

ing // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2010. – No.5 (283). – pp. 35-40.

2. Bishutin, S.G., Shupikov, I.L. Quality of extended cylindrical surfaces of parts after petal grinding // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2009. – No.10 (151). – pp. 54-56.

3. Bishutin, S.G., Zakharov, L.A. Surface formation at processing with coarse-grain abrasive hones // *Mechanician*. – 2011. – No.16. – pp. 23-26.

4. Bishutin, S.G. Assurance of required quality parameters of surface layer in flat surfaces at abrasive stone working // *Contact Stiffness. Wear-resistance. Technological Support: Proceedings of the Inter. Scientif.-tech. Conf.* – Bryansk, 2003. – pp. 239-242.

5. *Engineering of Parts Surface* / A.G. Suslov, V.F. Bezilyazychny, Yu.V. Panfilov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.

6. Bishutin, S.G., Pilyaev, A.S. Peculiarities in formation of working surfaces of extended guides at combined finish anti-friction processing // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2013. – No.3. – pp. 5-9.

7. Bishutin, S.G. Quality and wear-resistance of friction surfaces of extended cylindrical guides after combined anti-friction processing // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.11 (89). – pp. 19-24.

Рецензент д.т.н. В.А. Носенко

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48

А.Н. Михайлов, д.т.н., Д.А. Михайлов, к.т.н., Е.А. Шейко, к.т.н., В.А. Михайлов, аспирант  
(Донецкий национальный технический университет,  
Академия гражданской защиты МЧС ДНР, г. Донецк)  
E-mail: mntk21@mail.ru

## Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями

*Показано, что компрессор газотурбинного двигателя состоит из групп лопаток, которые испытывают неравномерный абразивно-эрозионный износ, характеризуемый неравномерностями 3-х родов. Для повышения ресурса лопаток компрессора предложено использовать функционально-ориентированные покрытия и обеспечивать их свойства на основе принципа равного ресурса. В работе решены вопросы структурного синтеза комплексного многосвязного технологического процесса напыления функционально-ориентированных покрытий лопаток групп.*

**Ключевые слова:** лопатки компрессора; газотурбинный двигатель; технология; многосвязный процесс; функционально-ориентированные покрытия.

A.N. Mikhailov, Dr. Sc. Tech., D.A. Mikhailov, Can. Sc. Tech, E.A. Sheiko, Can. Sc. Tech.,  
V.A. Mikhailov, Post graduate student  
(Donetsk National Technical University, Academy of Civil Defense of MES DPR, Donetsk)

## Structural synthesis of complex multi-coherent engineering process of compressor blade processing of gas turbine engines with function-oriented coatings

*It is shown that the compressor of a gas turbine engine consists of a group of blades which experience uneven abrasive-erosion wear characterized with unevenness of three types. To increase compressor blade life it is offered to use function-oriented coatings and to ensure their properties on the basis of the principle of equal resource. In the work there are solved the problems of a structural synthesis of a complex multi-coherent technological process of function-oriented blade group sputtering.*

**Keywords:** compressor blades; gas turbine engine; technology; multi-coherent process; function-oriented coatings.

### Введение

Выполненные ранее исследования [1 – 3] позволили установить, что компрессор газотурбинного двигателя (ГТД) структурируется из групп лопаток, которые выполняют задан-

ные функции в проточной части компрессора. При этом в работах [4, 5] показано, что на лопатки компрессора действуют неравномерные абразивно-эрозионные воздействия, которые приводят к возникновению неравномерного износа лопаток в группах, характеризуемого

неравномерностями 3-х родов. Эти неравномерности износа лопаток значительно снижают ресурс и ремонтпригодность лопаток компрессора ГТД. При этом возникающий износ лопаток компрессора 1-го рода не позволяет их восстанавливать из-за катастрофического разрушения тела лопатки в зонах передней и периферийной кромки пера.

Для решения вопросов повышения ресурса лопаток компрессора предлагается использовать функционально-ориентированные покрытия (ФОП) [3 – 6]. ФОП позволяют адаптировать лопатки компрессора к особенностям абразивно-эрозионного износа их в проточной части компрессора, при этом исключить действие неравномерностей 1-го рода, а именно неравномерный износ пера лопатки в пределах назначенного ресурса ГТД.

Так как компрессор ГТД состоит из групп лопаток [7], выполняющих заданные функции в проточной части компрессора, износ лопаток компрессора в различных группах имеет свои определенные особенности, характеризующиеся особенностями износа лопаток 3-х родов. Для обеспечения равного ресурса всех лопаток компрессора, работающих в условиях действия этих неравномерностей, предложено применение ФОП [2 – 4], параметры которых обусловлены связями [4 – 6]. Эти связи параметров ФОП имеют определенные зависимости по лопаткам компрессора и могут обеспечиваться на базе комплексного многосвязного технологического процесса напыления ФОП.

