

УДК 621.438

¹ А. П. Пичко, аспирант, ² Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доцент,² Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доцент, ³ Т. В. Хавлин, аспирант,² А. А. Колодяжный, аспирант, ¹ В. А. Михайлов, аспирант,¹ А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, профессор¹ ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР² ГОУВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНР³ ГООВПО «Донецкая академия внутренних дел», г. Донецк, ДНР

Тел.: +38 071 3060879; E-mail: mntk21@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВОЙСТВ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА И ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ И РАВЕНСТВА ИХ РЕСУРСОВ

В статье рассмотрены вопросы, связанные с особенностями обеспечения свойств лопаток компрессора и турбины газотурбинной установки на базе функционально-ориентированных покрытий и принципа равенства их ресурсов. В работе показано, что на лопатки компрессора и лопатки турбины в процессе их эксплуатации действуют принципиально различные эксплуатационные воздействия. При этом показано, что ресурс этих лопаток необходимо выполнять из условий равенства или кратности ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины. Это планируется выполнять на базе функционально-ориентированных покрытий. Представлена классификация покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины, а также показаны гипотетические схемы структуры покрытий. В работе представлены выражения для определения параметров функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины.

Ключевые слова: газотурбинная установка, лопатки компрессора и турбины, принцип равенства ресурса лопаток, функционально-ориентированные покрытия.

A. P. Pichko, D. A. Mikhaylov, E. A. Sheyko, T. V. Khavlin, A. A. Kolodyazhnyi, V. A. Mikhaylov, A. N. Mikhaylov

FEATURES PROVIDING THE PROPERTIES OF COMPRESSOR BLADES AND A GAS TURBINE TURBINE ON THE BASIS OF FUNCTIONALLY-ORIENTED COATINGS AND THE EQUALITY OF THEIR RESOURCES

The article discusses issues related to the peculiarities of ensuring the properties of the compressor blades and the turbine of a gas turbine unit based on function-oriented coatings and the principle of equality of their resources. It is shown in work that the compressor blades and turbine blades in the process of their operation are fundamentally different operational effects. It is shown that the resource of these blades must be performed from the conditions of equality or multiplicity of resources of the compressor blades and turbine blades. This is planned to be performed on the basis of function-oriented coatings. A classification of coatings for compressor blades and turbine blades is presented, and hypothetical schemes of coating structures are shown. The paper presents expressions for determining the parameters of functionally-oriented coatings of compressor blades and turbine blades.

Keywords: gas turbine unit, compressor and turbine blades, principle of equal resource of blades, function-oriented coatings.

1. Введение

В настоящее время в нефтегазовой промышленности широко используются газотурбинные установки (ГТУ) для решения технологических и вспомогательных задач производства. При этом одними из основных подсистем ГТУ являются компрессор и турбина, в которых смонтирован целый комплекс лопаток компрессора (рис. 1) и лопа-

ток турбины (рис. 2). Общее количество лопаток в ГТУ может достигать более трех с половиной тысяч лопаток [1, 2, 3].

Одним из перспективных вариантов повышения ресурса лопаток турбокомпрессора, в целом, и обеспечения равенства ресурсов лопаток компрессора и турбины является



Рисунок 1. Общий вид лопаток компрессора с нитрид титановым покрытием



Рисунок 2. Общий вид лопаток турбины

турбно-защитное жаростойкое покрытие; второй модуль – абразивно-эрозионное жаро-

ется применение специальных покрытий [4, 5, 6]. При этом для лопаток компрессора должен применяться свой комплекс покрытий, а для лопаток турбины другой комплекс покрытий, в зависимости от действия эксплуатационных функций [7]. Это обусловлено тем, что лопатки компрессора и лопатки турбины эксплуатируются в принципиально различных условиях. Вместе с тем, за счет применения различных комплексов покрытий (модулей покрытий) для лопаток компрессора и лопаток турбины обеспечивается возможность выравнивания ресурсов этих групп лопаток турбокомпрессора, а также их повышения в условиях действия различных эксплуатационных функций. При этом обеспечивается возможность управления (регулирования) свойствами одних лопаток относительно других по принципу равенства или кратности ресурсов различных групп лопаток турбокомпрессора.

Покрытия лопаток компрессора должны решать вопросы исключения процессов действия абразивно-эрозионного износа поверхностного слоя лопатки [8, 9, 10]. Эти воздействия в основном преобладают на лопатках компрессора.

