

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

Д. А. Михайлов¹, канд. техн. наук, доц., В. А. Витренко², д-р техн. наук, проф.,
А. Н. Михайлов³, д-р техн. наук, проф., В. А. Михайлов⁴, канд. техн. наук, ст. преп.,
Е. А. Шейко¹, канд. техн. наук, доц.

¹ ГБОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС ДНР», ДНР, Россия

² ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», ЛНР, Россия

³ ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, Россия

⁴ Воркутинский филиал Ухтинского государственного технического университета,
Республика Коми, Россия

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ ВЕРТОЛЕТНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе рассмотрены технологические особенности формирования функционально-ориентированных свойств элементов структуры газотурбинного двигателя. Представлены схемы изменяющихся параметров функционально-ориентированных свойств в пространстве детали. Показано, что процесс обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры вертолетного газотурбинного двигателя должен выполняться в соответствии со структурой действия неравномерных эксплуатационных воздействий. В работе разработана общая методика формирования функционально-ориентированных свойств структуры двигателя. В качестве примера приведены два варианта распределения свойств по структуре двигателя на базе вакуумных электродуговых покрытий. Приведен график зависимости микротвердости покрытия от содержания алюминия в катоде, а также представлена схема определения параметров состава катода для напыления покрытия на рабочие лопатки в зависимости от номера ступени компрессора. Показано, что процесс напыления функционально-ориентированного покрытия на лопатку двигателя выполняется в соответствии с разработанным способом. Представлены технологические особенности реализации функционально-ориентированных покрытий.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, структура, функционально-ориентированные свойства, распределение свойств, эксплуатация.

D. A. Mikhaylov, V. A. Vitrenko, A. N. Mikhaylov, V. A. Mikhaylov, E. A. Sheiko

TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION FUNCTIONALLY-ORIENTED PROPERTIES OF ELEMENTS HELICOPTER GAS TURBINE ENGINE STRUCTURES

The paper considers the technological features of the formation of functionally oriented properties of the structural elements of a gas turbine engine. Schemes of changing parameters of functionally oriented properties in the part space are presented. It is shown that the process of providing functionally oriented properties of the structure of a helicopter gas turbine engine must be carried out in accordance with the structure of the action of uneven operational impacts. In this work, a general method for the formation of functionally oriented properties of the engine structure has been developed. As an example, two options for the distribution of properties over the structure of an engine based on vacuum ion-plasma coatings are given. A graph of the dependence of the microhardness of the coating on the aluminum content in the cathode is presented, as well as a scheme for determining the parameters of the cathode composition for spraying the coating on the rotor blades depending on the compressor stage number. It is shown that the process of spraying a functionally oriented coating on an engine blade is carried out in accordance with the developed method. The technological features of the implementation of functionally oriented coatings are presented.

Keywords: gas turbine engine, structure, function-oriented properties, distribution of properties, operation.

1. Введение

В последнее время, для повышения эксплуатационных свойств вертолетных газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2, 3] в ряде работ [4, 5, 6, 7, 8, 9] предлагается использовать функционально-ориентированные свойства (ФОС) [4] их элементов, дета-

лей и узлов. Здесь, предлагается для отдельных элементов и деталей использовать ФОС, выполняемые на базе ряда особых принципов ориентации эксплуатационных параметров, технических свойств (физико-механические свойства материала) и технологических воздействий. Вместе с тем, можно отметить, что вертолетный двигатель представляет собой сложную систему, состоящую из множества элементов и подсистем, представляющих собой иерархическую структуру R -уровней. При этом в процессе эксплуатации вертолетного ГТД из-за сложной его иерархической структуры происходят неравномерные износы элементов двигателя, характеризующиеся неравномерностями R -родов. Поэтому вследствие обеспечения ФОС элементов ГТД происходит одинаковый износ каждого элемента двигателя, но для всей структуры этот процесс не выполняется. Это обусловлено наличием сложной структуры авиационного двигателя и особенностями его эксплуатации.

В данной работе решается вопрос обеспечения необходимых эксплуатационных свойств всего вертолетного ГТД в целом (заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие эксплуатационные свойства) и выполнения равных, кратных или функционально-зависимых свойств всех элементов структуры. Этот процесс может быть выполнен на базе специального формирования ФОС по элементам и особенностям их распределения по элементам структуры двигателя.

Целью данной работы является решение вопросов технологического формирования ФОС (физико-механические свойства (ФМС)) элементов структуры вертолетного ГТД на основании двух условий, а именно, первого условия - обеспечения эксплуатационных свойств всего двигателя (заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие свойства) и второго условия - распределения ФОС по всем элементам структуры с обеспечением равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств всех элементов структуры.