**Особенности синтеза комплексного многосвязного процесса напыления ФОП с реализацией принципа равенства ресурса лопаток всех ступеней и групп**

Комплексный многосвязный технологический процесс отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) групп лопаток компрессора представляет собой совокупность технологических процессов обработки отдельных ступеней лопаток каждой группы. При этом эти отдельные технологические процессы ОУО лопаток каждой группы связаны между собой. Причем структура и параметры технологии реализуются из условия равенства ресурса лопаток с ФОП.

На рис. 1 показаны особенности формирования структуры комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Можно отметить, что здесь, на базе этой схемы, комплексный многосвязный технологический процесс ОУО лопаток компрессора выполняется с использованием ФОП. Основные этапы реализации этого процесса следующие:

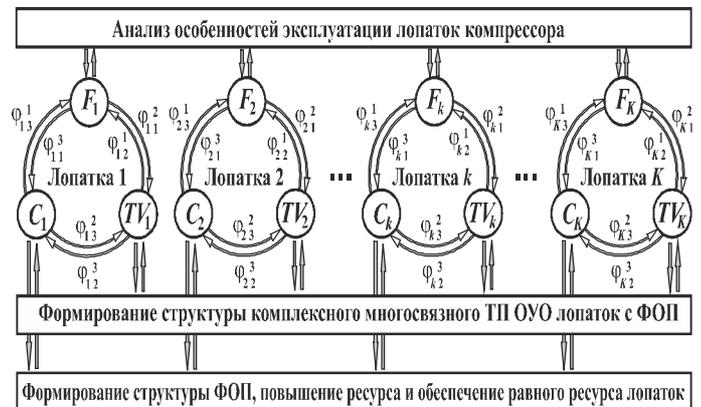
- анализ особенностей эксплуатации лопаток компрессора;
- формирование структуры ФОП, повышение ресурса и обеспечение равного ресурса лопаток;
- формирование структуры комплексного

многосвязного технологического процесса (ТП) ОУО лопаток с ФОП.

Отдельные структуры технологических процессов реализуются для множества лопаток, а именно: лопатка 1, лопатка 2, ..., лопатка  $k$ , ..., лопатка  $K$ . Эти структурные варианты процессов связаны между собой, и в целом, общая структура представляет собой комплексный многосвязный технологический процесс ОУО лопаток компрессора с ФОП.

Структура технологического процесса для каждой лопатки группы определяется на базе следующих параметров (см. рис. 1):

- анализа эксплуатационных функций ( $F_k$ );
- определения необходимых технологических воздействий ( $TV_k$ ), для обеспечения заданных свойств;
- реализации необходимых свойств ( $C_k$ ), реализуемых на базе ФОП.



**Рис. 1. Особенности формирования структуры комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП**

Между элементами формирования структуры (см. рис. 1) каждого технологического процесса ОУО лопаток компрессора действуют

прямые  $\varphi_{ki}^j$  и обратные  $\varphi_{kj}^i$  связи. В целом,

эта схема реализуется с использованием итерационно-рекуррентного подхода через анализ или формирование структуры.

Для решения вопросов синтеза комплексного связного технологического процесса ОУО необходимы схемы их синтеза для групп лопаток. На рис. 2. показана схема синтеза комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Эта схема формируется с использованием следующих этапов комплексного многосвязного технологического процесса:

- для всего комплексного многосвязного технологического процесса;
- для структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора любой группы (на рис. 2 представлено для 3-й группы) с ФОП;
- для структуры технологического процесса напыления ФОП лопатки любой ступени (на рис. 2 приведено для лопаток 3-й ступени).

Для всех групп лопаток этих уровней на

рис. 2 показано, что при синтезе процессов должны реализовываться связи параметров на всех трех уровнях, которые позволяют управлять процессом реализации ФОП, компенсирующих неоднородности эксплуатационных воздействий трех родов, а именно: 1-го, 2-го и 3-го рода.