В процессе эксплуатации газотурбинной установки на лопатки турбины действуют абразивно-эрозионные функции и температурные воздействия. Поэтому покрытия лопаток турбины должны как минимум защищать одновременно от действия абразивно-эрозионных и температурных воздействий. Для решения этих вопросов покрытие должно быть комплексным: первый модуль - температура-защитное жаростойкое покрытие; второй модуль – абразивно-эрозионное жаро-

стойкое покрытие. Между основным материалом лопатки и первым модулем покрытия, а также между различными модулями покрытия наносятся модули связующих покрытий.

Можно отметить, что в настоящее время разработаны, и общий подход, и основные особенности для реализации функционально-ориентированных свойств на базе функционально-ориентированных покрытий (ФОП) лопаток компрессора [8] и лопаток турбины [11]. При этом не установлены основные связи между параметрами этих покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины для выравнивания их ресурса при эксплуатации ГТУ. Поэтому в данной работе основными результатами будут исследования по обеспечению выравнивания ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины, в условиях действия на них эксплуатационных функций, за счет применения функционально-ориентированных покрытий [8, 9, 11].

Целью работы является повышение ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины ГТУ за счет обеспечения равного или кратного их ресурса на основе применения ФОП. В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи: выполнить анализ общих особенностей в обеспечении свойств лопаток компрессора и турбины; представить гипотетическую схему структуры покрытий лопатки компрессора и турбины для реализации ФОП; установить основные связи между параметрами покрытий лопаток и компрессора, из условия равенства или кратности их ресурсов.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Общие особенности в обеспечении свойств лопаток

Можно отметить, что для лопаток компрессора целесообразны вакуумные ионно-плазменные покрытия. Для нанесения этих покрытий используется метод конденсации в вакууме на поверхности лопаток турбокомпрессора вещества, получаемого из плазменной фазы посредством плазмо-химических процессов с дополнительной ионной бомбардировкой. Этот процесс называется метод КИБ (конденсация и ионная бомбардировка) [4]. Данный метод обеспечивает возможность нанесения высокопрочных и износостойких покрытий на лопатки компрессора

Этот метод основан на том, что в плазменном потоке металла, формируемом при помощи вакуумной дуги и ускоряющегося за счет подачи отрицательного потенциала к лопаткам компрессора, происходят плазмо-химические процессы с реактивным газом. Этим методом можно наносить покрытия на основе нитридов, карбидов, карбонитридов, оксидов и других соединений металлов IV-VI групп Периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

Главным при нанесении покрытий данным методом является то, что обеспечивается возможность проведения ионной очистки поверхности путем ионной бомбардировки ускоренными ионами распыленного вещества. Это создает условия для высокой адгезии покрытия с материалом поверхности лопатки (подложки). При высоком отрицательном потенциале подложки (1,0 ... 1,1 кВ и выше) распыляется не только осаждаемый материал катода, но и частично поверхностный слой подложки (лопатки). Это обеспечивает ионное травление подложки и очистку поверхности. При этом ускоренные ионы катода внедряются в подложку и насыщают тонкий поверхностный слой подложки и обеспечивается надежная адгезия покрытия к подложке.

Для лопаток турбины необходимо наносить покрытия двух видов:

- температурно-защитное жаростойкое покрытие (метод газового или детонационно-газового напыления или другие методы; напыляемое покрытие – керамика, композитное или композиционное покрытие);

- абразивно-эрозионно-жаростойкое покрытие (метод газового или детонационно-газового напыления покрытия или другие методы; напыляемое покрытие – керамика, композитное или композиционное покрытие).

Особенно важным для лопаток компрессора и лопаток турбины, эксплуатирующихся в принципиально различных условиях, является обеспечение свойств их покрытий (физико-механические свойства, толщина покрытия, количество слоев в модуле покрытия и т.п.) из условия равенства или кратности ресурсов.

