

УДК 621.01

**А. Н. Михайлов<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф., **А. В. Анастасьев<sup>1</sup>**, аспирант,  
**Н. С. Пичко<sup>2</sup>**, д-р филол. наук, проф.

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет,

<sup>2</sup> Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинск

Тел./Факс: +7(949)349-74-28; E-mail: [anastasyev.av@yandex.ru](mailto:anastasyev.av@yandex.ru)

## ОСНОВЫ СИНТЕЗА МЕХАНИЗМА ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО- ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

*В данной статье проведен анализ основных особенностей развития разрушения функциональных элементов лопаток турбины газотурбинного двигателя. При этом отмечено, что перо лопатки подвергается переменному температурному воздействию, приводящему в дальнейшем к неравномерному износу. Рассмотрены существующие методы повышения ресурса рабочих и сопловых лопаток турбины, и определены основные пути повышения их ресурса на основе теплозащитных покрытий на базе функционально-ориентированных технологий. Предложен принцип повышения ресурса за счет обеспечения эквивалентных свойств всех функциональных элементов пера лопатки турбины, основанный на функционально-ориентированном подходе. Определены основные направления для дальнейшего исследования.*

**Ключевые слова:** лопатка, турбина, ГТД, ресурс, температура, покрытие

**A. N. Mikhaylov, A. V. Anastasyev, N. S. Pichko**

### BASIS OF SYNTHESIS OF THE MECHANISM OF INCREASING THE RESOURCE OF TURBINE BLADES OF A GAS TURBINE ENGINE ON THE BASIS OF A FUNCTION-ORIENTED APPROACH

*This article analyzes the main features of the growth of the destruction of the functional elements of the turbine blades of a gas turbine engine. At the same time, it was noted that the blade is subjected to variable temperature effects, which subsequently leads to irregular deterioration. The existing methods of increasing the resource of working and nozzle blades of the turbine are considered, and the main ways of increasing their resource are determined on the basis of heat-shielding coatings based on functionally oriented technologies. The principle of increasing the resource by providing equivalent properties of all functional elements of the turbine blade airfoil based on a functionally oriented approach is proposed. The main directions for further research are determined.*

**Keywords:** blade, turbine, gas turbine engine, resource, temperature, coating

#### 1. Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) основательно вошли в современную технику, независимо от того, применяются ли они в авиации, флоте или энергетических установках. При этом во всех сферах деятельности наблюдается тенденция к повышению КПД, и как следствие – надежности всего изделия в целом, и каждой его детали в частности. Надежная работа газотурбинного двигателя в значительной мере зависит от работоспособности лопаточного аппарата, являющегося его неотъемлемой частью. Температура материала лопаток турбины ГТД может достигать 80% от величины температуры плавления, при этом лопатка находится в нагруженном состоянии [1].

Лопатки турбины (далее – ЛТ) являются наиболее нагруженными, ответственными и массовыми деталями ГТД.

На рис.1 представлены основные функциональные элементы пера лопатки турбины, а именно: входная и выходная кромки, корыто пера лопатки, спинка пера лопатки (тело пера лопатки на рисунке не обозначено). При этом, с учетом сложной пространственной формы ЛТ, в процессе работы тело ЛТ подвергается действию высоких температур неравномерно [2] (рис.2). Подобное распределение температуры вызвано

как конструктивными особенностями ЛТ, такими как сложный аэродинамический профиль переменного сечения, так и процессом работы турбины ГТД представленном на рис. 3. В процессе работы [4] поток рабочих газов высокой температуры из камеры сгорания (КС) попадает на лопатки соплового аппарата (СА) первой ступени турбины, откуда благодаря специфической форме профиля пера лопатки перенаправляется на лопатки рабочего колеса (РК) первой ступени турбины. Далее процесс проходит по аналогичному принципу на всех остальных ступенях турбины, число которых может достигать 4 и более, при этом температура рабочих газов падает с каждой ступенью. Как следствие такого неравномерного распределения температуры, под действием эксплуатационных воздействий, в зонах максимальной температуры происходит повреждение защитного покрытия, приводящее к катастрофическим разрушениям пера лопатки в дальнейшем.