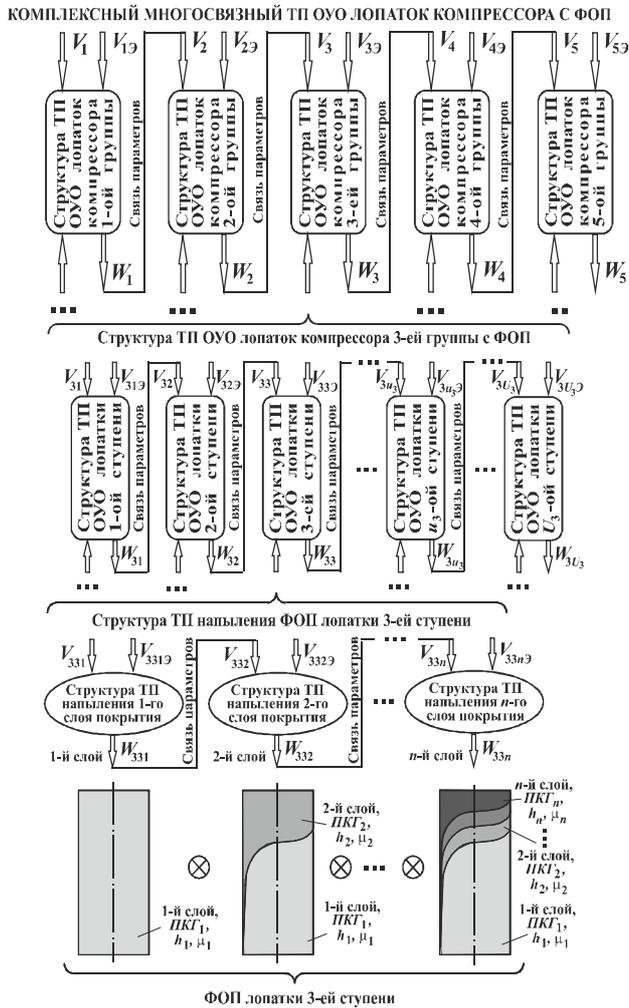


Рис. 2. Схема синтеза комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП

На рис. 2 комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП показано:  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  – начальные входные параметры для синтеза технологических процессов ОУО лопаток, соответственно для 5-ти групп;  $V_{1э}, V_{2э}, V_{3э}, V_{4э}, V_{5э}$  – эксплуатационные входные параметры для синтеза технологических процессов ОУО лопаток (пространственный контур границ слоев ФОП, интенсивность износа данного вида покрытия, количество слоев ФОП), соответственно для 5-ти групп;  $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5$  – выходные параметры результатов синтеза структуры технологических процессов ОУО лопаток, соответственно для 5-ти групп.

Структура технологического процесса ОУО лопаток компрессора на рис. 2 представлена

для 3-й группы с ФОП. Показано следующее: структуры ТП ОУО лопатки различных ступеней 3-й группы; между структурными вариантами технологических процессов приведены связи;  $V_{31}, V_{32}, V_{33}, \dots, V_{3u3}, \dots, V_{3U3}$  – начальные входные параметры для синтеза технологических процессов ОУО лопаток, соответственно для  $U_3$  ступеней;  $V_{31э}, V_{32э}, V_{33э}, \dots, V_{3u3э}, \dots, V_{3U3э}$  – эксплуатационные входные параметры для синтеза технологических процессов ОУО лопаток (пространственный контур границ слоев ФОП, интенсивность износа данного вида покрытия, количество слоев ФОП), соответственно для  $U_3$  ступеней;  $W_{31}, W_{32}, W_{33}, \dots, W_{3u3}, \dots, W_{3U3}$  – выходные параметры результатов синтеза структуры технологических процессов ОУО лопаток, соответственно для  $U_3$  ступеней.

При реализации технологического процесса формирования ФОП, например, для лопаток 3-й ступени, выполняется последовательное напыление  $n$  покрытий. В этом случае структура технологического процесса напыления ФОП лопатки 3-й ступени формируется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2. Показано:  $V_{331}, V_{332}, \dots, V_{33n}$  – начальные входные параметры напыления слоев ФОП, соответственно для  $n$  слоев покрытия;  $V_{331э}, V_{332э}, \dots, V_{33nэ}$  – эксплуатационные входные параметры для напыления слоев ФОП, соответственно для  $n$  слоев покрытия;  $W_{331}, W_{332}, \dots, W_{33n}$  – выходные параметры напыления слоев ФОП, соответственно для  $n$  слоев покрытия.

В процессе реализации ФОП выполняется композиция этого покрытия. При этом последовательно формируется многослойное покрытие со своим пространственным контуром границ (ПКГ<sub>i</sub>) каждого слоя, соответствующей толщине покрытия  $h_i$  и имеющим заданную интенсивность износа  $\mu_i$ , при действии эксплуатационных воздействий.

В нижней части рис. 2 показан процесс последовательной композиции ФОП, например, для лопатки 3-й ступени. Для лопаток других ступеней компрессора процесс синтеза структуры технологического процесса реализации ФОП строится аналогично.

Приведенные результаты являются исходными данными для синтеза структурных вариантов многосвязных процессов, и дают технологам возможность видеть взаимосвязи между отдельными составляющими комплексного многосвязного технологического процесса реализации ФОП, формируемых из условия равного ресурса групп лопаток компрессора, работающих в условиях действия неравномерностей эксплуатационных воздействий 3-х родов.