Решение этих вопросов можно выполнять на базе применения ФОП [6, ..., 11]. На рис. 3 представлена классификация покрытий лопаток турбокомпрессора и связи между параметрами покрытий компрессора и турбины. Здесь показано, что свойства покрытий должны быть ориентированы как на лопатки компрессора, так и лопатки турбины в отдельности, в зависимости от особенностей их эксплуатации. Вместе с тем,

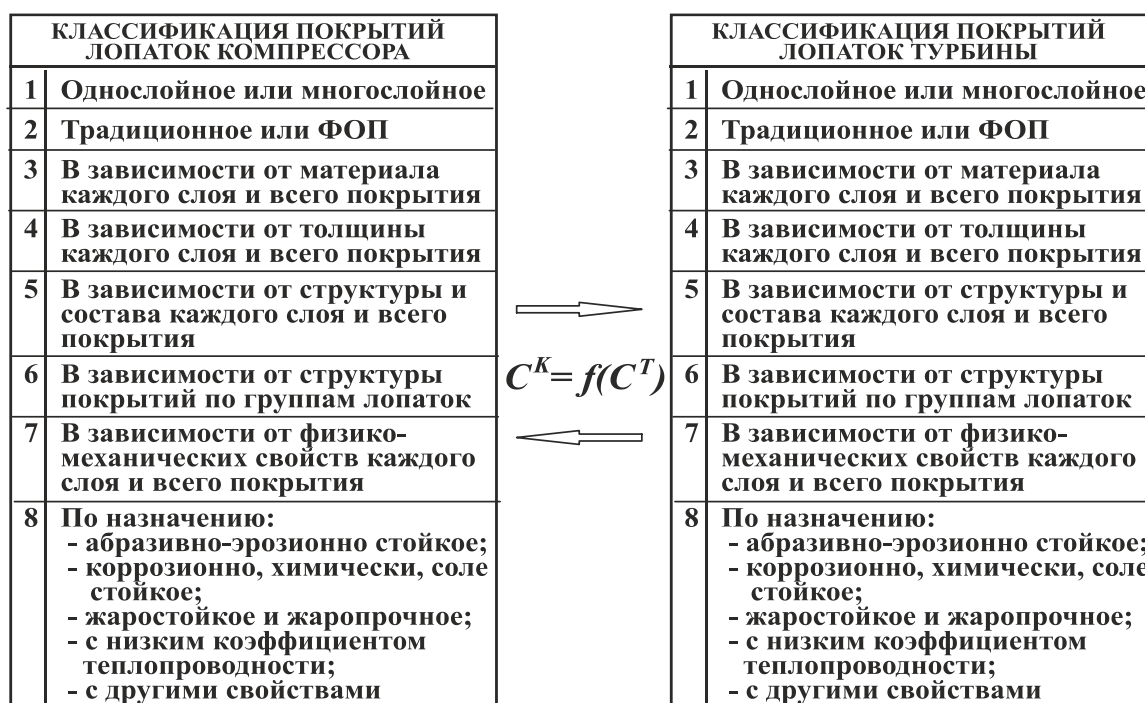


Рисунок 3. Классификация покрытий лопаток турбокомпрессора и связи между параметрами покрытий компрессора и турбины

эти свойства f покрытий лопаток турбокомпрессора должны иметь связи $C^K = f(C^T)$, где C^K – свойства покрытий лопаток компрессора, C^T – свойства покрытий лопаток турбины.

На рис. 4 представлены гипотетические схемы структуры покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины. Здесь показано: на рис. 4, а – структура покрытий лопатки компрессора; на рис. 4, б – структура покрытий лопатки турбины. Покрытия лопаток формируется в соответствии с особенностями эксплуатации лопаток. В турбокомпрессоре лопатки компрессора и лопатки турбины эксплуатируются в принципиально различных условиях, поэтому на рис. 4 структура покрытий лопаток неодинакова, она определяется особенностями эксплуатации этих групп лопаток.

Анализируя структуру покрытия лопатки компрессора (рис. 4, а) можно отметить, что она определяется в основном особенностями абразивно-эрозионного износа. Для исключения этого процесса необходимо абразивно-эрозионно-стойкого покрытия.

