессора от технологических параметров процесса, а именно тока I дуги катода и напряжения U смещения на подложке. Результаты этих исследований приведены на рисунках 5 и 6. Они оказывают значительное влияние на температуру нагрева напыляемых деталей или образцов-свидетелей. Например, с увеличением объема загрузки деталями вакуумной камеры установки необходимо увеличивать значение этих параметров. Анализ зависимостей интенсивности абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия от технологических параметров показал, что наиболее рациональные параметры тока дуги катода составляют $I = 80 \dots 100$ А (рисунок 6), а напряжения смещения на подложке $U = 220 \dots 240$ В (рисунок 7). При полной загрузке деталями вакуумной камеры установки ток дуги катода должен быть 100 А, а напряжение смещения на подложке 240 В. При этом дальнейшее повышение этих режимов приводит к значительному нагреву подложки из-за увеличения температуры конденсации нитрид титанового покрытия. В этом случае, необходимо постоянно контролировать температуру нагрева деталей (лопаток).

Таким образом, анализ представленных зависимостей интенсивности абразивно-эрозионного износа нитрид титанового покрытия от технологических параметров показал, что наиболее рациональные параметры напыления покрытий являются следующие режимы: давление реакционного газа азота с параметрами в окрестностях точки A_1 (рисунок 5) – $p = 0,3$ Па; ток дуги катода с параметрами в окрестностях точки A_2 (рисунок 6) – $I = 90$ А; напряжение смещения на подложке с параметрами в окрестностях точки A_3 (рисунок 7) – $U = 230$ В.

Можно отметить, что на основании проведенных исследований особенностей износа лопаток компрессора, выполняемых по 20-ти ГТД модели ТВЗ-117 на ГП «Луганский авиационный ремонтный завод», установлено, что параметры эксплуатационной абразивно-эрозионной интенсивности износа покрытия из нитрида титана и параметры ускоренной абразивно-эрозионной интенсивности износа покрытия из нитрида титана на образцах-свидетелях связаны между собой следующей зависимостью:

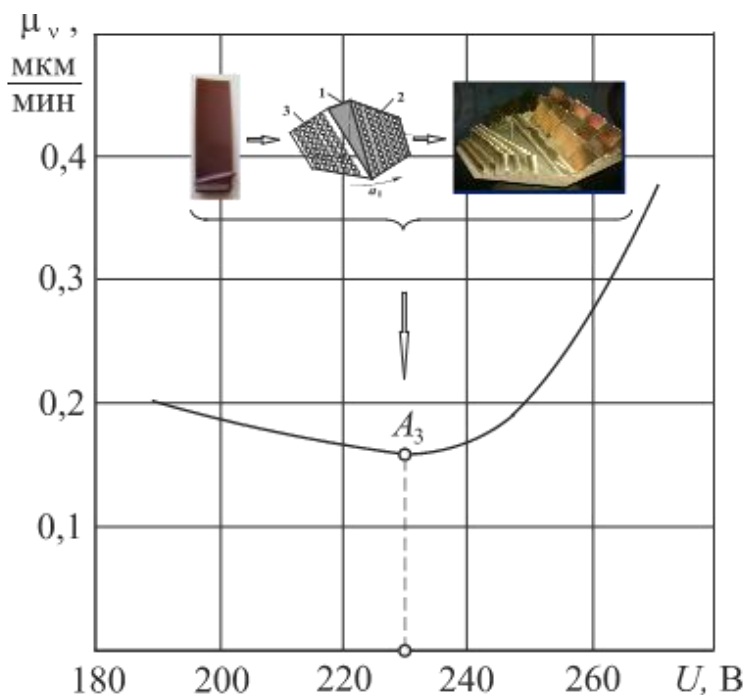


Рисунок 7. Зависимость интенсивности μ_v абразивно-эрозионного износа вакуумного нитрид титанового покрытия лопатки компрессора от технологического параметра – напряжения U смещения на лопатках

компрессоре ГТД, определяется в соответствии со следующим выражением:

$$k_o = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5, \quad (8)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий эксплуатационную концентрацию пыли в потоке среды до поступления в ГТД ($k_1 = 0,95$ при концентрации пыли в воздухе $0,1 \text{ г/м}^3$; $k_1 = 1,0$ при концентрации пыли в воздухе $0,2 \dots 0,3 \text{ г/м}^3$; $k_1 = 1,1$ при концентрации пыли в воздухе $0,5 \dots 1,0 \text{ г/м}^3$);

k_2 – коэффициент, учитывающий особенности и концентрацию пыли на лопатках в зонах ее максимального действия в зависимости от номера ступени лопаток ГТД;

k_3 – коэффициент, учитывающий твердость основных частиц пыли в потоке среды ($k_3 = 1,05$ при работе ГТД в условиях мягкой пыли, твердостью $H_\mu = 24 \dots 360 \text{ МПа}$; $k_3 = 1,1$ при работе ГТД в условиях пыли средней твердости $H_\mu = 1090 \dots 5360 \text{ МПа}$; $k_3 = 1,15$ при работе ГТД в условиях твердой пыли $H_\mu = 7967 \dots 11200 \text{ МПа}$);

k_4 – коэффициент, учитывающий изменения скорости движения потока среды по тракту компрессора ГТД и номерам ступеней лопаток с учетом заторможенности потока среды и особенностей ее движения по проточной части ($k_4 = 1,0 \dots 1,2$);

$$\mu_j = 0,918 \cdot 10^{-4} k_o \cdot \mu_v, \quad (7)$$

где k_o – коэффициент, учитывающий особенности эксплуатации лопаток в компрессоре ГТД.