В соответствии с поставленной целью в данной работе определены следующие задачи: выполнить анализ особенностей действия неравномерных эксплуатационных воздействий на элементы структуры вертолетного ГТД и предложить схемы изменяющихся параметров ФОС в пространстве детали; разработать общую методику формирования ФОС структуры элементов ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий R -родов; предложить конкретные варианты распределения ФОС по структуре элементов ГТД на основе вакуумных электродуговых покрытий.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Особенности формирования ФОС по структуре элементов вертолетного ГТД

В представленной работе рассмотрены особенности обеспечения ФОС вертолетного ГТД. При этом установлено, что процесс обеспечения ФОС структуры нужно рассматриваться как причинно-следственную последовательность векторов параметров эксплуатационных воздействий, технических свойств ФОС, физико-механических свойств (ФМС) и эксплуатационных свойств (безотказность, надежность, долговечность, ресурс, ремонтпригодность или восстанавливаемость):

$$\vec{ЭВ} \rightarrow \vec{ТС(ФОС)} \rightarrow \vec{ФМС(ФОС)} \rightarrow \vec{ЭС(ФОС)}, \quad (1)$$

где $\vec{ЭВ}$ - вектор неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ) на структуру;

$\vec{ТС(ФОС)}$ - вектор технических параметров ФОС элементов структуры, формируемых на базе группы особых принципов ориентации, который характеризуется составом,

структурой, пространственным контуром границ (ПКГ) износа и обеспечения свойств, количеством и другими параметрами материала ФОС;

$\vec{\Phi MC}(\Phi OC)$ - вектор неравномерных параметров ФМС элементов структуры с ФОС (интенсивность износа, интенсивность накопления усталостных повреждений при изгибе, интенсивность накопления контактных повреждений материала и тому подобное);

$\vec{\mathcal{E}C}(\Phi OC)$ - вектор эксплуатационных свойств (параметров) ФОС элементов структуры (безотказность, надежность, долговечность, ремонтпригодность, восстанавливаемость).

Процесс обеспечения ФОС элементов и структуры вертолетного ГТД можно описать следующими отображениями:

$$\left. \begin{aligned} \psi_1: \vec{\mathcal{E}B} &\rightarrow \vec{TC}(\Phi OC); \\ \psi_2: \vec{TC}(\Phi OC) &\rightarrow \vec{\Phi MC}(\Phi OC); \\ \psi_3: \vec{\Phi MC}(\Phi OC) &\rightarrow \vec{\mathcal{E}C}(\Phi OC); \\ \psi_4: \vec{\mathcal{E}C}(\Phi OC) &\rightarrow \vec{\mathcal{E}B}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ - функции отображения векторов параметров эксплуатационных воздействий, технических свойств, физико-механических параметров, эксплуатационных свойств, соответственно.

Следует также иметь в виду, что технические параметры и физико-механические свойства ФОС определяются группой особых принципов ориентации свойств, получаемых на этапе эксплуатации ГТД, а формируемых на этапах обеспечения ФОС и реализации технологического обеспечения.

В работе исследованы особенности и варианты процессов формирования ФОС по элементам ГТД. При этом установлено, что ФОС элементов вертолетного ГТД характеризуются следующими особенностями:

1. Изменяющимися в пространстве (зона, линия, поверхность, поверхностный слой, объем) параметрами состава, ФМС, технологическими особенностями материала элемента (1-й принцип ориентации).
2. Изменяющимися топологическими и геометрическими параметрами свойств материала элемента (2-й принцип ориентации).
3. Изменяющимся количеством микрозон, макрозон, зон элемента (3-й принцип ориентации).
4. Изменяющейся в пространстве структурой свойств элемента (4-й принцип ориентации) и другими параметрами других принципов группы, особых принципов ориентации свойств и параметров в зависимости от особенностей эксплуатации элемента структуры и параметров технологических воздействий.

На рис. 1 представлена схема изменяющихся параметров ФОС в пространстве. Здесь показано: рис. 1, а – изменяющиеся параметры свойств в одном направлении, рис. 1, б - изменяющиеся параметры в двух направлениях, рис. 1, в – изменяющиеся параметры в трех направлениях.

Конечно, возможны и другие схемы свойств элементов структуры, например, на рис. 2 представлена схема изменяющихся параметров ФОС на поверхности элемента

вертолетного ГТД. Здесь показано: рис. 2а – ступенчато-изменяющиеся свойства, рис. 2б - пятнистые свойства, рис. 2в – градиентные свойства.

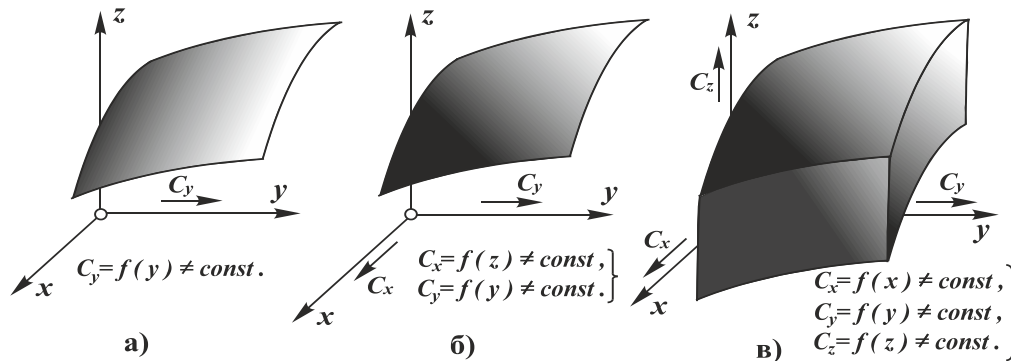


Рисунок 1. Схемы изменяющихся параметров ФОС элемента вертолетного ГТД: а – изменяющиеся параметры в одном направлении, б - изменяющиеся параметры в двух направлениях, в – изменяющиеся параметры в трех направлениях