Рисунок 1. Основные элементы пера лопатки турбины

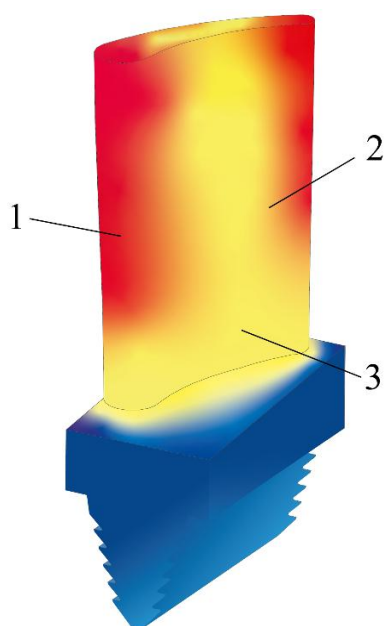


Рисунок 2. Распределение температуры тела лопатки турбины по зонам:  
1 – максимальной температуры;  
2 – высокой температуры;  
3 – умеренной температуры

Как следствие такого неравномерного распределения температуры, под действием эксплуатационных воздействий, в зонах максимальной температуры происходит повреждение защитного покрытия, приводящее к катастрофическим разрушениям пера лопатки в дальнейшем.

Целью данной работы является синтез принципа повышения ресурса ЛТ ГТД в условиях действия неравномерного высокотемпературного износа элементов пера лопатки за счет повышения стойкости её отдельных функциональных элементов (ФЭ) на базе принципов функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [3].

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: выполнить исследование особенностей разрушения функциональных элементов ЛТ ГТД, провести анализ существующих методов повышения ресурса рабочих и сопловых лопаток, провести синтез принципа повышения ресурса ЛТ ГТД на основе ФОТ.

2. Анализ особенностей разрушения ЛТ ГТД

## 2. Анализ особенностей разрушения ЛТ ГТД

В процессе работы (рис. 3) ЛТ ГТД подвергаются воздействию высокой температуры рабочих газов, состоящих из

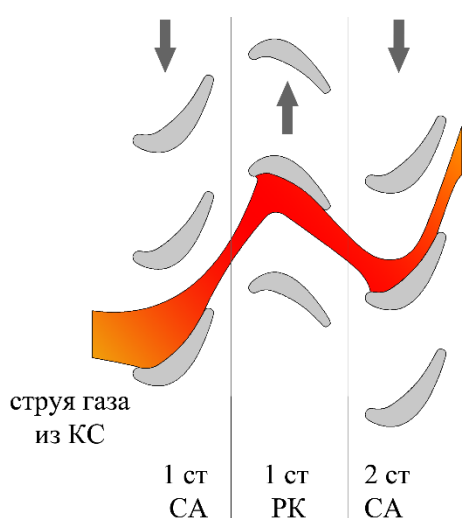


Рисунок 3. Схема процесса работы турбины ГТД

продуктов сгорания топлива и мельчайших абразивных частиц, которые оказывают температурные, коррозионные и абразивные воздействия в совокупности с растягивающими и изгибающими напряжениями, вызванными работой турбины. Характерные повреждения представлены на рисунке 4.

Катастрофическим повреждениям и разрушениям, таким как прогар или излом, предшествует активное развитие сульфидной коррозии, усугубленной действием высоких температур и развитие усталостных трещин.

Эксплуатационные воздействия, которым в процессе работы подвергаются лопатки турбины, по механизму их действия, можно структурировать в три основные группы: механические, химические и температурные (рис. 5).

При этом анализируя приведенную структуру прослеживается закономерность, что при увеличении воздействий – усиливается их комплексное воздействие на лопатки турбины, ускоряющее их выход из строя.

В общем случае, причинами разрушения лопаток турбин могут являться [6, 7]:

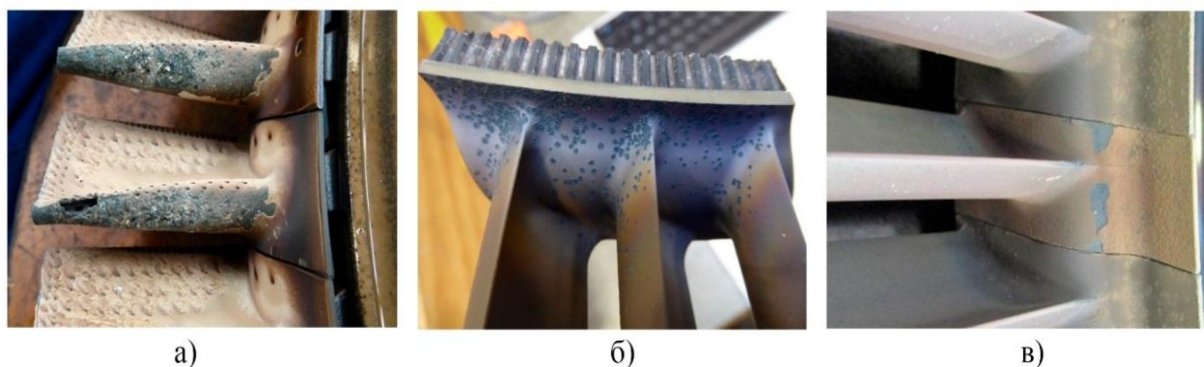


Рисунок 4. Повреждения ЛТ ГТД [5]: а – прогар лопаток по входной кромке, б – коррозионные повреждения, в – сколы защитного покрытия.

- нарушение условий эксплуатации;
- погрешности при получении заготовки;
- последствия механической обработки (шлифовальные прижоги, концентраторы напряжений и т.д.)
- превышение предельных температурных воздействий;
- растягивающие и изгибающие напряжения в процессе эксплуатации;
- ошибки при сборке (несоответствия заложенных посадок и т.д.);
- попадание посторонних предметов;
- усталостные напряжения при длительной эксплуатации;



Рисунок 5. Структура комплексных воздействий на ЛТ ГТД

- сульфидная (газовая) коррозия (высокотемпературная и низкотемпературная коррозия);
- эрозионный износ;
- вибрационные напряжения.

Выполненный анализ причин разрушения и их особенностей позволил установить:

1. В процессе эксплуатации ЛТ подвергаются комплексному разрушению, вызванному совместным действием механических, температурных и химических воздействий.

2. Эксплуатационные функции оказывают неравномерное действие на профиль лопатки, что вызывает неравномерный износ и последующее разрушение.

Ориентируясь на вышеизложенное, следует отметить, что для

осуществления возможности обеспечения неравномерных свойств профиля лопатки, которые позволили бы эффективно равномерно оказывать сопротивление эксплуатационным воздействиям – необходимо применение специальных функционально-ориентированных технологий. Для обеспечения этих изменяющихся свойств необходима разработка методов реализации принципов функциональной ориентации.

### 3. Анализ существующих методов повышения ресурса рабочих и сопловых лопаток

В настоящее время разработаны и активно применяются множество различных методов повышения качества лопаток турбин ГТД. Условно, их можно разделить на методы повышения качества получения заготовок и методы улучшения отделочно-упрочняющей обработки. В данной работе будут рассматриваться исключительно методы улучшения отделочно-упрочняющей обработки. Применение современных сплавов, новых разработок в технологии литья, методов направленной кристаллизации, использование охлаждаемых лопаток значительно увеличили эксплуатационные свойства лопаток турбины, однако в наше время акцент в разработках смещается на применение теплозащитных покрытий, т.к. они позволяют значительно повысить рабочую температуру газа (на 100°C и выше).

Теплозащитные покрытия (ТЗП) представляют собой комбинацию из внешнего керамического и внутреннего жаростойкого слоев (рис. 6). При этом внешний слой обеспечивает теплозащитный эффект, за счет низкой теплопроводности, а внутренний жаростойкий слой обеспечивает сцепление керамического слоя с подложкой и защиту поверхности лопатки от высокотемпературного окисления [8]. Толщина такого покрытия может достигать 100-200мкм и более. Однако, увеличение толщины покрытий ограничено появлением остаточных напряжений и их ростом с увеличением толщины. Остаточные напряжения влияют и на прочность соединения покрытия с подложкой.



Рисунок 6. Структура ТЗП

Благодаря исследованиям, проведенным авторами в их работах [2, 9] известно, что применение жаростойких покрытий на основе циркония (Zr) позволяют снизить температуру на теле лопатки на величину  $0,5-0,66^{\circ}\text{C}$  за  $1\text{ мкм}$  покрытия; а покрытия на основе комбинации иттрия (Y) и циркония (Zr) –  $1-1,1^{\circ}\text{C}$  за  $1\text{ мкм}$  покрытия. При этом снижение толщины слоя, или его повреждение приводит к существенному снижению ресурса лопатки.

Возникновение различных температурных зон на профиле пера лопатки (см. рис. 2) приводит к неравномерным напряжениям и различным механизмам дальнейшего разрушения. Так, в зонах «высоких» температур наблюдается преждевременное интенсивное окисление из-за предельного уровня температур (более  $1150^{\circ}\text{C}$ ), и напряжения сжатия в покрытии, а в зонах «низких» температур – наблюдается возникновение термоусталостных трещин, приводящих к фрагментации покрытия и его разрушению.

