

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

¹ Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц., ² В. А. Михайлов, инженер,¹ Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц., ² А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.¹ ГОУВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНР² ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНРТел.: +38 071 3060879; E-mail: mntk21@mail.ru

МЕТОДИКА СИНТЕЗА СВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе представлены принципы и особенности синтеза многослойного функционально-ориентированного покрытия с пространственным контуром границ каждого слоя для каждой лопатки, для лопаток группы и групп лопаток относительно друг друга, которое выполняется из условия равенства их ресурсов и повышения ресурса всех лопаток в газотурбинном двигателе. А также разработана методика синтеза многосвязного технологического процесса формирования функционально-ориентированного покрытия. Выполнена экспериментальная реализация технологического процесса формирования функционально-ориентированных покрытий лопаток. Разработан алгоритм проектирования отделочно-упрочняющей обработки лопаток и представлено технологическое обеспечение формирования функционально-ориентированного покрытия лопаток.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, группа лопаток, функционально-ориентированное покрытие, пространственный контур границ, схема синтеза, многосвязный технологический процесс.

D. A. Mikhaylov, V. A. Mikhaylov, E. A. Sheyko, A. N. Mikhaylov

METHOD FOR SYNTHESIS OF A CONNECTED TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORMING A MUL-TI-LAYERED FUNCTIONALLY-ORIENTED COVERING OF A GAS-TURBINE ENGINE BLADES

The work presents the principles and features of the synthesis of a multilayer functionally oriented coating with a spatial contour of the boundaries of each layer for each blade, for the blades of a group and groups of blades relative to each other, which is performed on the condition that their resources are equal and the resource of all blades in the gas turbine engine is increased. And also a technique for the synthesis of a multiply connected technological process for the formation of a functionally oriented coating has been developed. The experimental implementation of the technological process of forming functionally oriented coating of the blades. An algorithm for designing finishing and hardening processing of blades is developed, and technological support for the formation of a functionally oriented coating of blades is presented.

Keywords: gas turbine engine, group of blades, functionally oriented coating, spatial contour of boundaries, synthesis scheme, multiply connected technological process.

1. Введение

В настоящее время, для повышения ресурса деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) применяется множество различных методов отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) [1, 2, 3] и технологических процессов их обработки [4, 5, 6], обеспечивающих достижения заданных свойств. При этом лопатки ГТД являясь основными элементами авиационного двигателя, также требуют особых технологических подходов в достижении необходимых свойств и обеспечения заданного их ресурса. Это обусловлено тем, что лопатки ГТД эксплуатируются в сложных эксплуатационных условиях, имеют сложную пространственную форму и расположение в двигателе.

Для повышения ресурса лопаток ГТД в работе [7] предлагается для них обеспечивать функционально-ориентированные свойства (ФОС), например, на базе функционально-ориентированных покрытий [8, 9, 10]. ФОП это специальное покрытие лопатки,

которое обеспечивает возможность исключения износа основного материала лопатки в заданный период эксплуатации. Выполненные исследования показывают, что обычные покрытия лопаток не исключают износ основного материала пера лопатки, или имеют очень низкий ресурс по износу покрытия. Это обусловлено тем, что на перо лопатки действуют неодинаковые и неравномерные эксплуатационные функции, которые приводят к быстрому износу покрытия на входной и периферийной кромках лопатки, что вызывает катастрофический износ основного материала лопатки. Это снижает ресурс лопаток и ГТД в целом. Кроме того, ГТД структурируется из целого комплекса подсистем с группами лопаток различного назначения, на которые действуют различные эксплуатационные функции, приводящие к различному износу лопаток групп и групп лопаток относительно друг друга.

Для выравнивания износа лопаток групп ГТД применяются различные технологии, в том числе и многосвязные процессы [11]. Однако, для решения вопросов повышения ресурса лопаток всего ГТД и выравнивания ресурса лопаток групп и групп лопаток относительно друг друга необходимы дальнейшие исследования по развитию вопроса применения ФОП для лопаток всего ГТД

Целью данной работы является повышение ресурса лопаток ГТД за счет комплексного формирования ФОС лопаток, обеспечения равного ресурса лопаток каждой группы и групп лопаток относительно друг друга, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, на основе разработки метода синтеза многосвязного технологического процесса реализации многослойных ФОП лопаток, образованных на базе установленных эксплуатационных, технологических и конструктивных связей.

В соответствии с поставленной целью в работе планируется решение следующих задач:

- выполнить анализ особенностей синтеза ФОП для лопатки, группы лопаток и групп лопаток относительно друг друга в ГТД;
- разработать методику реализации многосвязного технологического процесса формирования ФОП лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга в ГТД на базе принципа их равенства ресурса;
- провести реализацию технологического процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора, разработать алгоритм реализации ОУО лопаток с ФОП.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Особенности синтеза функционально-ориентированного покрытия для лопатки, группы лопаток и групп лопаток

ФОП это специальное покрытие, имеющее функционально-ориентированные свойства (ФОС), выполненное на изделии (лопатке) в соответствии с группой особых принципов ориентации [7, 8], свойства которого формируется в пространстве и во времени в соответствии с изменяющимися параметрами действия эксплуатационных функций в механизме. В этом случае, ФОП могут быть однослойными и многослойными. При этом в однослойном покрытии, изменяющиеся свойства могут быть получены за счет изменяющихся физико-механических свойств и толщины покрытия. В многослойном покрытии, изменяющиеся свойства покрытия могут реализовываться за счет изменяющихся физико-механических свойств и толщины каждого слоя, модуля слоев, а также за счет формирования специального покрытия [8, 9, 10], состоящего из слоев постоянной толщины с пространственным контуром границ (ПКГ) каждого слоя.

Можно отметить, что ГТД структурируется из целого комплекса различных подсистем, узлов и элементов. При этом лопатки ГТД формируются в несколько групп, а именно: лопатки компрессора, лопатки турбины, лопатки свободной турбины. Здесь, лопатки каждой группы могут подразделяться на подгруппы. Например, лопатки компрессора подразделяются на следующие подгруппы: лопатки входного направляющего аппарата, поворотные лопатки направляющего аппарата, лопатки направляющего аппарата, лопатки спрямляющего аппарата, рабочие лопатки ротора. Причем на группы и подгруппы лопаток ГТД действует целый комплекс различных эксплуатационных функций [1, 2, 3, 8]. Эти неодинаковые, изменяющиеся эксплуатационные воздействия приводят к следующим особенностям:

- неравномерному износу поверхностей и элементов пера лопатки;
- неравномерному износу лопаток в каждой группе;
- неравномерному износу групп лопаток относительно друг друга.

Можно отметить, что лопатки каждой группы имеют свои определенные особенности износа и соответственно длительности ресурса каждой лопатки. При этом неравномерность износа поверхностей и элементов пера лопатки приводят, в ряде случаев к невозможности восстановления лопатки при ремонте. Неравномерность износа лопаток в каждой группе приводит к неполному использованию одних лопаток группы относительно других, что снижает потенциальные возможности в повышении их ресурса. А также неравномерный износ групп лопаток относительно друг друга приводит к неполному использованию одних групп лопаток относительно других групп. Это также снижает потенциальные возможности в повышении их ресурса.