Можно отметить, что в целом пространственно-изменяющиеся свойства (ФОС) элементов ГТД по своей топологии могут быть следующих вариантов:

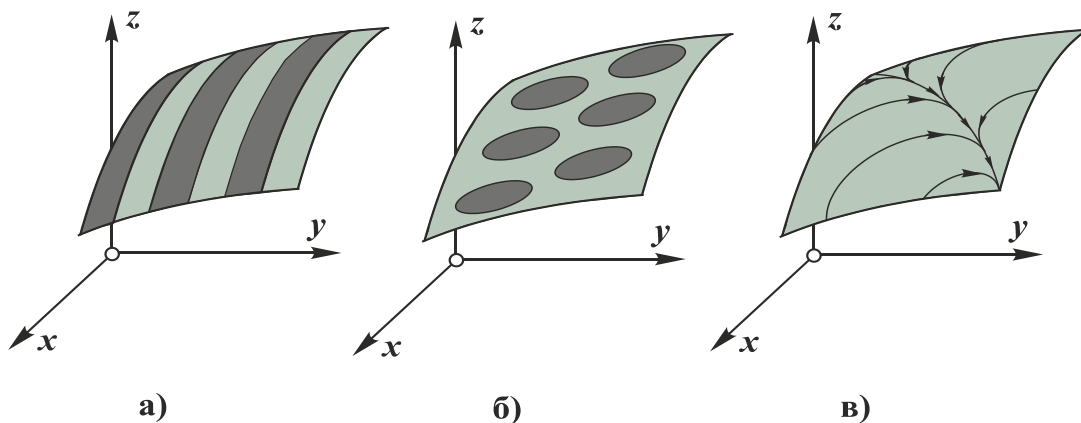


Рисунок 2. Схемы изменяющихся параметров ФОС на поверхности элемента вертолетного ГТД: а – ступенчато-изменяющиеся свойства, б – пятнистые свойства, в – градиентные свойства

- точно выполненные схемы ФОС элементов - в соответствии с действующими на них параметрами эксплуатационных воздействий (точная схема ФОС элемента);
- упрощенные варианты схем ФОС, близкие схемы реализации свойств, выполняемые более простыми методами (например, со ступенчатыми параметрами свойств).

Для элементов ГТД с объемно-изменяющимися вариантами схем ФОС элементов возможны схемы, представленные на рис. 3. Здесь показаны следующие схемы ФОС: рис. 3а – свойства элементов изменяющиеся в цилиндрической системе координат, рис. 3б - свойства элементов изменяющиеся в сферической системе координат, рис. 3в – пространственные свойства элементов изменяющиеся ступенчато. Возможны и другие варианты схем ФОС элементов ГТД. Например, с помощью многослойных

вакуумных ионно-плазменных покрытий с ПКГ каждого слоя, обеспечивается возможность формирования ФОС лопатки со ступенчатыми свойствами по толщине покрытия лопатки [10]. А также, изменяющиеся свойства лопатки с ФОС можно обеспечивать посредством комбинации свойств гребенчатой основы лопатки и свойств наполнителя, формируемого из керамики [11].

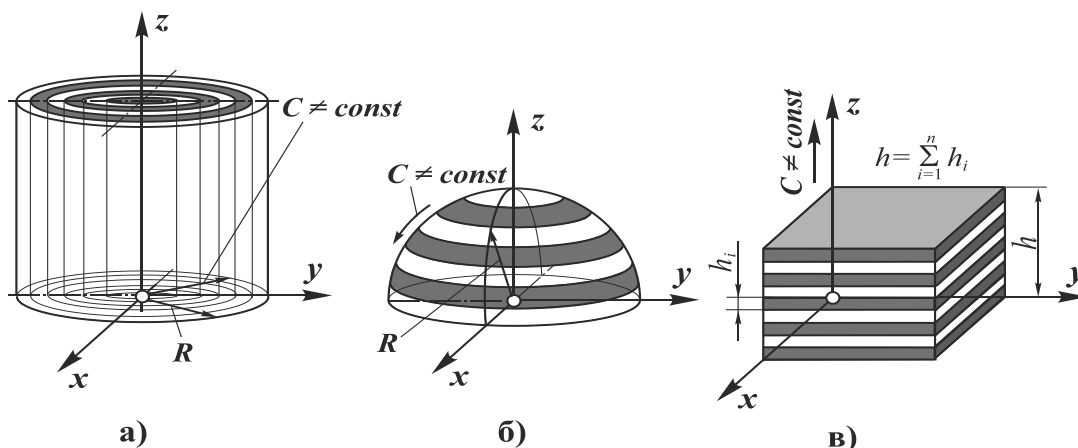


Рисунок 3. Схемы изменяющихся параметров ФОС по объему элемента вертолетного ГТД: а – по радиусу цилиндра - ступенчатые свойства, б – по слоям шара – ступенчатые свойства, в – модульные покрытия