### Основные связи параметров ФОП для групп лопаток компрессора

Компрессор ГТД состоит из множества лопаток, которые выполняют в нем необходимые эксплуатационные функции. В целом структуру лопаток компрессора можно

представить следующим выражением:

$$Str_{ЛК} = \{X, A\}, \quad (1)$$

где  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_K\}$  – множество лопаток компрессора;  $K$  – мощность множества  $X$ ;  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_k, \dots, a_K\}$  – множество отношений, связей между лопатками или параметрами лопаток.

Компрессор ГТД структурирован из групп лопаток, к которым относятся следующие группы лопаток:

- поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА) (статор);
- поворотные лопатки направляющего аппарата (НА) (статор);
- лопатки направляющего аппарата (НА) (статор);
- лопатки выходного спрямляющего аппарата (ВСА) (статор);
- рабочие лопатки ротора.

Учитывая эти особенности, структуру групп лопаток компрессора можно представить следующим выражением:

$$Str_{ЛК} = Str_{ПЛВНА} \cup Str_{ПЛНА} \cup Str_{ЛНА} \cup Str_{ЛВСА} \cup Str_{ЛР} \quad (2)$$

где  $Str_{ПЛВНА}$  – структура группы поворотных лопаток входного направляющего аппарата;  $Str_{ПЛНА}$  – структура группы поворотных лопаток направляющего аппарата;  $Str_{ЛНА}$  – структура группы лопаток направляющего аппарата;  $Str_{ЛВСА}$  – структура группы лопаток входного спрямляющего аппарата;  $Str_{ЛР}$  – структура группы рабочих лопаток ротора.

В работе выполнены исследования по обеспечению равного ресурса лопаток с помощью ФОП. На основании этого составлено следующее выражение:

$$\sum_{s_1=1}^{S_1} \frac{h_{1s_1}}{\mu_{1s_1}} = \sum_{s_2=1}^{S_2} \frac{h_{2s_2}}{\mu_{2s_2}} = \sum_{s_3=1}^{S_3} \frac{h_{3s_3}}{\mu_{3s_3}} = \dots = \sum_{s_k=1}^{S_k} \frac{h_{ks_k}}{\mu_{ks_k}} = \dots = \sum_{s_K=1}^{S_K} \frac{h_{Ks_K}}{\mu_{Ks_K}}; \quad (3)$$

где  $h_{ks_k}$  – толщина  $s_k$ -го слоя ФОП  $k$ -й лопатки компрессора;  $\mu_{ks_k}$  – интенсивность абразивно-эрозионного износа  $s_k$ -го слоя ФОП  $k$ -й лопатки компрессора;  $S_k$  – количество слоев ФОП  $k$ -й лопатки компрессора;  $K$  – общее количество лопаток компрессора.

При нанесении ФОП толщина и интенсивность износа каждого слоя покрытия лопаток компрессора выполняется обычно одинаковой. С учетом этого, выражение (3) представим в следующем виде:

$$\frac{S_1 h_1}{\mu_1} = \frac{S_2 h_2}{\mu_2} = \frac{S_3 h_3}{\mu_3} = \dots = \frac{S_k h_k}{\mu_k} = \dots = \frac{S_K h_K}{\mu_K}, \quad (4)$$

где  $h_k$  и  $\mu_k$  – толщина и интенсивность износа одного любого слоя ФОП, соответственно.

На основании выражения (4) устанавлива-

ются связи между основными параметрами соседних лопаток групп или всех лопаток компрессора. В этом случае закономерности связей параметров ФОП определяются на основании следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{T_0 \mu_1}{S_1}; \\ h_2 &= \frac{S_1 h_1 \mu_2}{S_2 \mu_1}; \\ h_3 &= \frac{S_2 h_2 \mu_2}{S_3 \mu_1}; \\ &\dots; \\ h_k &= \frac{S_{(k-1)} h_{(k-1)} \mu_k}{S_k \mu_{(k-1)}}; \\ &\dots; \\ h_K &= \frac{S_{(K-1)} h_{(K-1)} \mu_K}{S_K \mu_{(K-1)}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

С помощью выражения (5) определяются связи параметров покрытий лопаток при нанесении многослойного ФОП с одинаковой толщиной слоев покрытия. При этом каждый слой ФОП формируется со своим специальным пространственным контуром границ (ПКГ).

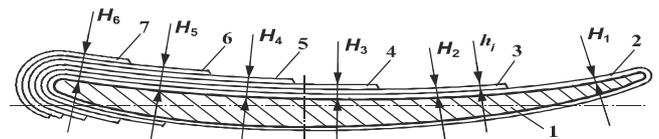


Рис. 3. Поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из 6-ти слоев постоянной толщины

На рис. 3 представлено поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из 6-ти слоев постоянной толщины [6]. Показано, что ФОП для лопатки формируется из слоев одинаковой толщины  $h_i$ . В этом случае за счет слоев, имеющих свой ПКГ, формируется ФОП переменной толщины  $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ , которое реализуется в зависимости от особенностей действия абразивно-эрозионного износа. Каждый слой данного покрытия имеет свой КГ, образованный с помощью специальных экранов.