ФОП лопаток ГТД позволяют решать следующие задачи:

- исключить неравномерный износ поверхностей пера лопатки и повысить ресурс каждой лопатки;
- обеспечить одинаковый износ всех лопаток каждой группы и выполнить равный их ресурс;
- обеспечить одинаковый износ групп лопаток относительно других групп лопаток и выполнить равный их ресурс.

Применение ФОП для лопаток ГТД обеспечивает следующее:

- обеспечить повышение ресурса лопаток;
- выровнять ресурс лопаток в каждой группе и групп лопаток относительно друг друга;
- обеспечить повышение эксплуатационного потенциала лопаток;
- увеличить ремонтпригодность лопаток;
- многократное их восстановление работоспособности при ремонтах.

В данной работе будут рассмотрены вопросы формирования многослойного покрытия переменной толщины из слоев постоянной толщины, выполняемые на базе вакуумно-плазменных тонких покрытий. При этом эти вопросы будут рассмотрены для лопаток компрессора ГТД.

В качестве примера, на рисунке 1 представлена гипотетическая схема многослойного ФОП с ПКГ слоев лопатки компрессора ГТД. В этом случае, ФОП лопатки можно представить множеством кортежей, формируемых их слоев покрытия, имеющих ПКГ:

$$\Phi ОП = \{(A_1, G_1), (A_2, G_2), (A_3, G_3), \dots, (A_i, G_i), \dots, (A_n, G_n)\}; \quad (1)$$

где (A_i, G_i) - i -й кортеж, состоящий из i -го слоя покрытия A_i , имеющего i -й ПКГ слоя G_i ;

n – количество слоев и ПКГ ФОП.

В выражении (1) множества слоев ФОП и их ПКГ можно представить следующими множествами:

$$A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_i, \dots, A_n\}, \tag{2}$$

$$G = \{G_1, G_2, G_3, \dots, G_i, \dots, G_n\}; \tag{3}$$

где A и G – множество слоев и ПКГ многослойного ФОП.

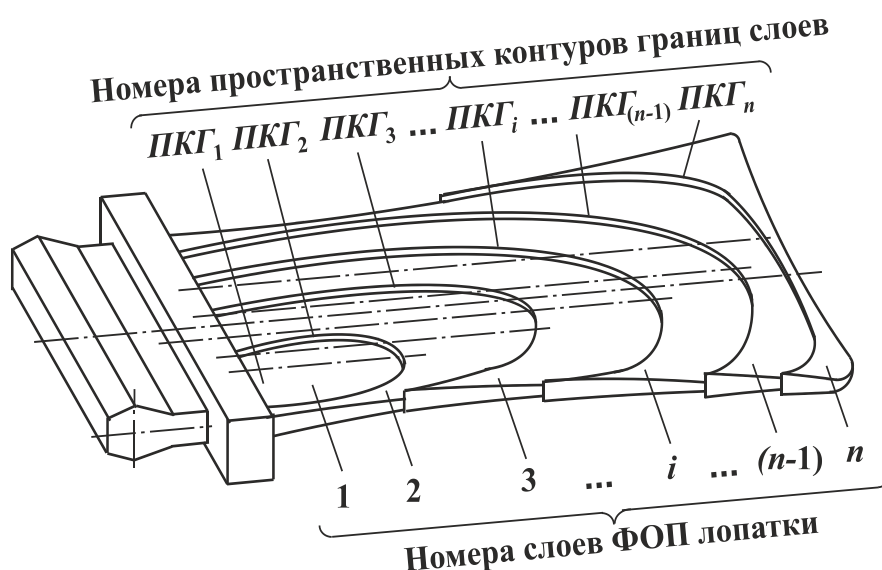


Рисунок 1. Гипотетическая схема многослойного ФОП с ПКГ слоев лопатки компрессора ГТД

Можно отметить, что в соответствии работами [8, 9, 10] ФОП лопатки формируется на базе группы особых принципов [7] ориентации свойств, технологических воздействий, определяемых в зависимости от особенностей эксплуатации опытного покрытия в ГТД. В этом случае, на основе принципов функционального и топографического

соответствия [7] ПКГ ФОП формируется в соответствии со следующим выражением:

$$\left. \begin{aligned} ПКГ_1 &\sim ПКГ_{1Э}, \\ ПКГ_2 &\sim ПКГ_{2Э}, \\ ПКГ_3 &\sim ПКГ_{3Э}, \\ \dots &\dots \\ ПКГ_i &\sim ПКГ_{iЭ}, \\ \dots &\dots \\ ПКГ_n &\sim ПКГ_{nЭ}; \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

где $ПКГ_i$ – пространственный контур границ i -го слоя покрытия пера лопатки (геометрические параметры);

$ПКГ_{iЭ}$ – пространственный контур границ i -го измерения ПКГ износа опытного покрытия пера лопатки (геометрические параметры), получаемого в процессе его эксплуатации [10];

\sphericalangle - знак бинарного соответствия геометрических параметров ПКГ покрытия и ПКГ зоны износа опытного покрытия.

Система выражений (4) показывает бинарное соответствие геометрических параметров всех слоев ФОП геометрическим параметрам зон износа опытного покрытия [10] лопатки в процессе ее эксплуатации в ГТД. При этом ПКГ износа опытного покрытия в процессе эксплуатации лопатки в ГТД определяется с периодом, определяемым в соответствии со следующим выражением:

$$t_i = \frac{T_o}{n}, \quad (5)$$

где t_i – длительность периода замеров геометрических параметров ПКГ опытного покрытия лопатки ($t_1 = t_2 = t_3 = \dots = t_i = \dots = t_n$);

T_o – длительность гарантированного ресурса ГТД.

Следует отметить, что ФОП на лопатке ГТД, в соответствии с разработанным способом его создания [10], формируется на базе эксплуатационного испытания опытного покрытия. Именно по этим данным строится ПКГ ФОП. При этом физико-механические свойства опытного покрытия и покрытия каждого слоя ФОП должны быть одинаковыми:

$$\Phi MS_{\text{оп}} \sphericalangle \Phi MS_{\text{ФОП}}$$

где $\Phi MS_{\text{оп}}$ – физико-механические свойства опытного покрытия лопатки, применяемого для определения параметров ПКГ i -го слоя покрытия пера лопатки ($ПКГ_{i\varnothing}$) в процессе эксплуатации;

$\Phi MS_{\text{ФОП}}$ – физико-механические свойства слоев ФОП пера лопатки.

Для ФОП общая максимальная толщина покрытия H определяется в соответствии со следующим выражением:

$$H = \sum_{i=1}^n h_i, \quad (6)$$

где h_i – толщина i -го слоя ФОП.