Существующие традиционные методы повышения ресурса ЛТ ГТД обеспечивают повышение его ресурса в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий, однако не позволяют значительно повысить ресурс ГТД в целом, за счет невозможности его адаптации к особенностям эксплуатации [10].

Несмотря на широкое применение в изготовлении авиационных деталей, а именно лопаток турбин, такие покрытия имеют только однородную толщину, что никак не учитывает неравномерность нагрева профиля лопатки.

Перспективным подходом к решению вопроса повышения ресурса ЛТ ГТД является функционально-ориентированный подход (ФОП), который позволяет обеспечивать требуемые свойства функциональных элементов изделия или даже превосходить их за счет особых принципов ориентации [3].

Предложенный авторами в работе [10] принцип обеспечения кратного ресурса за счет увеличения межремонтного ресурса ГТД и количества восстановлений его элементов основанный на обеспечении ФОС на базе ФОТ является довольно перспективным, особенно в плане увеличения количества восстановлений его элементов.

Таким образом, проведенные исследования существующих методов повышения ресурса ЛТ ГТД позволили установить, что:

1. Нанесение ТЗП является перспективным методом повышения ресурса;
2. При нанесении покрытий необходимо учитывать различные температурные зоны на профиле пера лопатки.
3. Нанесение ТЗП должно быть основано на ФОП, с учетом особых принципов ориентации.
4. При расчете характеристик покрытия следует учитывать, что в общем теплозащитные свойства современных материалов позволяют достичь снижения температуры на  $0,5-1^{\circ}\text{C}$  за  $1\text{ мкм}$  нанесенного покрытия.

#### 4. Синтез механизма повышения ресурса ЛТ ГТД на основе ФОТ

Выполненный анализ особенностей разрушения лопаток и существующих методов повышения их ресурса показывает, что процесс разрушения их функциональных элементов происходит неравномерно, а нанесение защитных покрытий не позволяет в полной мере нивелировать неравномерность износа.

С целью повышения ресурса ЛТ ГТД в нашей работе предлагается уравнивать ресурс всех функциональных элементов лопатки, за счет применения функционально-ориентированных технологий. Такой эффект может быть достигнут за счет применения принципа обеспечения эквивалентных свойств функциональных элементов (ЭСФЭ). Суть принципа заключается в анализе температурных воздействий на функциональные элементы ЛТ ГТД и придание им требуемых свойств за счет применения специального защитного покрытия, например, способом ионно-плазменного напыления, который является достаточно перспективным и технологичным. Суть метода заключается в нанесении покрытий из плазмы электродугового разряда интегрально холодным катодом, при котором между анодом и катодом (из наносимого материала) возбуждается разряд, протекающий в продуктах эрозии катода.

При нанесении покрытий данным методом также можно проводить предварительную ионную очистку поверхности путем ионной бомбардировки ускоренными ионами распыленного вещества, что повышает уровень адгезии покрытия с материалом поверхности лопатки (подложки).

В данной работе предлагается повышение ресурса, за счет выравнивания температурных воздействий на перо лопатки, без учета других видов износа, рассмотренных ранее.

Так, исходя из распределения температур по профилю пера (рис. 2) и анализу разрушений ресурс функциональных элементов можно представить в виде:

$$R_1 < R_2 < R_3 < \dots < R_n, \quad (1)$$

где,  $R_1$  – ресурс зоны максимальных эксплуатационных воздействий;  $R_2$  – ресурс зоны высоких эксплуатационных воздействий;  $R_3$  – ресурс зоны умеренных эксплуатационных воздействий;  $R_n$  – ресурс зоны минимальных эксплуатационных воздействий. Если разделить перо лопатки на  $j$  количество сечений, тогда в каждом из сечений равенство (1) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} R_1^1 < R_2^1 < R_3^1 < \dots < R_n^1 \\ R_1^j < R_2^j < R_3^j < \dots < R_n^j \end{aligned} \quad (2)$$

где,  $R_1^1, R_2^1, R_3^1, \dots, R_n^1$  – ресурс зон первого сечения;  $R_1^j, R_2^j, R_3^j, \dots, R_n^j$  – ресурс зон  $j$ -го сечения. При этом четко видно различие ресурсов зоны всего диапазона температурных воздействий.