Таким образом, представленные выражения (5) являются связями между параметрами ФОП, которые обеспечивают возможность последовательной реализации ФОП для лопаток компрессора из условия равенства ресурсов всех ступеней и групп лопаток компрессора. Эти выражения связывают отдельные технологические процессы реализации ФОП лопаток, являются начальными параметрами выполнения технологического процесса напыления покрытия, и в целом позволяют структурировать комплексный взаимосвязанный технологический процесс последовательного напыления покрытий на лопатки компрессора.

**Методика синтеза комплексного многосвязного технологического процесса напыления ФОП групп лопаток**

Методика синтеза комплексного отделочно-упрочняющего связного технологического процесса напыления ФОП групп лопаток имеет следующую последовательность:

1. Назначается значение гарантированного ресурса лопаток компрессора  $T_0$ , определяются начальные параметры технологического процесса (параметры лопаток, вид покрытий лопаток, предполагаемая структура технологического процесса, необходимость обеспечения равного ресурса лопаток и другие параметры).

2. Устанавливается структура лопаток в компрессоре ГТД, определяются виды лопаток компрессора, формируются группы лопаток. Например, в ГТД мод. ТВЗ-117 пять групп различных по виду лопаток, а именно: поворотные лопатки ВНА, поворотные лопатки НА, лопатки НА, лопатки ВСА, рабочие лопатки ротора.

3. Выполняется анализ особенностей действия эксплуатационных воздействий (абразивно-эрозионный износ) на каждую лопатку компрессора. В этом случае, для каждой лопатки компрессора определяются следующие параметры:

- интенсивность износа покрытия лопатки  $\mu_k$ ;
- особенности износа лопаток в группе, т.е. через равные промежутки времени устанавливается пространственный контур границ (ПКГ) износа лопатки.

Для каждой группы лопаток в компрессоре образуется свой ПКГ износа, при этом в пределах каждой группы лопаток ПКГ изменяется от лопатки к лопатке.

Данный анализ последовательно реализуется для всех групп лопаток компрессора.

4. В соответствии с выражениями (4) и (5), которые являются связями параметров покрытий лопаток группы, назначаются конкретные параметры покрытий лопаток для всей группы лопаток. Затем назначаются данные для следующей группы лопаток, потом для другой группы, и так далее, для лопаток последующих групп. Этот процесс реализуется до тех пор, пока все группы лопаток будут охвачены и определены для них все параметры связей между покрытиями.

5. В соответствии с рис. 4 формируется структура комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Этот многосвязный технологический процесс состоит из структур 1-й, 2-й, 3-й, 4-й, 5-й группы лопаток.

Представленные структуры (см. рис. 4) технологических процессов базируются на следующих особенностях:

- на связях параметров технологических процессов (5);
- на введении начальных условий технологических процессов и принципе равного ресурса лопаток компрессора;

– на наличии данных об особенностях эксплуатации лопаток компрессора.

На рис. 4 представлены следующие обозначения:  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  – входные параметры технологических процессов групп лопаток компрессора;  $V_{1H}, V_{2H}, V_{3H}, V_{4H}, V_{5H}$  – входные начальные параметры процессов групп;  $V_{1Э}, V_{2Э}, V_{3Э}, V_{4Э}, V_{5Э}$  – входные данные по особенностям эксплуатации лопаток компрессора;  $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5$  – выходные параметры технологических процессов групп лопаток компрессора.

6. В соответствии с рис. 5 формируется структура многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП для  $s$ -й группы, т.е. для любой группы. Данный многосвязный технологический процесс  $s$ -й группы состоит из следующих структур:

- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 1-й ступени;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 2-й ступени;
- .....;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора  $u_s$ -й ступени;
- .....;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора  $U_s$ -й ступени.



**Рис. 4. Структура комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП**

Представленные структуры (см. рис. 5) технологических процессов  $s$ -й группы базируются на следующих особенностях:

- на связях параметров технологических процессов (5);
- на введении начальных условий технологических процессов и принципе равного ресурса лопаток компрессора;
- на наличии данных об особенностях эксплуатации лопаток  $s$ -й группы.

На рис. 5 введены следующие обозначения:  $V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}, \dots, V_{sus}, \dots, V_{sUs}$  – входные параметры технологических процессов лопаток ступеней компрессора;  $V_{s1n}, V_{s2n}, V_{s3n}, \dots, V_{sun}, \dots, V_{sUn}$  – входные начальные параметры процессов лопаток ступеней компрессора;  $V_{s1Э}, V_{s2Э}, V_{s3Э}, \dots, V_{susЭ}, \dots, V_{sUsЭ}$  – входные данные по особенностям эксплуатации лопаток ступеней компрессора;  $W_{s1}, W_{s2}, W_{s3}, \dots, W_{su}, \dots, W_{sU}$  – выходные параметры технологических процессов лопаток ступеней компрессора.