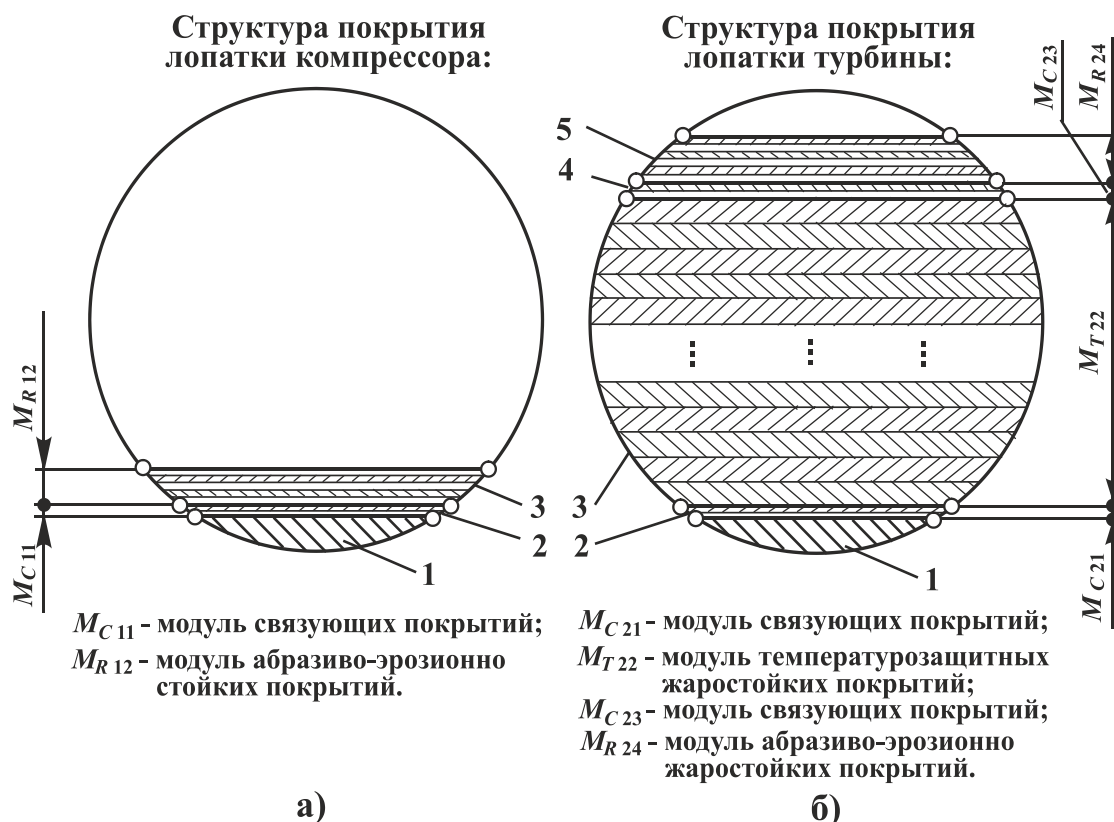


Рис. 4. Гипотетические схемы структуры покрытий: а) – лопатки компрессора; б) лопатки турбины.

Однако для реализации этого вида покрытия необходимы дополнительные покрытия (технологические покрытия) – связующие покрытия, обеспечивающие связи между предлагаемым покрытием и основным материалом лопатки, которое может быть реализовано с использованием модуля покрытий. На рис. 4, а показана структура покрытия лопатки компрессора 1: M_{C11} - модуль связующих покрытий 2; M_{R12} - модуль абразивно-эрозионно-стойких покрытий 3. Модуль M_{R12} абразивно-эрозионно-стойкого покрытия решает вопросы защиты лопатки от абразивно-эрозионного износа, а модуль M_{C11} связывает модуль покрытия M_{R12} с основным материалом лопатки. Представленная структура покрытий позволяет обеспечивать не только снижение износа покрытия, но и адгезионную стойкость всего покрытия.

Следует отметить, что структура покрытий лопатки компрессора дополнительно формируется в соответствии с принципами реализации ФОП и формируется ФОП₁. Если покрытие лопатки компрессора формируется на базе ионно-плазменных покрытий, то толщина модуля покрытия M_{C11} составляет 0,25 ... 0,75 мкм, а толщина модуля покрытия M_{R12} рекомендуется в пределах 5,5 ... 12,0 мкм.