Таким образом, ФОС элементов ГТД формируются на базе группы особых принципов ориентации в зависимости от особенностей их эксплуатации. При этом параметры свойств элементов могут отображаться адекватно особенностям эксплуатации (износы, разрушения) или формироваться приближенно по элементам структуры на базе много вариантных схем ФОС.

В работе также выполнены исследования по решению вопросов обеспечения ФОС по структуре вертолетного ГТД. При этом установлено, что процесс обеспечения ФОС структуры вертолетного ГТД должен выполняться в соответствии со структурой действия неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ) и иметь следующий состав:

- структура ФОС 1-го вида;
- структура ФОС 2-го вида;
- структура ФОС 3-го вида;
- ;
- структура ФОС r-го вида;
- ;
- структура ФОС R-го вида.

Можно отметить, что процесс формирования ФОС структуры вертолетного ГТД заключается в выполнении двух условий:

- на базе первого условия обеспечиваются ЭС всего ГТД, а именно формируются заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие ЭС всей структуры двигателя; это условие реализуется относительно 1-го элемента структуры, на который действует максимальные ЭВ, именно для него задаются эти свойства;
- на базе второго условия выполняется процесс распределения ЭС по структурным элементам каждого уровня ГТД в соответствии с выражениями (2), (3) или (4), в

зависимости от закономерностей распределения ЭС по структуре (равные, кратные или функционально-зависимые ЭС).

Первое условие формирования начальных параметров ЭС в структурной модели [8, 9] заключается в обеспечении особенностей ЭС всего ГТД, которые могут быть следующих вариантов: заданные ЭС всего ГТД; требуемые ЭС всего ГТД; предельные ЭС всего ГТД; ограниченные ЭС всего ГТД; другие варианты ЭС всего ГТД.

Второе условие направлено на обеспечение некоторых закономерностей распределения ЭС (надежность, работоспособность, долговечность (ресурс), ремонтпригодность, восстанавливаемость) по элементам всей структуры ГТД, которые могут быть следующих вариантов:

- равные ЭС элементов структуры R-родов

$$\left. \begin{aligned} C_{11} = C_{12} = \dots = C_{1i_1} = \dots = C_{1n_1}; \\ C_{21} = C_{22} = \dots = C_{2i_2} = \dots = C_{2n_2}; \\ C_{31} = C_{32} = \dots = C_{3i_3} = \dots = C_{3n_3}; \\ \dots\dots\dots \\ C_{r1} = C_{r2} = \dots = C_{ri_r} = \dots = C_{rn_r}; \\ \dots\dots\dots \\ C_{R1} = C_{R2} = \dots = C_{Ri_R} = \dots = C_{Rn_R}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

- кратные ЭС элементов структуры R-родов

$$\left. \begin{aligned} k_{11}C_{11} = k_{12}C_{12} = \dots = k_{1i_1}C_{1i_1} = \dots = k_{1n_1}C_{1n_1}; \\ k_{21}C_{21} = k_{22}C_{22} = \dots = k_{2i_2}C_{2i_2} = \dots = k_{2n_2}C_{2n_2}; \\ k_{31}C_{31} = k_{32}C_{32} = \dots = k_{3i_3}C_{3i_3} = \dots = k_{3n_3}C_{3n_3}; \\ \dots\dots\dots \\ k_{r1}C_{r1} = k_{r2}C_{r2} = \dots = k_{ri_r}C_{ri_r} = \dots = k_{rn_r}C_{rn_r}; \\ \dots\dots\dots \\ k_{R1}C_{R1} = k_{R2}C_{R2} = \dots = k_{Ri_R}C_{Ri_R} = \dots = k_{Rn_R}C_{Rn_R}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