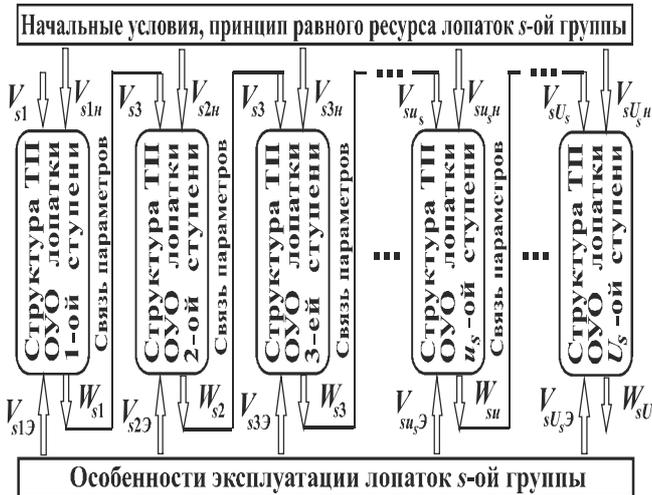


Рис. 5. Структура комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП s-й группы

7. Затем, в соответствии с рис. 6 формируется структура многосвязного технологического процесса напыления ФОП  $u_s$ -й ступени s-й группы лопаток компрессора. Данный многосвязный технологический процесс  $u_s$ -й ступени s-й группы лопаток компрессора состоит из следующих структур:

- структуры технологического процесса напыления 1-го слоя покрытия;
- .....
- структуры технологического процесса напыления n-го слоя покрытия

В этом случае представленные структуры (рис. 6) технологических процессов напыления ФОП  $u_s$ -й ступени s-й группы лопаток компрессора базируются на следующих особенностях:

- на связях параметров технологических процессов (5);
- на введении начальных условий технологических процессов и принципе равного ресурса лопаток компрессора;
- на наличии данных об особенностях эксплуатации лопаток  $u_s$ -й ступени s-й группы.

На рис. 6 даны следующие обозначения:  $V_{u1}, V_{u2}, \dots, V_{un}$  – входные параметры технологических процессов напыления слоев покрытий лопатки;  $V_{u1n}, V_{u2n}, \dots, V_{un}$  – входные начальные параметры процессов напыления

слоев покрытий лопатки компрессора;  $V_{u1Э}, V_{u2Э}, \dots, V_{unЭ}$  – входные данные по особенностям эксплуатации слоев покрытий лопатки;  $W_{u1}, W_{u2}, \dots, W_{un}$  – выходные параметры технологических процессов напыления слоев покрытий лопатки.

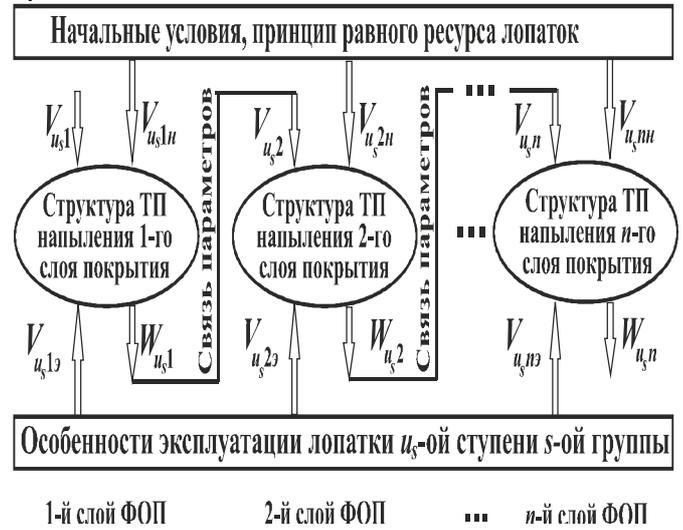


Рис. 6. Структура многосвязного технологического процесса напыления ФОП  $u_s$ -й ступени s-й группы

Таким образом, представленная методика синтеза комплексного отделочно-упрочняющего связанного технологического процесса позволяет вести разработку комплексного технологического процесса напыления ФОП для лопаток всех ступеней и групп. При этом с помощью этой методики выполняется последовательный синтез многослойного ФОП с необходимыми параметрами ПКГ каждого слоя покрытия.