Можно отметить, что многослойное ФОП лопаток обычно структурируется из слоев одинаковой толщины. В этом случае, можно записать следующее выражение:

$$h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_i = \dots = h_n. \quad (7)$$

При этом толщина каждого слоя ФОП формируется из условия равенства толщин всех слоев толщине опытного покрытия:

$$h_i = h_{\text{оп}}, \quad (8)$$

Можно отметить, что многослойное ФОП может формироваться, как из слоев равной толщины, так и из слоев не одинаковой толщины. При формировании ФОП из слоев не одинаковой толщины, длительность периода замеров геометрических пара-

метров ПКГ опытного покрытия лопатки будет пропорциональна каждому слою, наносимому ФОП.

На рисунке 2 представлена схема синтеза многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя для лопаток ГТД.

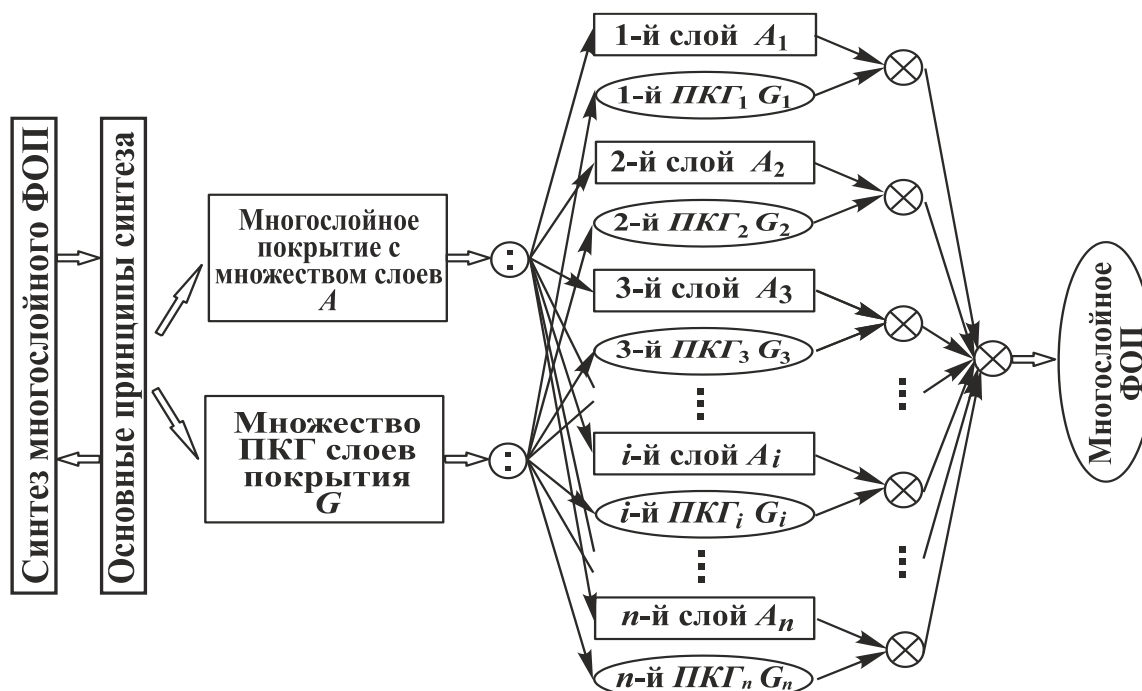


Рисунок 2. Схема синтеза многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя для лопаток ГТД: \odot - знак операции декомпозиции, \otimes - знак операции композиции

Таким образом, ФОП лопатки позволяет решать вопросы повышения ресурса ГТД. Вместе с тем, ГТД имеет структуру, состоящую из нескольких подсистем, в которых структурированы лопатки. В этом случае, ФОП лопаток различных групп (компрессор, турбина, свободная турбина) должны формироваться из условия обеспечения равного ресурса:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_j = \dots = R_J, \tag{9}$$

где R_j - ресурс j -ой группы лопаток ГТД;
 J – общее количество групп лопаток ГТД (каждая группа лопаток имеет свои определенные особенности эксплуатации и износа пера лопатки).

В этом случае, можно отметить, что в целом, ФОП для всех групп должно формироваться на базе следующего выражения:

$$\left. \begin{aligned}
 R_{11} = R_{12} = R_{13} = \dots = R_{1k_1} = \dots = R_{1K_1}; \\
 R_{21} = R_{22} = R_{23} = \dots = R_{2k_2} = \dots = R_{2K_2}; \\
 R_{31} = R_{32} = R_{33} = \dots = R_{3k_3} = \dots = R_{3K_3}; \\
 \dots \dots \dots \\
 R_{j1} = R_{j2} = R_{j3} = \dots = R_{jk_j} = \dots = R_{jK_j}; \\
 \dots \dots \dots \\
 R_{J1} = R_{J2} = R_{J3} = \dots = R_{JK_J} = \dots = R_{JK_J} ,
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где R_{jk_j} - ресурс k_j -ой лопатки j -ой группы лопаток ГТД;

K_j – общее количество лопаток в j -ой группе.

Таким образом, приведенные материалы поясняют особенности формирования ФОП каждой лопатки, лопаток в группе, и групп лопаток из условия равенства их ресурсов.

3. Методика реализации многосвязного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса

Можно отметить, что ГТД состоит из целого комплекса различных подсистем и узлов. При этом в этих подсистемах ГТД в процессе их эксплуатации действуют различные, в том числе изменяющиеся эксплуатационные функции. Это приводит к различному износу элементов и деталей в различных подсистемах. Особенно это относится к лопаткам ГТД, которые эксплуатируются в следующих подсистемах: лопатки компрессора низкого давления, лопатки компрессора высокого давления, лопатки турбины компрессора высокого давления, лопатки турбины низкого давления, лопатки свободной турбины. Причем в каждой подсистеме ГТД имеются несколько групп лопаток испытывающие неравномерные неодинаковые износы поверхностей. Это приводит неодинаковому износу рабочей поверхности каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга. Все это снижает ресурс ГТД из-за неодинаковых условий эксплуатации групп лопаток, не позволяет повышать ресурс авиационного двигателя, не позволяет решать вопросы полного использования эксплуатационного потенциала лопаток всех групп ГТД, повышения уровня ремонтпригодности лопаток за счет их восстановления при ремонтах.

Применение ФОП позволяет решать вопросы повышения ресурса каждой лопатки, выравнивания ресурса лопаток в каждой группе и групп лопаток относительно друг друга. Однако для решения этих вопросов необходимы специальные – многосвязные технологические процессы формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса [11], формирования ФОП каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга, представленных выражениями (9) и (10).

Многосвязный технологический процесс формирования ФОП, это специальный процесс, предназначенный для реализации многослойного покрытия каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга из условия обеспечения равного ресурса всех лопаток, на основе установленных связей отдельных процессов их реализации, для комплексного повышения ресурса ГТД [11].

На схеме рисунка 3 представлены основные этапы методики реализации связного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса. Она содержит следующие этапы реализации [8, 11]:

1. Задаются начальные данные процесса. Назначается гарантированный ресурс лопаток компрессора ГТД. Например, для турбовального ГТД модели ТВ3-117 гарантированный ресурс составляет $T_o = R = 6000$ час.