- функционально-зависимые ЭС элементов структуры (здесь, представлены выражения только для элементов r-го уровня структуры)

$$\left. \begin{aligned} C_1 = \{C_{11}, C_{12}, C_{13}, \dots, C_{1i_1}, \dots, C_{1n_1}\}; \\ C_2 = \{C_{21}, C_{22}, C_{23}, \dots, C_{2i_2}, \dots, C_{2n_2}\}; \\ C_3 = \{C_{31}, C_{32}, C_{33}, \dots, C_{3i_3}, \dots, C_{3n_3}\}; \\ \dots\dots\dots \\ C_r = \{C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, \dots, C_{ri_r}, \dots, C_{rn_r}\}; \\ \dots\dots\dots \\ C_R = \{C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}, \dots, C_{Ri_R}, \dots, C_{Rn_R}\}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь:

$$\left. \begin{aligned} C_{r1} &= f_{r1}(t) ; \\ C_{r2} &= f_{r2}(t) ; \\ C_{r3} &= f_{r3}(t) ; \\ &\dots\dots\dots \\ C_{ri_r} &= f_{ri_r}(t) ; \\ &\dots\dots\dots \\ C_{rn_r} &= f_{rn_r}(t), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где C_{ri_k} - параметры ЭС (надежность, безотказность, долговечность (ресурс), ремонтно-пригодность, восстанавливаемость) i_r -го элемента r -го уровня структуры вертолетного ГТД;

n_r – количество элементов r -го уровня структуры вертолетного ГТД;

R – количество уровней структуры вертолетного ГТД;

k_{ri_r} - коэффициент кратности параметров ЭС для i_r -го элемента r -го уровня структуры вертолетного ГТД;

$f_{ri_r}(t)$ - функциональная зависимость ЭС i_r -го элемента r -го уровня структуры вертолетного ГТД.

Следует отметить, что сам процесс распределения ФОС в зависимости от особенностей действия ЭВ выполняется на базе представленного ранее способа распределения ФОС (ФМС) по элементам структуры ГТД, при комплексном инжиниринге параметров и связей.



На рис. 4, в качестве примера, приведена схема процесса распределения ФОС по группе рабочих лопаток ротора компрессора ГТД. Здесь, цифрами показаны номера ступеней рабочих лопаток ротора, процесс распределения выполняется от лопаток 1-й ступени ротора к последующим рабочим лопаткам ротора компрессора.

Рисунок 4. Схема процесса распределения ФОС по группе рабочих лопаток ротора компрессора ГТД

Для вертолетного ГТД, например серии ТВ3-117, на первой ступени лопаток компрессора действуют максимальные ЭВ.

3. Общая методика формирования ФОС структуры вертолетного ГТД

В работе разработана общая методика формирования ФОС структуры вертолетного ГТД, которая выполняется в следующей последовательности:

1. Выполняется классификация элементов структуры вертолетного ГТД и создание иерархической структуры элементов (рис. 5), в которой на каждом уровне этой структуры элементы располагаются в зависимости от параметров действия ЭВ, сначала, выявляется 1-й элемент, на который действуют максимальные ЭВ, затем, располагаются элементы, в соответствии со структурой, исключая 1-й элемент, а уровни струк-

туры – соответствуют порядку иерархической структуры вертолетного ГТД. Поэтому данная классификация структуры вертолетного ГТД имеет новое содержание.

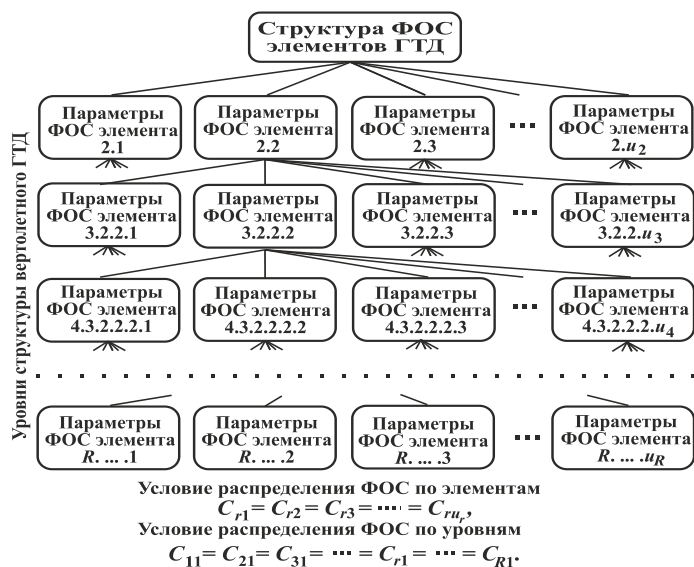


Рисунок 5. Классификация структуры ФОС элементов ГТД в зависимости от расположения предельных элементов

ционально-зависимые ЭС), который представлен выражениями (2), (3) или (4).

3. В соответствии с определенными начальными параметрами ЭС реализуется процесс их формирования для всех элементов структуры вертолетного ГТД, который выполняется в следующей последовательности, сначала - для 1-го уровня иерархической структуры, затем - для 2-го уровня, далее, этот процесс производится - для всех других иерархических уровней, пока все уровни структуры будут пройдены.

4. Далее, производится формирование ФОС каждого элемента структуры в соответствии с группой особых принципов ориентации свойств или на основании разработанного способа обеспечения ФОС [4].

5. Определяются связи параметров ФОС между элементами каждого уровня и между уровнями иерархической структуры вертолетного ГТД.

В соответствии с этой методикой в работе разработан алгоритм формирования ФОС структуры и элементов вертолетного ГТД, который базируется на итерационно-рекуррентной последовательности обеспечения и распределения свойств по иерархической структуре элементов авиационного двигателя.