Коэффициент k_o , учитывающий особенности эксплуатации лопаток в

k_5 - коэффициент, учитывающий зернистость пыли в потоке среды ГТД ($k_5=1,05$ при зернистости пыли 1 ... 10 мкм, $k_5=1,1$ при зернистости пыли 10 ... 50 мкм, $k_5=1,15$ при зернистости пыли 50 ... 100 мкм).

Заключение

Таким образом, в представленной работе выполнены исследования особенностей эксплуатации лопаток компрессора ГТД, при этом установлены закономерности неравномерного износа элементов пера в условиях действия на них эксплуатационных воздействий. Эти закономерности позволили разработать многослойные ФОП лопаток компрессора на основе функционально-ориентированного подхода и особенностей их эксплуатации в ГТД. Для упрощения процесса напыления многослойного ФОП предложен ряд вариантов формирования ПКГ слоев покрытия лопаток. При этом разработан алгоритм синтеза структуры технологического процесса для формирования многослойного ФОП лопаток компрессора вертолетного ГТД на базе вакуумного ионно-плазменного покрытия. Этот алгоритм позволяет последовательно на базе рекуррентного процесса выполнять формирования слоев многослойного ФОП, имеющих свой конкретный ПКГ каждого слоя. Это дает возможность создания ФОП переменной толщины из слоев одинаковой толщины. В работе установлены рациональные технологические параметры процесса формирования слоев ФОП из нитрида титана на вакуумной ионно-плазменной установке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Изаксон, А. М. Советское вертолетостроение / А. М. Изаксон. – М.: Машиностроение, 1981. – 295 с.
2. Иностранные авиационные двигатели. – М.: ЦИАМ, 1992. – 286 с.
3. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.
4. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
5. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Д. А. Михайлов // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк : ДонНТУ, 2014. - Вип. 4 (50). - С. 126 - 131.
6. Михайлов, Д. А. Особенности структурирования многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. - Вып. 2 (69). - С. 36 - 49.
7. Михайлов, Д. А. Особенности формирования параметров многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. - Вып. 3 (70). - С. 34 - 44.
8. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
9. Патент № 2718877 RU. Кл. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов [и др.]. Заявка № 2018107164 от 26.02.2018; – Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.

10. Внуков, Ю. Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю. Н. Внуков [и др.]. – К.: Техника, 1992. – 143 с.
11. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов. / С. Н. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
12. Михайлов, Д. А. Технологические особенности формирования функционально-ориентированных свойств элементов структуры вертолетного газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2023. - Вып. 3 (82). - С. 44 - 56.

REFERENCES

1. Izakson, A. M. Soviet Helicopter Engineering / A. M. Izakson. - Moscow: Mashinostroenie, 1981. - 295 p.
2. Foreign Aircraft Engines. - Moscow: TsIAM, 1992. - 286 p.
3. Inozemtsev, A. A. Gas Turbine Engines / A. A. Inozemtsev, V. L. Sandratsky. - Perm: JSC Aviadvigatel, 2006. - 1204 p.
4. Grigoriev, V. A. Helicopter Gas Turbine Engines. / V. A. Grigoriev [et al.]. - Moscow: Mashinostroenie, 2007. - 491 p.
5. Mikhailov, D. A. Main Features of Operation of GTE Compressor Blades and Classification of Their Operational Functions / D. A. Mikhailov // Progressive Technologies and Machine Building Systems: International Collection of Scientific Works. – Donetsk: DonNTU, 2014. - Issue. 4 (50). - P. 126-131.
6. Mikhailov, D. A. Features of Structuring Multilayer Functionally-Oriented Coatings of Gas Turbine Engine Blades / D. A. Mikhailov [et al.] // Progressive Technologies and Machine Building Systems: International Collection of Scientific Works. – Donetsk: DonNTU, 2020. - Issue 2 (69). - P. 36 - 49.
7. Mikhailov, D. A. Features of the formation of parameters of multilayer function-oriented coatings of gas turbine engine blades / D. A. Mikhailov [et al.] // Progressive technologies and systems of mechanical engineering: International collection of scientific papers. - Donetsk: DonNTU, 2020. - Issue 3 (70). - P. 34 - 44.
8. Mikhailov, A. N. Fundamentals of the synthesis of function-oriented technologies / A. N. Mikhailov. - Donetsk: DonNTU, 2009. - 346 p.
9. Patent No. 2718877 RU. Cl. C23C 14/04. Method for applying a function-oriented wear-resistant coating to a gas turbine engine blade / A. N. Mikhailov, D. A. Mikhailov, V. A. Mikhailov [et al.]. Application No. 2018107164 dated February 26, 2018; – Bulletin No. 11, April 15, 2020. – 7 p.
10. Vnukov, Yu. N. Application of wear-resistant coatings to high-speed cutting tools / Yu. N. Vnukov [et al.]. – K.: Tekhnika, 1992. – 143 p.
11. Grigoriev, S. N. Methods for increasing the durability of cutting tools: a textbook for students of higher technical institutions. / S. N. Grigoriev. – Moscow: Mashinostroenie, 2009. – 368 p.
12. Mikhailov, D. A. Technological Features of the Formation of Functionally Oriented Properties of Structural Elements of a Helicopter Gas Turbine Engine / D. A. Mikhailov [et al.] // Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering: International Collection of Scientific Papers. – Donetsk: DonNTU, 2023. - Issue 3 (82). - Pp. 44-56.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.03.2026; одобрена после рецензирования 13.03.2026; принята к публикации 24.03.2026.

The article was submitted March 3, 2026; approved after reviewing March 13, 2026; accepted for publication March 24, 2026.