2. Предварительно устанавливаются параметры средней интенсивности износа μ_{Ri} покрытия групп лопаток компрессора ГТД. Например, для турбовальных двигателей модели ТВ3-117, такие параметры представлены в работе [7]. Эти исследования выпол-

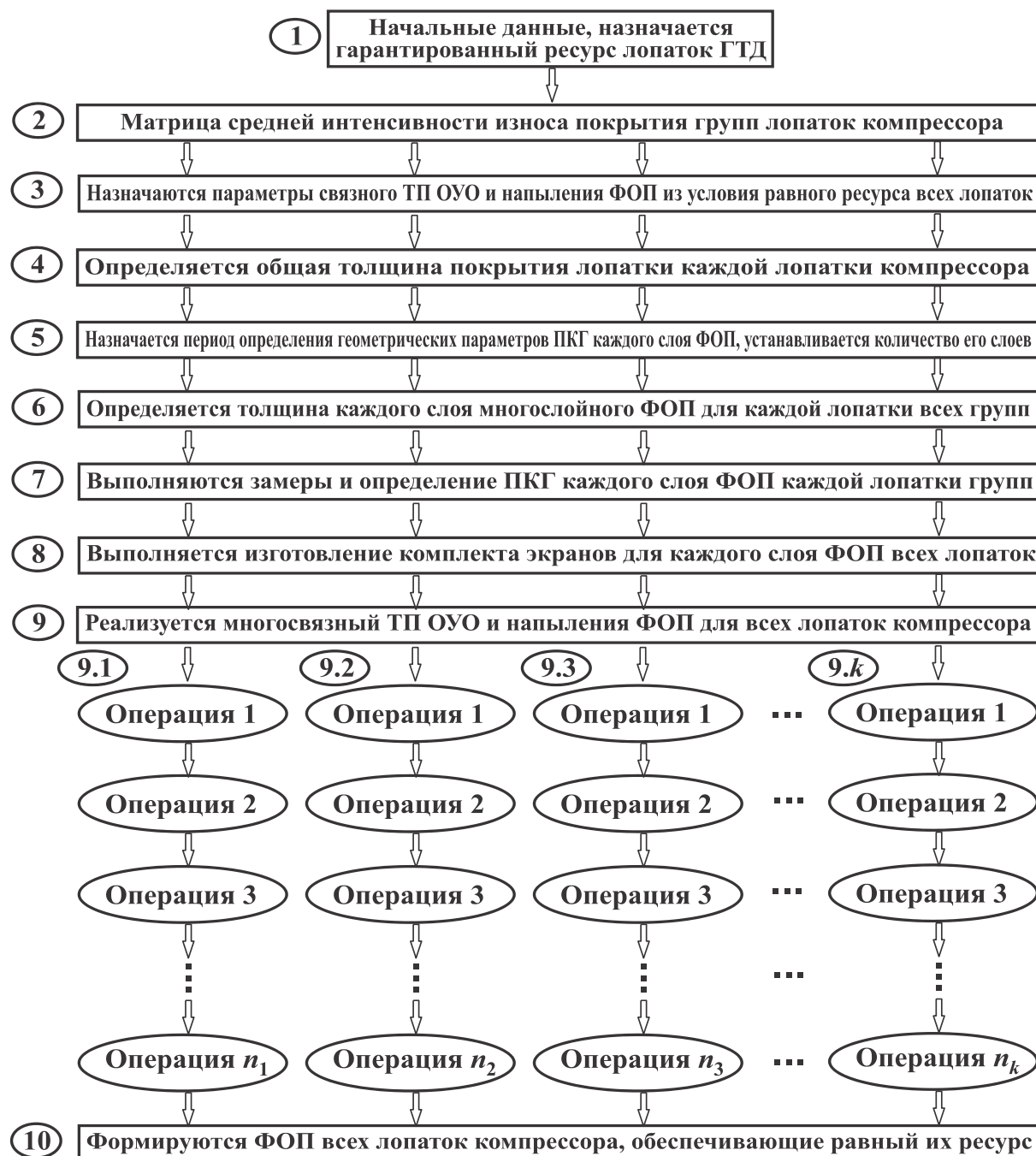


Рисунок 3. Основные этапы методики реализации связного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса

нены на основании износа лопаток для двадцати ГТД, ремонтируемых на ОАО «Луганский авиаремонтный завод».

3. Назначаются параметры связного технологического процесса (ТП) ОУО и напыления ФОП из условия равного ресурса всех лопаток компрессора [11, 12, 13]. В данном случае, предусмотрено напыление двух вариантов покрытий, а именно:

- нитрид титановое покрытие,
- нитрид алюминий титановое покрытие.

4. Определяется общая толщина покрытия каждой лопатки компрессора. Общая толщина покрытия лопатки в зоне максимального его износа (расположенной, например, на пересечении входной и периферийной кромок для рабочих лопаток). Она определяется по формуле:

$$H = \mu_{Ri} T_o, \quad (11)$$

где H - общая толщина покрытия лопаток;

μ_{Ri} – интенсивность износа i -го слоя покрытия.

Результаты расчетов общих толщин нитрид титанового и нитрид алюминий титанового покрытия для лопаток различных групп компрессора ГТД модели ТВЗ-117 представлены в таблице 1 и таблице 2. В таблице 1 ... таблице 6 введены следующие сокращения: ВНА – входной направляющий аппарат, НА – направляющий аппарат, ВСА – выходной спрямляющий аппарат, ПЛ – поворотная лопатка, НЛ – неподвижная лопатка. А также, здесь имеются обозначения: H_{Ri} – общая толщина многослойного ФОП для R_i –ой лопатки ГТД; h_{Ri} - толщина слоя ФОП для R_i –ой лопатки ГТД; t_{Ri} – время напыления слоя ФОП для R_i –ой лопатки ГТД.

5. Назначается период определения геометрических параметров ПКГ каждого слоя ФОП.

Данный период можно определить с учетом следующего условия:

$$T_o = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (12)$$

где n – количество слоев многослойного ФОП или число периодов определения геометрических параметров ПКГ;

t_i – i -й период.

Если $t_1 = t_2 = t_3 = \dots = t_n$, то значение периода определения геометрических параметров ПКГ находим в соответствии с выражением (5)

Количество слоев многослойного ФОП каждой лопатки соответствует числу периодов определения геометрических параметров ПКГ покрытия.

В случае $n = 4$ период определения геометрических параметров ПКГ покрытия лопаток при гарантированном ресурсе $T_o = R = 6000$ час составляет $t_i = 1500$ час.