4. Варианты распределения ФОС по структуре элементов ГТД на основе вакуумных электродуговых покрытий

В работе выполнены исследования особенностей формирования ФОС структуры рабочих лопаток компрессора ГТД по рабочим лопаткам различных ступеней компрессора. Данные исследования производились на базе вакуумных электродуговых покрытий методом PVD (Physical vapour deposition), которые в данной работе называются функционально-ориентированные покрытия (ФОП). В этом случае, процесс распределения параметров ФОП выполнялся по ступеням рабочих лопаток компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117 для 12-ти ступеней.

В качестве примера приведено два варианта распределения ФОП рабочих лопаток компрессора по ступеням:

2. Производится комплексный инжиниринг параметров свойств на этапе эксплуатации и формирования ФОС элементов структуры, производится определение параметров износа и разрушения элементов структуры, осуществляется определение начальных параметров ЭС структуры вертолетного ГТД: в соответствии с первым принципом назначаются параметры ЭС всего вертолетного ГТД (заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие ЭС), в соответствии с вторым принципом определяется и назначается закон распределения ЭС по структуре каждого уровня элементов (равные, кратные, функционально-зависимые ЭС), который представлен выражениями (2), (3) или (4).

1. Распределение параметров ФОП с одинаковым составом катода из Ti (покрытие TiN) и изменяющейся толщиной h_i покрытия пера лопатки в зависимости от номера ступени компрессора (различная интенсивность η_i износа покрытия пера лопатки по ступеням) (табл. 1, позиция 1).

2. Распределение параметров ФОП с различным составом Al в катоде (покрытие (Ti, Al)N) (обеспечение одинаковой интенсивности η_i износа покрытия пера лопатки по ступеням) (табл. 1, позиция 2; табл. 2; рис. 6).

Можно отметить, что процесс распределения параметров для первого варианта распределения ФОП по структуре рабочих лопаток выполнялся на базе нитрид титанового покрытия TiN и установленной интенсивности износа покрытия лопаток на каждой ступени лопаток компрессора, полученной на основании проведенных исследований вертолетных ГТД на ГП «Луганский авиационный ремонтный завод», параметры которых представлены в табл. 1, позиция 1. Применение ФОП этого варианта обеспечивает единовременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, что дает возможность повышения уровня ремонтпригодности лопаток, и значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора в 1,55 раза по сравнению с обычным вариантом нитрид титанового покрытия.

По второму варианту распределения параметров ФОП с различным составом Al в катоде (покрытие (Ti, Al)N) результаты распределения представлены в табл. 1, позиция 2. Для этого построен график зависимости параметров микротвердости покрытия (Ti, Al)N от содержания алюминия в катоде (рис. 6), представленных в табл. 2. Эти экспериментальные исследования выполнялись на установке ННВ 6.6-И1, катоды с различным содержанием Al изготовлены ООО «Риал», г. Запорожье. А также, на рис. 6 представлена схема распределения состава покрытия в зависимости от содержания алюминия в катоде и микротвердости μ_n покрытия подложки (образцов-свидетелей).










Можно отметить, что значения параметров ФМС (микротвердость) покрытия предельного элемента (лопатки) - для 1-й ступени компрессора назначены по максимальному значению микротвердости покрытия. В этом случае, состав катода для лопаток 1-й ступени должен иметь следующие параметры 29Ti-71Al, для лопаток других ступеней параметры катода представлены в табл. 1, позиция 2. За счет выполнения различной микротвердости покрытия лопаток по структуре ступеней компрессора обеспечивается одинаковая интенсивность абразивно-эрозионного износа и толщина покрытия по лопаткам всех ступеней компрессора. Можно отметить, что разработанная схема распределения состава покрытия (состава катода) по структуре ступеней рабочих лопаток компрессора базируется на исследованиях проф. Хрущева М. М., в которых установлена связь износа (интенсивности износа) образца в зависимости от параметров его твердости, а именно параметров его износа, который пропорционален параметрам ЭВ на образец, коэффициентам концентрации воздействующей среды (пыль, песок и тому подобное) потока по тракту двигателя, его скорости и обратно пропорционален твердости материала. При этом параметры микротвердости покрытия для каждой ступени компрессора определяется на основании следующего выражения:

$$\mu_{H_i} = \xi_i \mu_{H_1},$$

Таблица 1. Варианты и параметры распределения ФОП по структуре рабочих лопаток компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117