### Синтез развернутой структуры многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток

Структура технологического процесса – это совокупность отдельных операций, которые связаны между собой определенными закономерностями и предназначены для обеспечения заданных параметров качества, функционально-ориентированных свойств, эффективности и других параметров процесса. Обеспечение требуемых свойств лопаток осуществляется многослойными ФОП, которые формируются из слоев, каждый из которых имеет определенные параметры, а именно: пространственный контур границ (ПКГ), физико-механические свойства, толщину, количество слоев. Все эти параметры определяются особенностями абразивно-эрозионного износа покрытия при эксплуатации на базе функционально-ориентированного подхода [1] и разработанного нового способа реализации ФОП [4 - 6]. В этом случае, для реализации каждого слоя ФОП строится свой конкретный технологический процесс, при этом для n слоев ФОП строится n отдельных технологических про-

цессов (рис. 7), связанных между собой установленными закономерностями (5). На основании этого, технологические процессы реализации ФОП в работе называются связными.

Синтез структуры технологического процесса – это соединение различных операций в единый процесс для выполнения заданных технологических воздействий орудий и средств обработки на изделии для обеспечения требуемых его свойств. В данном случае, в работе выполняется синтез многосвязного технологического процесса формирования ФОП лопаток компрессора ГТД.

На рис. 7 представлена развернутая структура многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора  $u_s$ -й ступени  $s$ -й группы лопаток компрессора. Структура этого многосвязного технологического процесса формируется  $n$  технологическими процессами реализации слоев ФОП. На рис. 7 введены следующие обозначения:

$(V_{u_{\infty i}} + V_{u_{in}})$  – входные параметры  $i$ -го процесса напыления  $i$ -го слоя ФОП, здесь,  $V_{u_{\infty i}}$  – входные эксплуатационные параметры,  $V_{u_{in}}$  – входные начальные параметры процесса;  $W_{u_{\infty i}}$  – выходные параметры  $i$ -го процесса напыления  $i$ -го слоя ФОП;  $a_{km}$  – направление перехода от операции  $k$  к операции  $m$ ; ПКГ $_i$  – пространственный контур границ  $i$ -го слоя ФОП;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя ФОП;  $\mu_i$  – интенсивность износа  $i$ -го слоя ФОП;  $n$  – количество структур технологических процессов напыления  $n$  слоев ФОП.

При этом структура 1-го технологического процесса для напыления 1-го слоя ФОП будет иметь следующие технологические операции:

1.1. Ультразвуковая очистка, обезжиривание, установка защитных экранов на лопатки для обеспечения заданных параметров ПКГ 1-го слоя покрытия.

1.2. Загрузка лопаток в вакуумную камеру. Для повышения производительности напыления покрытий необходимо применение специального приспособления с высокой концентрацией рабочих позиций.

1.3. Очистка лопаток компрессора в тлеющем разряде.

1.4. Насыщение поверхностного слоя лопаток газами. Для лопаток компрессора выполняется азотирование. (Эта операция необязательная и может не выполняться).

1.5. Ионная бомбардировка поверхностей лопаток. Выполняется для очистки поверхностей лопаток от загрязнений, окислов, нитридов и других пленок.

1.6. Прогрев лопаток.

1.7. Напыление связующего покрытия. Наносится перед напылением нитрид титанового покрытия.

1.8. Напыление 1-го слоя абразивно-эрозионного ФОП. В этом случае, выполняется напыление различных вариантов покрытия.

В данной работе выполняется напыление следующих покрытий: TiN, TiN<sub>2</sub>, (Ti, Al)N, (Ti, Zr) и другие варианты покрытий. Данный

слой покрытия имеет следующие параметры:

– ПКГ<sub>1</sub> – пространственный контур границ 1-го слоя покрытия, задается защитным экраном;

–  $h_1$  – толщина 1-го слоя покрытия, задается временем напыления в вакуумной камере установки;

–  $\mu_1$  – интенсивность износа 1-го слоя ФОП, задается применением того или иного варианта покрытия, определяется по результатам эксплуатационного износа покрытия в ГТД.

1.9. Охлаждение лопаток – в вакуумной камере установки ННВ6,6-И1; длительность охлаждения составляет 30...45 мин и зависит от степени концентрации лопаток в установке.

1.10. Разгрузка лопаток из вакуумной камеры.

1.11. Зачистка 1-го слоя покрытия глянцеванием. Эта операция выполняется перед напылением следующего слоя покрытия. При этом осуществляется очистка поверхности лопатки от загрязнений, пленок окислов, нитридов и других пленок.