Лопатки турбины 1 эксплуатируются в принципиально отличных условиях по сравнению с лопатками компрессора. При этом покрытия лопатки турбины 1 имеет следующую структуру (рис. 4, б):

- M_{C21} - первый модуль связующих покрытий 2, общая его толщина обычно составляет 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает основной материал лопатки с температура-защитным жаростойким покрытием;

- M_{T22} - модуль температура-защитных жаростойких покрытий 3, общая его толщина обычно составляет 300 ... 400 мкм, данный модуль покрытий снижает проникновение температуры к основному материалу лопатки из условия $\xi = 0,8 \dots 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мкм}$;

- M_{C23} - второй модуль связующих покрытий 4, общая его толщина обычно составляет 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает температура-защитное жаростойкое покрытие с абразива-эрозионно-жаростойким покрытием;

- M_{R24} - модуль абразива-эрозионно-жаростойких покрытий 5, общая его толщина рекомендуется в пределах 8,0 ... 20,0 мкм.

Можно отметить, что первый M_{C21} и второй M_{C23} модули связующих покрытий связывают основной материал лопатки с модулем M_{T22} температура-защитного жаростойкого покрытия и модуль M_{T22} температура-защитного-жаростойкого покрытия с модулем M_{R24} абразива-эрозионно-жаростойкого покрытия. Вместе с тем, можно заметить, что ресурс всего покрытий лопаток турбины определяется интенсивностью износа модуля M_{R24} абразива-эрозионно-жаростойкого покрытия. Это обусловлено тем, что при износе и разрушении этого модуля покрытий происходит катастрофическое разрушение следующих модулей покрытий. Это недопустимо - особенно для модуля покрытия M_{T22} температура-защитного жаростойкого покрытия. При уменьшении толщины этого модуля покрытия M_{T22} резко повышается температура на основном материале лопатки и происходит катастрофическое разрушение лопатки турбины.

Для напыления представленной структуры покрытия (рис. 4, б) могут, использоваться методы газового или детонационно-газового напыления покрытий [5].

Комплексное повышение работоспособности (ресурса) групп лопаток турбокомпрессора предусматривает совместное обеспечение заданного ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины. В работе предусматривается решение вопроса повышения ресурса лопаток на базе функционально-ориентированного подхода. При этом общий подход комплексного повышения работоспособности формируется на следующих основных принципах:

1. Функционально-ориентированные свойства [5] лопаток компрессора формируются на базе особенностей действия эксплуатационных функций в компрессоре, функционально-ориентированные свойства лопаток турбины обеспечиваются на основе особенностей действия эксплуатационных функций в турбине.

2. Функционально-ориентированные свойства лопаток компрессора создаются посредством технологических воздействий, зависящих от действия эксплуатационных функций в компрессоре, а функционально-ориентированные свойства лопаток турбины создаются посредством технологических воздействий, зависящих от действия эксплуатационных функций в турбине.

3. Между эксплуатационными функциями, функционально-ориентированными свойствами и технологическими воздействиями групп лопаток компрессора и турбины действуют связи [5].

4. Функционально-ориентированные свойства лопаток компрессора и лопаток турбины должны базироваться на комплексном подходе, связывающем их свойства на основе следующих закономерностей:

$$R_1 = R_2 \quad (1)$$

или

$$k_1 R_1 = k_2 R_2, \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – ресурс лопаток компрессора и турбины, соответственно;

k_1 и k_2 – коэффициент кратности ресурса лопаток компрессора и турбины, соответственно.

5. Обеспечение равного ресурса лопаток компрессора и турбины должно выполняться из условия повышения ресурса группы лопаток с меньшим ресурсом до значения ресурса группы лопаток с большим ресурсом, имеющим предельные значения ресурса.

На основе представленных принципов в работе выполняется комплексное обеспечение в повышении ресурса лопаток турбокомпрессора.

3. Основные связи между параметрами покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины

Можно отметить, что в данной работе функционально-ориентированные свойства лопаток компрессора обеспечиваются на базе ФОП.

Следует отметить, что для выполнения условий (1) и (2) между свойствами модулей M_{R12} и M_{R24} должны действовать определенные связи и закономерности. Например, если ресурс лопаток определяется толщиной покрытий, то в этом случае существуют следующие закономерности:

- при выполнении условия (1)

$$\frac{H_{R12}}{\mu_{R12}} = \frac{H_{R24}}{\mu_{R24}}, \quad (3)$$

- при выполнении условия (2)

$$k_1 \frac{H_{R12}}{\mu_{R12}} = k_2 \frac{H_{R24}}{\mu_{R24}}; \quad (4)$$

где H_{R12} - толщина абразивно-эрозионно-стойкого покрытия лопатки компрессора;

H_{R24} - толщина абразивно-эрозионно-жаростойкого покрытия лопатки турбины;

μ_{R12} - интенсивность разрушения покрытия лопатки компрессора;

μ_{R24} - интенсивность разрушения покрытия лопатки турбины.