№ ц/п	Основные параметры	Номера ступеней рабочих лопаток компрессора											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Особенности распределения параметров ФОП с одинаковым составом катоды из Ti (покрытие TiN)	Нитрид титановое покрытие с изменяющейся толщиной по ступеням											
1.1	Одинаковый состав покрытия	Нитрид титановое покрытие с изменяющейся толщиной по ступеням											
1.2	Толщина покрытия пера в зоне шах ЭВ, h_i (мкм)	8,50	8,40	8,12	7,75	7,29	6,65	6,01	5,44	6,09	6,73	7,39	7,85
1.3	Интенсивность износа ФОП в зоне шах ЭВ, $\eta_i \cdot 10^{-3}$ (мкм/час)	4,23	4,18	4,04	3,86	3,63	3,31	2,99	2,71	3,03	3,35	3,68	3,91
1.4	Относительная неравномерность износа лопаток, ξ	1,0	0,989	0,955	0,913	0,859	0,783	0,706	0,641	0,717	0,793	0,869	0,924
1.5	Длительность межремонтного ресурса, $R_{\text{ж}}$ (час)	$R_{\text{ж}} = 2009$ час (стандартный межремонтный ресурс с традиционными покрытиями – 1300 час)											
1.6	Особенности применения ФОП для структуры лопаток	Единовременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора.											
2	Особенности распределения параметров ФОП с различным составом Al в катоды (покрытие (Ti, Al)N)	Единовременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора.											
2.1	Микроудельный вес покрытия, μ_4 (ГПа)	40,50	40,05	38,68	36,98	34,79	31,71	28,59	25,96	29,04	32,12	35,19	37,42
2.2	Изменяющийся состав катодов для формирования покрытий по ступеням компрессора (определяется по графику рис. 19)	29 Ti - 71 Al	35 Ti - 65 Al	40 Ti - 60 Al	43 Ti - 57 Al	54 Ti - 46 Al	64 Ti - 36 Al	73 Ti - 27 Al	85 Ti - 15 Al	70 Ti - 30 Al	62 Ti - 38 Al	52 Ti - 48 Al	41 Ti - 59 Al
2.3	Интенсивность износа ФОП в зоне шах ЭВ, $\eta_i \cdot 10^{-3}$ (мкм/час)	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51
2.4	Закономерности износа ФОП лопаток по всей структуре	При толщине $h_i = 5,5$ мкм - межремонтный ресурс $R_{\text{ж}} = 2191$ час (увеличение в 1,68 раза), При толщине $h_i = 8,5$ мкм - межремонтный ресурс $R_{\text{ж}} = 3386$ час (увеличение в 2,60 раза)											
2.5	Особенности применения ФОП для структуры лопаток	Единовременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора.											

Таблица 2. Параметры для построения графика зависимости микротвердости покрытия (Ti, Al)N от содержания алюминия в катоде напыляемого методом PVD

№ п/п	Параметры	Номер испытания								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Номер подложки (образца-свидетеля)	б/н	№33	№32	№22	№29	№30	№18	№6	№17
2	Состав катода	Ti (BT 1-00)	Ti-12Al	Ti-19Al	Ti-27Al	Ti-36Al	Ti-47Al	Ti-58Al	Ti-70Al	Ti-85Al
3	Формула покрытия	TiN	(Ti, Al)N							
4	Материал подложки	Сталь 08X17T								
5	Вид обработки подложки	Полировка ($R_a = 0,06$ мкм)								
6	Микротвердость покрытия, μH (ГПа)	24,5	26,1	27,0	27,2	30,0	36,7	38,0	40,8	30,0
		23,8	24,6	26,2	28,0	31,8	35,6	38,8	40,5	30,9
		23,0	25,4	26,6	29,0	32,1	34,9	39,4	40,2	29,6
7	Технологические параметры процесса	1. Ток дуги – $I_d = 100$ А. 2. Отрицательное смещение на подложке – $V_c = 90$ А. 3. Ток фокуса - $I_\phi = 0,8$ А. 4. Давление азота – $P = 0,5$ Па.								
8	Общий вид образца-свидетеля с покрытием (цвет)									

где μH_i - микротвердость покрытия лопаток компрессора i -й для ступени;

μH_i - максимальная микротвердость покрытия лопатки компрессора в точке b_1 графика рис. 6 (значение определяется по ординате в точке a_1);

ξ_i - относительная неравномерность интенсивности износа лопаток компрессора i -ступени.

Применение приведенного ФОП лопаток для различных ступеней компрессора обеспечивает одновременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора. В этом случае, при толщине покрытия лопаток $h_i = 5,5$ мкм - межремонтный ресурс имеет следующие параметры $R_m = 2191$ час (увеличение в 1,68 раза), при толщине $h_i = 8,5$ мкм - межремонтный ресурс составляет $R_m = 3386$ час (увеличение в 2,60 раза). Сравнение этих параметров выполнено для ФОП лопаток с одинаковым составом катода (позиция 1, табл. 1).