6. Определяется толщина каждого слоя многослойного ФОП. В случае, если толщины слоев каждого ФОП лопатки равны $h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n$ толщина каждого слоя покрытия определяется на основании выражения (6) по следующему выражению:

$$h_i = \frac{H}{n}. \quad (13)$$

Таблица 1. – Значения общей толщины покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номера групп лопаток компрессора (статор)												
1	2				3				4			
ВНА	ПЛ НА				НЛ НА				ВСА			
Номера ступеней												
1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1
Заданная общая толщина покрытия лопатки, H_{Ri} мкм												
H_{101}	H_{201}	H_{202}	H_{203}	H_{204}	H_{301}	H_{302}	H_{303}	H_{304}	H_{305}	H_{306}	H_{307}	H_{401}
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)												
3,96	4,86	4,74	4,62	4,26	4,08	3,96	4,32	4,98	5,46	5,70	5,76	6,30
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)												
3,42	4,20	4,08	3,96	3,72	3,54	3,54	3,72	4,32	4,68	4,98	5,22	5,46

Таблица 2. – Значения общей толщины покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номер группы лопаток компрессора (ротор)											
5											
Номер ступени											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Заданная общая толщина покрытия лопатки, H_{Ri} мкм											
H_{501}	H_{502}	H_{503}	H_{504}	H_{505}	H_{506}	H_{507}	H_{508}	H_{509}	H_{510}	H_{511}	H_{512}
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)											
7,26	7,14	6,54	6,36	6,12	6,18	6,48	7,50	8,16	8,52	8,64	9,06
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)											
6,30	6,18	5,94	5,52	5,28	5,34	5,58	6,48	7,08	7,44	7,50	7,92

Таблица 3. – Значения толщины каждого слоя покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номера групп лопаток компрессора (статор)												
1	2				3				4			
ВНА	ПЛ НА				НЛ НА				ВСА			
Номера ступеней												
1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1
Заданная толщина слоя покрытия лопатки, h_{Ri} мкм												
h_{101}	h_{201}	h_{202}	h_{203}	h_{204}	h_{301}	h_{302}	h_{303}	h_{304}	h_{305}	h_{306}	h_{307}	h_{401}
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)												
0,99	1,21	1,18	1,15	1,06	1,02	0,99	1,08	1,24	1,36	1,42	1,44	1,57
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)												
0,85	1,05	1,02	0,99	0,93	0,88	0,88	0,93	1,08	1,17	1,24	1,30	1,36

Таблица 4. – Значения толщины каждого слоя покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номер группы лопаток компрессора (ротор)											
5											
Номер ступени											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Заданная толщина слоя покрытия лопатки, h_{Ri} мкм											
h_{501}	h_{502}	h_{503}	h_{504}	h_{505}	h_{506}	h_{507}	h_{508}	h_{509}	h_{510}	h_{511}	h_{512}
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)											
1,81	1,78	1,63	1,59	1,53	1,54	1,62	1,87	2,04	2,13	2,16	2,26
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)											
1,57	1,54	1,48	1,38	1,32	1,33	1,39	1,62	1,77	1,86	1,87	1,98

Результаты определения толщин слоев покрытий заносятся в таблицу 3 и таблицу 4.

7. Выполняются замеры и определение ПКГ каждого слоя ФОП каждой лопатки групп для всего компрессора. Они производятся в соответствии с методикой, представленной в работе [11].

8. Выполняется изготовление комплекта экранов для каждого слоя многослойного ФОП для всех лопаток компрессора.

9. Реализуется многосвязный технологический процесс ОУО и напыления ФОП для всех лопаток компрессора. В этом случае выполняются процессы 9.1; 9.2; 9.3; ...; 9.k, где k – общее количество технологических процессов или различных лопаток компрессора. На рисунке 3 структура отдельных технологических процессов представлена гипотетически, при этом они связаны между собой параметрами толщин слоев покрытий, определяемых данными, приведенными в таблице 3 и таблице 4.

В этом случае данный комплексный многосвязный процесс выполняется на основе принципа равного ресурса всех лопаток компрессора. Это обеспечивается за счет ФОП с заданными параметрами толщин слоев покрытий определяемыми матрицами, представленными в работе [8, 10].

10. На базе многосвязного технологического процесса формируются ФОП всех лопаток компрессора, обеспечивающие равных их ресурс в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций трех рангов.

Таким образом, представленная методика позволяет формировать многослойные ФОП лопаток компрессора, обеспечивающие равный ресурс лопаток в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций трех рангов, посредством реализации комплексного многосвязного технологического процесса.

4. Технологическая реализация процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора

На рисунке 4 представлен алгоритм реализации отделочно-упрочняющей обработке (ОУО) лопаток компрессора всех групп с ФОП [8, 10]. Для реализации технологического процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора необходимо иметь исходные данные. Поэтому данный алгоритм начинается с задание этих параметров.

Структура алгоритма реализации ОУО лопаток компрессора всех групп с ФОП выполняется в следующем порядке:

1. Задаются исходные данные процесса. При этом основными данными являются следующие параметры:

- равный (кратный) ресурс лопаток всех групп, связи параметров ФОП;
- количество слоев n ФОП;

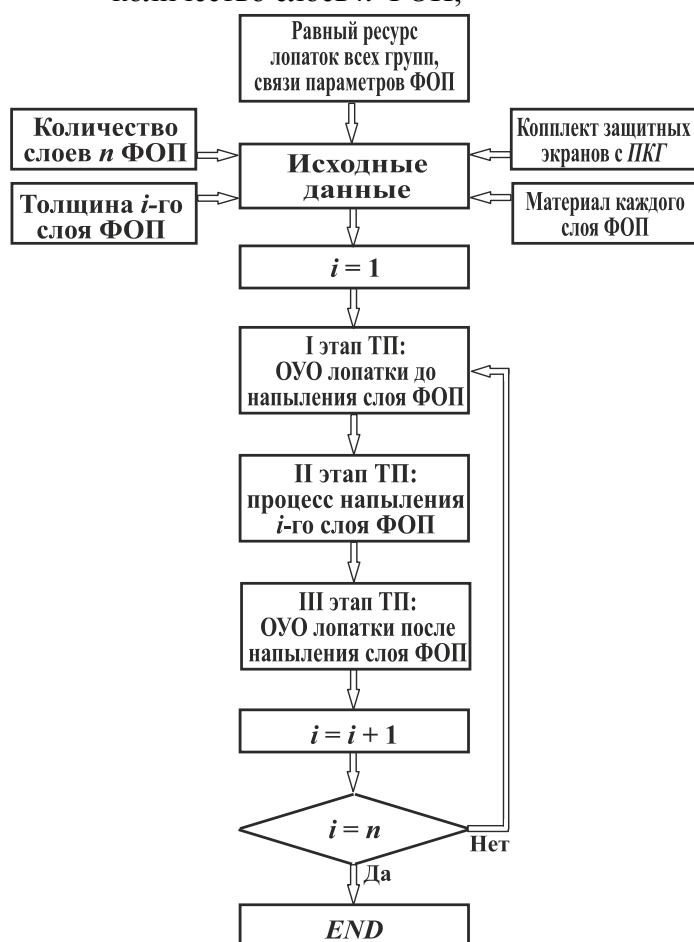


Рисунок 4. Алгоритм реализации ОУО лопаток компрессора всех групп с ФОП

переходит к I этапу технологического процесса (ТП) и повторяются все этапы (рисунок 4) и так далее.

8. Выполняется операция *END*.