Применение принципа ЭСФЭ, в свою очередь, позволит обеспечить эти зоны соответствующим функционально-ориентированным покрытием, гарантирующим эквивалентность их ресурса. Тогда уравнение (2) примет вид:

$$R_1^1 = R_2^1 = R_3^1 = \dots = R_n^1$$

$$R_1^j = R_2^j = R_3^j = \dots = R_n^j$$
(3)

Исходя из этого планируемый ресурс всех функциональных элементов и зон ЛТ ГТД может быть равен [11, 12, 13]:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n,$$
(4)

Для реализации принципа ЭСФЭ и обеспечения равенства (4) необходимо решение следующих задач:

1. Разделение ЛТ на функциональные элементы (ФЭ), части, зоны;
2. Анализ функциональных воздействий на ФЭ, части и зоны;
3. Подбор структуры наносимого покрытия;
4. Определение требуемых свойств будущего покрытия для каждого ФЭ, части и зоны ЛТ ГТД.

При этом, на всех этапах, согласно ФОТ и особым принципам ориентации, должна быть реализована обратная связь [3].

Применяемые для защиты лопаток турбины защитные покрытия должны учитывать функциональные особенности различных элементов лопатки, которые могут существенно отличаться на различных элементах профиля пера. Так, в зонах воздействия наибольших температур необходимо обеспечить максимальный теплозащитный эффект, при этом обеспечив равномерность теплозащитных свойств по всей плоскости наносимого защитного покрытия, с целью минимизации возникновения дополнительных внутренних напряжений, вызванных перепадами температур. Гипотетическая схе-

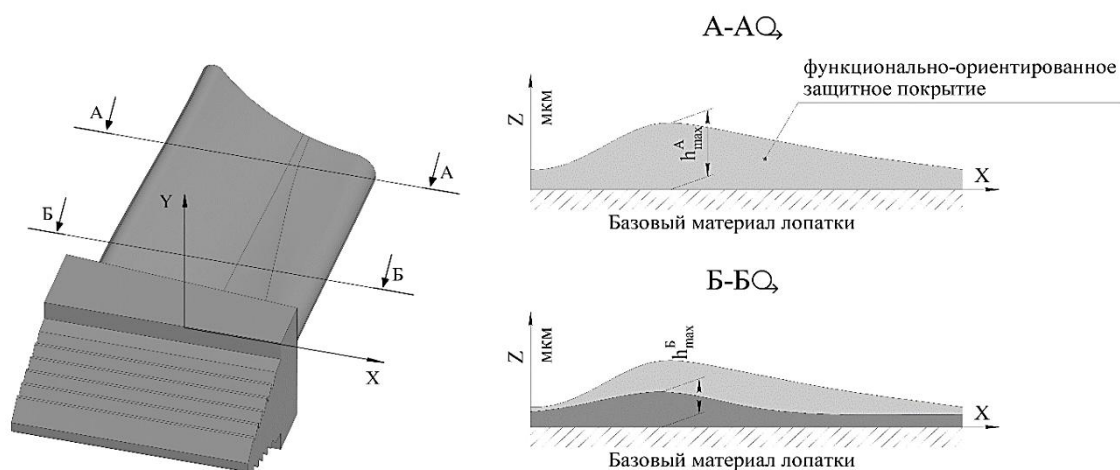


Рисунок 7. Гипотетическая схема функционально-ориентированного защитного покрытия, согласно принципу ЭСФЭ

ма функционально-ориентированного покрытия, согласно принципу ЭСФЭ, представлена на рис. 7. Характерной особенностью такого покрытия является максимальная приближенность свойств покрытия в каждом ФЭ оказываемым на него функциональ-

ным воздействиям. При этом, чем ближе и точнее будет проведено разделение тела пера на ФЭ, части и зоны, и определены воздействия, тем адекватнее может быть синтезирована структура теплозащитного покрытия. Так, на представленной схеме (рис.7.) в сечении А-А, которое находится в зоне максимальных эксплуатационных воздействий, покрытие будет иметь переменную толщину, достигая максимальной  $h_{max}^A$  в зонах, подвергающихся максимальным воздействиям. Следует отметить, что в каждом возможном сечении покрытие может иметь переменную толщину. При этом, в сечении Б-Б, находящейся в зоне высоких эксплуатационных воздействий, максимальная толщина покрытия  $h_{max}^B$  существенно меньше, за счет чего обеспечивается планируемый равный ресурс функциональных элементов (4).