Учитывая выражения (3) и (4) закономерности свойств покрытий лопаток компрессора и турбины по своей толщине можно представить следующим образом:

- при выполнении условия (1)

$$H_{R12} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} H_{R24}, \quad (5)$$

- при выполнении условия (2)

$$H_{R12} = \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} H_{R24}. \quad (6)$$

В случае, если абразивно-эрозионно-стойкие покрытия многослойные, выражения (5) и (6) будут иметь следующий вид:

- при выполнении условия (1)

$$\sum_{i=1}^{n_1} h_{R12i} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \sum_{j=1}^{n_2} h_{R24j}, \quad (7)$$

- при выполнении условия (2)

$$\sum_{i=1}^{n_1} h_{R12i} = \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \sum_{j=1}^{n_2} h_{R24j}; \quad (8)$$

где h_{R12i} - толщина i - го слоя покрытия лопатки компрессора;

h_{R24j} - толщина j - го слоя покрытия лопат

n_1 - количество слоев покрытия лопатки компрессора;

n_2 - количество слоев покрытия лопатки турбины.

Если толщины покрытий слоев $h_{R121} = h_{R122} = \dots = h_{R12i} = \dots = h_{R12n_1} = h_{R12}$ лопатки компрессора и толщины покрытий слоев $h_{R241} = h_{R242} = \dots = h_{R24j} = \dots = h_{R24n_2} = h_{R24}$ лопатки турбины равны, то выражения (7) и (8) будут иметь следующий вид:

- при выполнении условия (1)

$$h_{R12} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \frac{n_2}{n_1} h_{R24}, \quad (9)$$

- при выполнении условия (2)

$$h_{R12} = \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \frac{n_2}{n_1} h_{R24}. \quad (10)$$

Можно отметить, что выражения (3), ..., (10) устанавливают связи между параметрами покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины из условия обеспечения равенства или кратности их ресурсов. Это условие для лопаток компрессора и лопаток турбины выполняется на базе ФОП.

4. Заключение

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

- выполнить анализ общих особенностей в обеспечении свойств лопаток компрессора и турбины, при этом установить то, что они эксплуатируются в различных условиях, при действии принципиально различных эксплуатационных функций;

- установить, что для повышения ресурса лопаток целесообразно использовать ФОП, основные положения, реализации которых представлены в работах [8, ..., 11];

- для дальнейшего повышения ресурса лопаток, увеличения их эксплуатационного потенциала и повышения ремонтпригодности лопаток компрессора и турбины в работе установлены связи и основные закономерности между параметрами их покрытий, из условия равенства или кратности их ресурсов;

- в работе представлена гипотетическая схема структуры покрытий лопатки компрессора и турбины для реализации ФОП, при этом разработаны структурные варианты состава ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
2. Полетаев, В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В. А. Полетаев. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
3. Авиаинформ [Текст] / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. - Вып. № 3 (144). – 162 с.
4. Внуков, Ю. Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков [и др.] – К.: Тэхника, 1992. – 143 с.
5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
6. Михайлов, А. Н. Основы проектирования функционально-ориентированных технологий машиностроения и перспективы их развития / А. Н. Михайлов, Н. А. Данияров, О. Т. Балабаев. - Караганда: КарГТУ, 2018. – 169 с.
7. Пичко, А. П. Эксплуатационные особенности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности и общий подход в повышении их свойств / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 3 (62). – С. 47 - 54.
8. Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. Вып. 4 (50). – С. 132 - 139.
9. Михайлов, В. А., Общие основы и принципы повышения ресурса газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 3 (58). – С. 32 - 43.
10. Михайлов, В. А. Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов, А. В. Байков // Наукоемкие технологии в машиностроении. – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2017. – № 9. – С. 42-48.
11. Хавлин, Т. В. Структурно-технологическое обеспечение функционально-ориентированной технологии применяемой для повышения качества лопаток турбины авиационного газотурбинного двигателя / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 10-16 сентября 2018 г. В 2-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т. 2. – С. 188-192.

Поступила в редколлегию 11.02.2019 г.