Можно отметить, что на I этапе алгоритма технологического процесса выполняется очистка поверхностей лопаток компрессора, удаление пленок оксидов и нитридов с помощью ультразвуковой их обработки с использованием специальной жидкости, приспособлений и ультразвукового генератора УЗГ 4-1. Это необходимо для обеспечения ювенильности поверхностей лопаток компрессора при последующем напылении ФОП.

В предлагаемом технологическом процессе (рисунок 4) наиболее важным является процесс напыления каждого слоя ФОП, который выполняется на II этапе. В данном случае, этот процесс выполняется с использованием вакуумной ионно-плазменной установки (вакуумной электродуговой установки) ННВ 6.6-И1, общий вид которой представлен на рисунке 5.

- толщина i -го слоя ФОП;
- комплект защитных экранов для формирования всех слоев ФОП;
- материал каждого слоя ФОП.

2. Задается значение $i = 1$, где i – номер слоя ФОП.

3. Выполняется I этап технологического процесса (ТП). На этом этапе выполняется ОУО лопатки до напыления слоя ФОП.

4. Затем реализуется II этап технологического процесса (ТП). Здесь, осуществляется процесс напыления i -го слоя ФОП.

5. Далее, выполняется III этап технологического процесса (ТП). В этом случае производится ОУО лопатки после напыления слоя ФОП. На этом этапе обязательно осуществляется процесс полировки поверхности слоя покрытия лопатки.

6. Задается значение $i = i + 1$.

7. Если $i = n$, где n – общее количество слоев ФОП, процесс переходит следующему этапу и завершается. Если $i = n$ процесс

Технологический процесс напыления каждого (одного) слоя ФОП (II этап) выполняется в следующем порядке:

1. Производится загрузка лопаток компрессора, прогрев и откачка среды вакуумной камеры.



Рисунок 5. Общий вид вакуумной установки ННВ 6,6 – И1 для напыления ФОП лопаток компрессора

1.1. Выполняется установка защитных экранов с ПКГ на лопатки и их закрепление. Затем они размещаются на специальную оснастку, которая потом монтируется на планшайбу установки. При нанесении 1-го слоя ФОП устанавливаются защитные экраны с 1-м ПКГ экрана, при нанесении 2-го слоя ФОП – защитные экраны со 2-м ПКГ экрана, и так далее, пока не будут нанесены n слоев ФОП.

1.2. Производится откачка вакуумной камеры форвакуумным (механическим) насосом и затем паромасляным (диффузионным) насосом. Переключение насосов выполняется при давлении $P = 10^{-1}$ Па.

1.3. Осуществляется прогрев вакуумной камеры горячей водой посредством ее подачи в рубашку корпуса.

2. Выполняется очистка поверхностей лопаток компрессора ионным травлением в газовом разряде.

2.1. Производится откачка давления вакуумной камеры до значения $P = 2,6 \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$ Па.

2.2. Выполняется отключение прогрева вакуумной камеры при давлении $P = 2,6 \cdot 10^{-3}$ Па.

2.3. Производится включение системы охлаждения вакуумной камеры. Это способствует усилению процесса снижения давления вакуумной камеры.

2.4. Выполняется подача на приспособление и лопатки компрессора напряжения смещения до значения $V_c = 1000$ В.

2.5. Осуществляется плавная подача аргона до появления слабого свечения в вакуумной камере возле лопаток компрессора или возникновения единичных искровых разрядов.

2.6. Производится выдержка лопаток компрессора в течении $t = 2 \dots 3$ мин.

2.7. Выполняется повышение давления аргона в вакуумной камере до появления слабых искровых разрядов.

2.8. Производится уменьшение давления аргона в вакуумной камере до исчезновения искровых разрядов.

2.9. Производится выдержка лопаток компрессора в течении $t = 2 \dots 3$ мин.

2.10. Выполняется повышение давления в вакуумной камере до значения $P = 1$ Па, до тех пор, пока не исчезнут разряды.

2.11. Производится выдержка лопаток компрессора в течении $t = 5$ мин.

2.12. Производится откачка вакуумной камеры до давления $P = 2,6 \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$ Па.

2.13. Далее, выполняется увеличение напряжения смещения на лопатках до значения $V_c = 1200$ В.

2.14. Выполняется повторение пунктов 2.5 ... 2.11. При этом температура нагрева лопаток компрессора не должна превышать температуру 480°C , которая контролируется с помощью пирометра СМОТРИЧ.

2.15. Производится прекращение подачи аргона и выполняется выключение напряжения смещения.



Рисунок 6. Общий вид подсистем вакуумной установки: а – натекатели газа регулируемые, б – вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-3

2.16. Осуществляется откачка давления вакуумной камеры до значения $P = 2,6 \cdot 10^{-3}$ Па.

3. Выполняется очистка поверхности лопаток компрессора бомбардировкой ионами металла и нагрев до рабочих температур.

3.1. Выполняется подача на поворотное устройство лопаток компрессора напряжения смещения до значения $V_c = 1200$ В.

3.2. Выполняется включение испарителя и установка минимально допустимого значения тока дуги, исключающего искровые разряды.

3.3. Производится ионная бомбардировка поверхностей лопаток компрессора посредством периодического включения и отключения тока дуги (время горения дуги $t = 1 \dots 2$ с, перерыв $20 \dots 60$ с).

3.4. Выполняется восстановление вакуума в камере до значений $P > 1,1 \cdot 10^{-1}$ Па.



Рисунок 7. Общий вид шкафов управления вакуумной ионно-плазменной установки ННВ 6,6 – И1

3.5. Выполняют повторение пунктов 3.3 и 3.4 до полного исчезновения микродуг на поверхности лопаток компрессора (общее время ионной бомбардировки $t = 5 \dots 7$ мин).

3.6. Производится предварительный прогрев лопаток компрессора при непрерывном горении дуги и давлении вакуума до значения $P = 6,7 \cdot 10^{-3}$ Па.

3.7. Выполняется подача реакционного газа – азота и создается давление вакуума $P = 6,7 \cdot 10^{-2}$ Па.

3.8. Осуществляется окончательный прогрев лопаток компрессора ионами азота и титана (катоды выполняются из сплава ВТ 1-0 и Ti-9Al).

3.9. Проводится контроль температуры нагрева лопаток компрессора с помощью пирометра СМОТРИЧ. При этом начальная температура лопаток компрессора принимается 250°C , а окончательная до значения 480°C .

4. Выполняется нанесение покрытия. В данной работе производится нанесение двух видов покрытий: нитрид титановое (катоды ВТ 1-0) и нитрид алюминий титановое (катоды Ti-9Al).

4.1. Выполняется выключение испарителей.

4.2. Производится отключение высокого напряжения, и выполняется подача на лопатки компрессора напряжения $V_n = 40 \dots 350$ В. Величина этого напряжения устанавливается в зависимости от загрузки лопаток на приспособление (общий вес лопаток в зависимости от номера ступени компрессора и их количества).



Рисунок 8. Лопатка компрессора с 1-м слоем ФОП



Рисунок 9. Лопатка компрессора со 2-м слоем ФОП



Рисунок 10. Лопатка компрессора с 3-м слоем ФОП



Рисунок 11. Лопатка компрессора с 4-м слоем ФОП

4.3. Выполняется включение испарителей.