Обеспечение вышеуказанных свойств может быть достигнуто комплексно путем подбора материала покрытия, и его переменной толщины в различных функциональных элементах пера ЛТ.

В перспективе следует разработать общую структуру технологического процесса нанесения защитных покрытий на основе ФОТ с обеспечением принципе ЭСФЭ и проработать методику её реализации.

## 5. Заключение

Таким образом, проведенные в данной работе исследования позволили решить следующее:

- выполнен анализ особенностей разрушения функциональных элементов ЛТ ГТД, при этом определить их комплексный характер;
- проведен анализ существующих методов повышения ресурса рабочих и сопловых лопаток турбины, и определен перспективный путь для дальнейшего исследования – применение ФОТ;
- установить основные связи между характеристиками существующих теплозащитных покрытий и механизмом их разрушения;
- проведен синтез и разработан принцип обеспечения повышения ресурса ЛТ за счет обеспечения эквивалентных свойств их функциональных элементов;
- выделены направления дальнейших исследований.

Проведенные в данной работе исследования позволили разработать общий принцип повышения ресурса ЛТ ГТД на базе ФОТ, за счет применения принципа обеспечения эквивалентных свойств функциональных элементов. Применение данного принципа, основанного на ФОТ, позволит уравнивать ресурс функциональных элементов пера лопатки.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Тихонов, А. С. Внедрение технологий «Цифрового двойника» применительно к оптимизации теплового состояния и повышению ресурса охлаждаемых лопаток промышленных газовых турбин / А. С. Тихонов, А. Ю. Тамм, А. В. Пивоварска // Сборник докладов LXV научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Фундаментальные проблемы исследований, разработок и реализации научных достижений в области газовых турбин в российской экономике». – Санкт-Петербург: ОАО «ВТИ», 2018. – С. 44-50.
2. Reyhani M. R. et al. Turbine blade temperature calculation and life estimation-a sensitivity analysis // Propulsion and power Research. – 2013. – Т. 2. – №. 2. – С. 148-161.



3. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов ; А. Н. Михайлов. – Донецк: Технополис, 2009. – 346 с. – ISBN 9667907244.
4. Анализ условий работы поверхностных слоев рабочих лопаток турбины современных двигателей / М. А. Петрова, Мехди Саадатибаи, А. И. Тарасов / Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №217 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-usloviy-raboty-poverhnostnyh-sloev-rabochih-lopatok-turbiny-sovremennyh-dvigatelay> (дата обращения: 24.02.2022).
5. Aust, J. Taxonomy of Gas Turbine Blade Defects / J. Aust, D. Pons / Aerospace, - 2019. №6 (58). – Doi:10/3390/aerospace6050058.
6. Ахметшина, Э. Р. Обзор. Виды повреждений и ремонт деталей газотурбинного двигателя / Э. Р. Ахметшина, Ф. Н. Куртаева // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики "АНТЭ-2015" : Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции, Казань, 19–21 октября 2015 года / Министерство образования и науки Российской Федерации Российский фонд фундаментальных исследований Министерство образования и науки Республики Татарстан Академия наук Республики Татарстан КНИТУ-КАИ Лаборатория МФТП. – Казань: Издательство "Бриг", 2015. – С. 203-209.
7. Старцев, Н. И. Конструкция узлов авиационных двигателей: турбина и камера сгорания / Н. И. Старцев, С. В. Фалалеев – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 108 с.
8. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий / С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. М. Гаямов, П. В. Матвеев // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 1(26). – С. 17-20.
9. Мубояджян, С. А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование / Мубояджян С. А., Будиновский С. А. // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ionno-plazmennaya-tehnologiya-perspektivnye-protsessy-pokrytiya-oborudovanie> (дата обращения: 28.01.2022).
10. Михайлов, А. Н. Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационного двигателя на базе функционально-ориентированной технологии / А. Н. Михайлов, Т. В. Хавлин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 1(56). – С. 84-100. – EDN ZHVCIB.
11. Михайлов, В. А. Общие основы и принципы повышения ресурса газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов, А. П. Пичко, А. В. Чугункин [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 3(58). – С. 32-43. – EDN ZEKPBVJ.
12. Михайлов, Д. А. Методика синтеза связанного технологического процесса формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия лопаток газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – № 4(71). – С. 44-63. – EDN UZUVWV.
13. Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. – № 1(72). – С. 40-57. – EDN GTKZHP.

Поступила в редколлегию 17.03.2022 г.