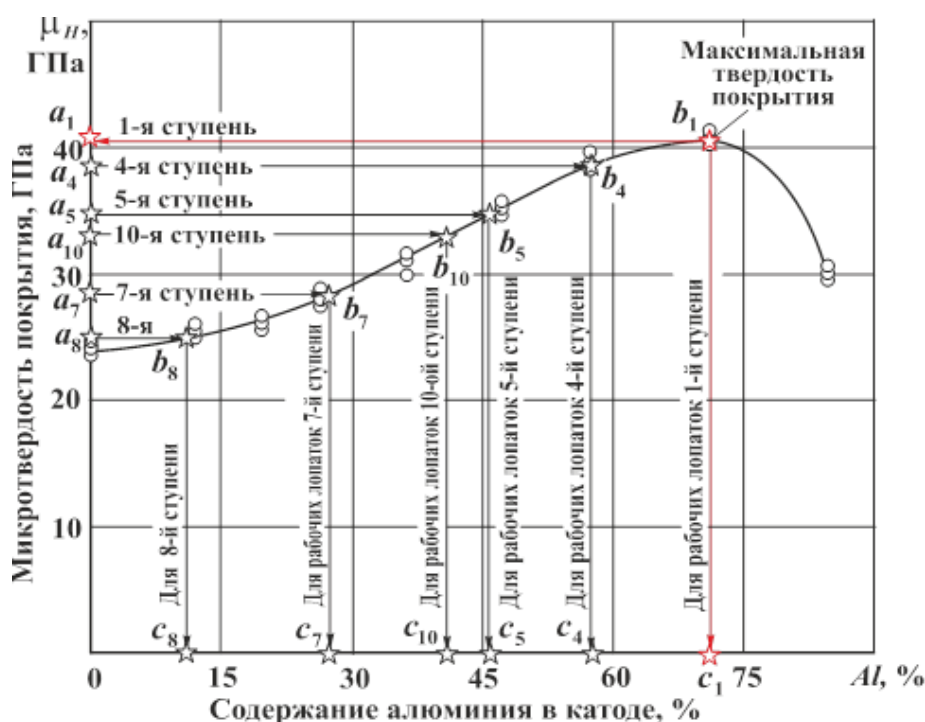


Рисунок 6. График зависимости микротвердости покрытия от содержания алюминия в катодe и схема определения параметров состава катодa для напыления покрытия на рабочие лопатки в зависимости от номера ступени компрессора для вертолетного ГТД серии ТВ3-117

Можно отметить, что после определения параметров состава покрытия по ступеням компрессора (по структуре лопаток компрессора), в соответствии с разработанным способом распределения состава покрытия, выполняется процесс формирования конкретного ФОП для группы одинаковых рабочих лопаток каждой ступени компрессора. Этот процесс выполняется, например, в соответствии с разработанным способом нанесения функционально-ориентированного покрытия на лопатку газотурбинного двигателя [10].

5. Заключение

Таким образом, в данной работе решены вопросы технологического формирования ФОС элементов структуры вертолетного ГТД. Данный процесс выполнен на основании двух условий, а именно, первого условия - обеспечения эксплуатационных свойств всего двигателя (заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие свойства) и второго условия - распределения ФОС по всем элементам структуры с обеспечением равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств всех элементов структуры. Для этого здесь выполнен анализ особенностей действия неравномерных эксплуатационных воздействий на элементы структуры вертолетного ГТД. А также рассмотрены некоторые варианты изменяющихся параметров ФОС элементов. Предложены схемы изменяющихся параметров ФОС в пространстве детали. При этом разработана общая методика формирования ФОС структуры элементов ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий R-родов. Кроме того, в представленной работе предложены конкретные варианты

распределения ФОС по структуре элементов ГТД, выполняемы на основе вакуумных электродуговых покрытий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. / Ф. И. Демин, Н. Д. Пронищев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. Богуслаев, В. А. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. III. Методы обработки деталей авиационных двигателей. / В. А. Богуслаев, [и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2008. – 638 с.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Михайлов, А. Н. Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств. / А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.] // Научные технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2018. – № 3 (81). – С. 32-41.
6. Михайлов, А. Н. Методологические и технологические основы обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры элементов газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Н. С. Пичко, Е. А. Шейко // Научные технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2022. – № 9 (135). – С. 38-48.
7. Михайлов, А. Н. Новые тенденции в повышении ресурса газотурбинных двигателей и установок на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.]. // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» в г. Петропавловск-Камчатский 17-19 октября 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 106-111.
8. Михайлов, А. Н. Технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 76 – 83.
9. Михайлов, Д. А. К вопросу обеспечения функционально-ориентированных свойств структурным элементам газотурбинного двигателя на базе комплексного многосвязного технологического процесса / Д. А. Михайлов и [др.]. // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: Сб. трудов научного семинара технологов-машиностроителей. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. – С. 230-235.
10. Патент № 2718877 RU. Кл. C23C 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов [и др.]. – № 2018107164; опубл. 15.04.2020. – Бюл. № 11. – 7 с.
11. Патент України на винахід № 94961. Кл. B23P 15/00. Лопатка газотурбінного двигуна. / Михайлов О. М., Недашковський О. П. Михайлова О. О., Михайлов Д. О.; опубл. 25.06.2011, Бюл. №12. – 5 с.

Поступила в редколлегию 17.03.2023 г.