4.4. Осуществляется подача азота с помощью регулируемых натекателей (рисунок 6, а) и производится установка его рабочего давления $P = 1,1 \cdot 10^{-1}$ Па. Контроль этого давления выполняется с помощью вакуумметра ионизационно-термопарного ВИТ-3 (рисунок 6, б)

4.5. Проводится установка тока дугового испарителя в пределах $I_k = 40 \dots 150$ А. Ток дуговых испарителей устанавливается индивидуально в зависимости от материала катода и параметров оснастки с лопатками). Это выполняется с помощью систем управления, показанных на рисунке 7.

4.6. Производится включение механизма вращения оснастки с загруженными лопатками компрессора.

4.7. Производится конденсация покрытия в течение времени, необходимого для обеспечения заданной его толщины. При этом время напыления первого связующего покрытия на лопатки компрессора, из чистого титана, составляет $t = 10 \dots 15$ с. Длительность напыления слоев ФОП из нитридов металлов для различных групп лопаток компрессора определяются в соответствии с данными, приведенными в таблице 5 и таблице 6.

4.8. Производится выключение испарителей установки.

5. Выполняется охлаждение, выгрузка лопаток из вакуумной камеры и контроль качества нанесения покрытия.

5.1. Выполняется выдержка лопаток компрессора в вакуумной камере в течение 1 ... 2 мин при рабочем опорном напряжении и давлении газа.

5.2. Выполняется выключение напряжения, прекращение подачи газа в вакуумную камеру, выключение механизма вращения.

5.3. Осуществляется охлаждение лопаток компрессора до температуры $T_n > 40$ °С.

5.4. Выполняется выгрузка оснастки с лопатками компрессора. При этом лопатки (рисунок 8) снимаются с оснастки, контролируется качество нанесения покрытия (визуальный контроль и с помощью специальных методов) и передаются на III этап технологического процесса. После реализации 1-го слоя ФОП с первым ПКГ₁ (рисунок 8), выполняется 2-й слой ФОП со вторым ПКГ₂ (рисунок 9), затем наносится 3-й слой ФОП с третьим ПКГ₃ (рисунок 10), и так далее, последним наносится покрытие для всей лопатки (рисунок 11). Можно отметить, что после напыления каждого слоя покрытия выполняется полировка поверхностей лопаток для обеспечения адгезионной прочности слоев покрытий. Этот процесс реализуется на III этапе технологического процесса (рисунок 4).

На III этапе технологического процесса выполняется полировка поверхностей лопатки, включая покрытие, и передаются далее в соответствии с алгоритмом (рисунок 4) на I этап для реализации 2-го слоя ФОП и так далее. При этом полировка выполняется с использованием полировального станка, общий вид которого представлен на рисунке 12.

Таблица 5. – Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номера групп лопаток компрессора (статор)												
1	2				3				4			
ВНА	ПЛ НА				НЛ НА				BCA			
Номера ступеней												
1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1
Значение длительности напыления каждого слоя покрытия лопатки, t_{Ri} , с												
t_{101}	t_{201}	t_{202}	t_{203}	t_{204}	t_{301}	t_{302}	t_{303}	t_{304}	t_{305}	t_{306}	t_{307}	t_{401}
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)												
71	87	85	83	76	73	71	78	89	98	102	104	113
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)												
59	76	73	71	67	63	63	67	78	84	89	94	98

Таблица 6. – Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номер группы лопаток компрессора (ротор)											
5											
Номер ступени											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Значение длительности напыления каждого слоя покрытия лопатки, t_{Ri} , с											
t_{501}	t_{502}	t_{503}	t_{504}	t_{505}	t_{506}	t_{507}	t_{508}	t_{509}	t_{510}	t_{511}	t_{512}
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)											
130	128	117	114	110	111	117	135	147	153	156	163
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)											
113	111	107	99	95	96	100	117	127	134	135	143

Основным результатом данной работы является практическая реализация комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Данный процесс обеспечивает выполнение свойств всех лопаток компрессора из условия равного их ресурса в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий трех родов, возникающих в компрессоре в различных группах лопаток.



Рисунок 12. Общий вид установки для полировки лопаток компрессора

В целом, разработанная структура комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП формируется в соответствии со схемой рисунка 13.

На рисунке 13 приведена схема комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Здесь показано, что процесс реализации технологического процесса выполняется на базе

обеспечения одинакового (равного) ресурсам всех лопаток компрессора ГТД. При этом структура этого процесса формируется из R технологических процессов (ТП) напыления $ФОП_R$ для R различных лопаток всего компрессора. В этом случае, каждый технологический процесс состоит из n_i технологических подпроцессов, каждый из которых реализует n_i -й слой заданного $ФОП_{ni}$. Можно отметить, что каждый слоя $ФОП_i$ формируется с $ПКГ_{ini}$, который выполняется заданной толщины h_{ini} . На рисунке 13 приведены следующие обозначения: \oplus - знак декомпозиции, \odot - знак бинарного соответствия, \otimes - знак композиции.

Можно отметить, что между структурами технологических процессов ОУО лопаток соседних номеров ступеней компрессора (рисунок 13) действуют связи параметров:

$$X_{r-1} = f(X_r), \quad (14)$$

где X_{r-1} – множество параметров технологического процесса ОУО лопаток $(r-1)$ -го номера;

X_r – множество параметров технологического процесса ОУО лопаток r -го номера.

Между параметрами ФОП лопаток компрессора также действуют связи:

$$Y_{r-1} = f(Y_r), \quad (15)$$

где Y_{r-1} – множество параметров ФОП лопаток $(r-1)$ -го номера;

Y_r – множество параметров ФОП лопаток r -го номера.

Здесь, следует отметить, что выражение (14) связывают между собой параметры отдельных технологических процессов ОУО лопаток. Подобные связи имеют место между всеми технологическими процессами комплексного связанного технологического процесса ОУО всех лопаток компрессора ГТД (рисунок 13). Также следует отметить, что между параметрами ФОП лопаток компрессора соседних ступеней также действуют связи, определяемые выражением (15). На основании наличия этих связей предлагаемый комплексный технологический процесс является связным по параметрам технологии и по параметрам ФОП. При этом на основании этих связей реализуется принцип равенства ресурса всех лопаток компрессора.

На основании выражений (14) и (15), а также схемы рисунка 13, к основным параметрам связи технологических процессов можно отнести следующие [8]:

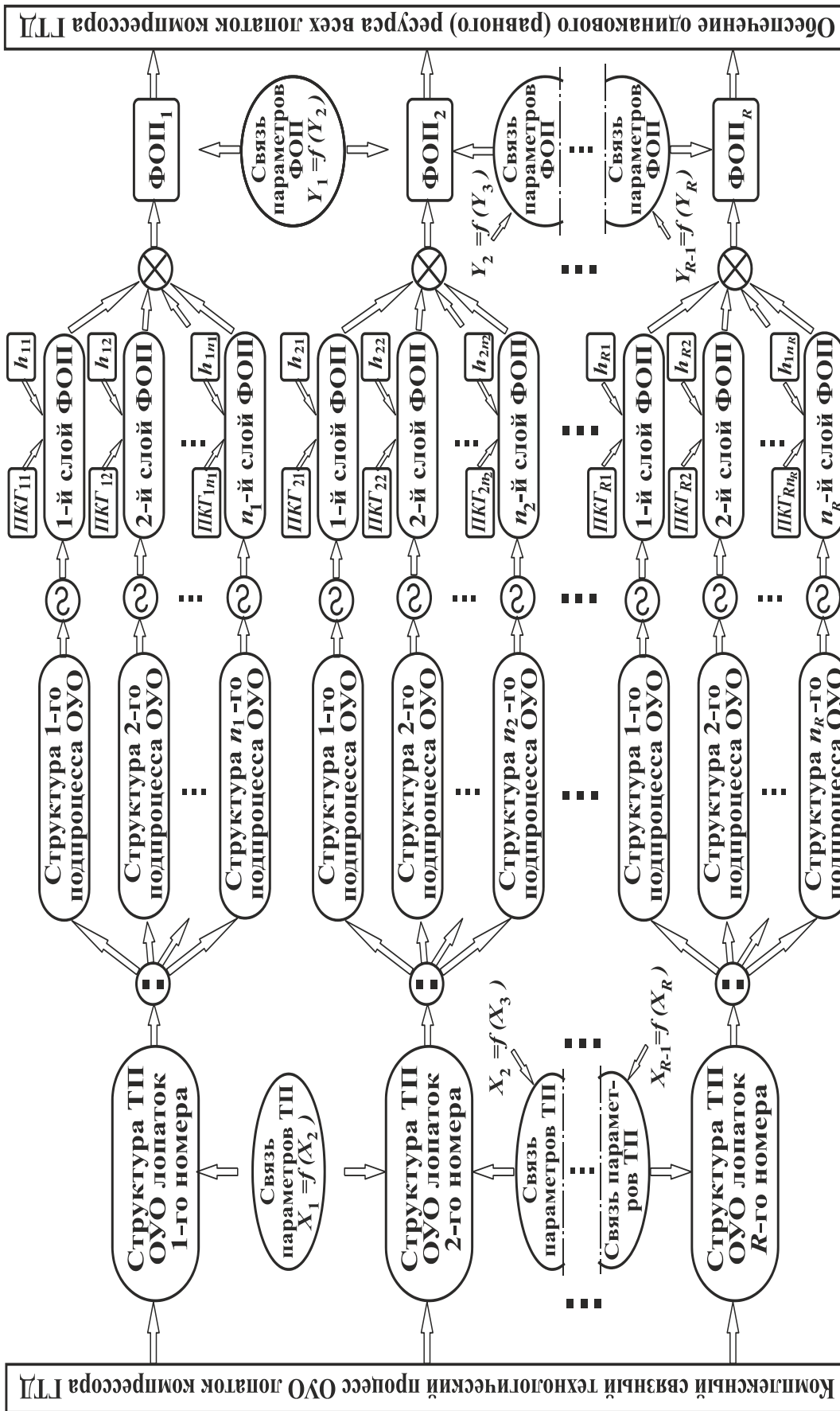


Рисунок 13. Схема синтеза комплексного связного технологического процесса ОУО лопаток с ФОП на базе принципа равенства ресурса всех лопаток ГТД

1. Обеспечение равного ресурса всех лопаток компрессора, работающих в условиях неравномерного износа, характеризуемого действия неравномерностей трех родов. Параметры интенсивности износа покрытия лопаток определяются параметрами, приведенными в работе [7].

2. Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора. Например, для лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие), длительность напыления слоев покрытий для различных номеров лопаток приведена в таблице 5 и таблице 6.

3. Количество слоев многослойного ФОП лопаток компрессора. Эти данные определяются на основании выражения (13).

4. Толщина i -го слоя многослойного ФОП лопаток компрессора. Эти параметры с учетом связей определяются в соответствии с выражением (8).

5. При нанесении слоев ФОП устанавливается ток дугового испарителя в пределах 80 ... 140 А. При этом ток дугового испарителя для комплекта лопаток первых ступеней, например, рабочих лопаток компрессора двигателя модели

Можно отметить, что в выполненной работе представлены данной по конкретной экспериментальной реализации многосвязного технологического процесса формирования многослойного ФОП различных групп лопаток компрессора ГТД. ФОП и принцип равного ресурса всех лопаток компрессора позволяет решать вопросы повышения ресурса ГТД, адаптировать работу лопаток к особенностям их эксплуатации, обеспечить равный ресурс лопаток всех групп и повысить их ремонтпригодность.

5. Заключение

Таким образом, представленные в данной работе исследования направлены на повышение ресурса лопаток ГТД за счет комплексного формирования ФОС лопаток, обеспечения равного ресурса лопаток каждой группы и групп лопаток относительно друг друга, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций. Это выполняется на основе разработки метода синтеза многосвязного технологического процесса реализации многослойных ФОП лопаток, образованных на базе установленных эксплуатационных, технологических и конструктивных связей.

Проведенные исследования позволили выполнить следующее:

1. Разработать принципы и особенности синтеза многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя для каждой лопатки, для лопаток группы и групп лопаток относительно друг друга из условия равенства их ресурсов, а также повышения ресурса всех лопаток в ГТД.

2. Для решения вопросов повышения ресурса лопаток в ГТД в работе разработана методика реализации многосвязного технологического процесса формирования ФОП каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга, выполняемого на базе принципа равенства ресурсов всех лопаток при одновременном повышении ресурса ГТД.

3. В работе выполнена реализация технологического процесса формирования ФОП лопаток. При этом разработан алгоритм реализации ОУО лопаток с ФОП, представлено технологическое обеспечение формирования ФОП на базе вакуумных ионно-плазменных покрытий. А также представлена схема синтеза комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток с ФОП.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ющенко, К. А. Інженерія поверхні. Підручник. / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов – К.: Наукова думка, 2007. – 558 с.
2. Физико-технологические основы методов обработки / Под ред. А. П. Бабищева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с.
3. Абраимов, Н. В. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов / Н.В. Абраимов, Ю.С. Елисеев – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с.
4. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
5. Полетаев, В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Политаев – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
6. Богуслаев, В. А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и [др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2005. – 559 с.
7. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
8. Михайлов, В. А. Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – 18 с.
9. 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.
10. Патент № 2718877 RU, С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. П. Пичко, Н. С. Пичко, В. И. Сухарев; заявл. 2018107164 от 26.02.2018; опубл. 15.04.2020, Бюл. № 11. – 7 с.
11. Михайлов, А. Н. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями/ А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Научные технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1 (103). – С. 40-48. – <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>
12. Михайлов, Д. А. Особенности структурирования многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 2 (69). – С. 36 - 49.
13. Михайлов, Д. А. Особенности формирования параметров многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 3 (70). – С. 42 - 54.

Поступила в редколлегию 29.04.2020 г.