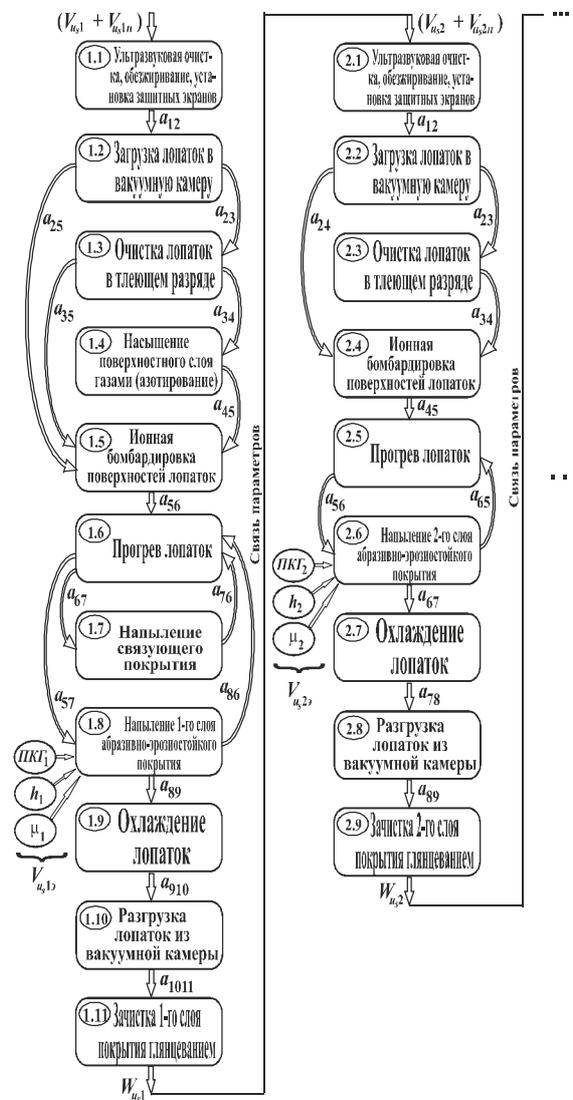


Рис. 7. Развернутая структура многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора  $u_s$ -й ступени  $s$ -й группы лопаток компрессора

Структура последующих технологических процессов имеет следующий алгоритм:

*i.1.* Ультразвуковая очистка, обезжиривание, установка защитных экранов на лопатки для обеспечения заданных параметров ПКГ *i*-го слоя покрытия.

*i.2.* Загрузка лопаток в вакуумную камеру. Для повышения производительности напыления покрытий необходимо применение специального приспособления с высокой концентрацией рабочих позиций.

*i.3.* Очитка лопаток компрессора в тлеющем разряде.

*i.4.* Ионная бомбардировка поверхностей лопаток. Выполняется для очистки поверхностей лопаток от загрязнений, окислов, нитридов и других пленок.

*i.5.* Прогрев лопаток.

*i.6.* Напыление *i*-го слоя абразивно-эрозионного ФОП. В этом случае, выполняется напыление различных вариантов покрытия. В данной работе выполняется напыление следующих покрытий: TiN, TiN<sub>2</sub>, (Ti, Al)N, (Ti, Zr)N, другие варианты покрытий. Здесь следует отметить, что данный слой покрытия имеет следующие параметры:

– ПКГ<sub>*i*</sub> – пространственный контур границ *i*-го слоя покрытия, задается защитным экраном;

– *h<sub>i</sub>* – толщина *i*-го слоя покрытия, задается временем напыления в вакуумной камере установки;

–  $\mu_i$  – интенсивность износа *i*-го слоя ФОП, задается применением того или иного варианта покрытия, определяется по результатам эксплуатационного износа покрытия в ГТД.

*i.7.* Охлаждение лопаток в вакуумной камере установки ННВ 6,6-И1, длительность охлаждения составляет 30...45 мин и зависит от степени концентрации лопаток в установке.

*i.8.* Разгрузка лопаток из вакуумной камеры.

*i.9.* Зачистка *i*-го слоя покрытия глянцеванием. Эта операция выполняется перед напылением следующего слоя покрытия. При этом осуществляется очистка поверхности лопатки от загрязнений, пленок окислов, нитридов и других пленок.

Следует отметить, что в отличие от 1-го технологического процесса напыления 1-го слоя ФОП в последующих процессах отсутствуют следующие операции: насыщение поверхностного слоя газами (азотирование); напыление связующего покрытия.

При этом в последнем технологическом процессе для напыления *n*-го слоя покрытия не нужно выполнять очистку поверхностей от окислов, нитридов и других пленок.

Для *n* слоев формируется *n* технологических процессов. Между технологическими процессами установлены связи на основании выражений системы (5).

Если напыляемые слои покрытий имеют одинаковую толщину, то общее количество слоев покрытия находится в функциональной зависимости от интенсивности износа лопатки

в группе и номера ступени лопатки, и определяется по следующей формуле:

$$n_i = \frac{T_0 \mu_i}{h_1}, \quad (6)$$

где *n<sub>i</sub>* – количество слоев покрытий на *i*-й лопатке;  $\mu_i$  – интенсивность износа покрытия на *i*-й лопатке; *h<sub>1</sub>* – толщина любого слоя покрытия, в этом случае принимается одинаковая толщина слоя покрытия; *T<sub>0</sub>* – назначенный ресурс ГТД.

В соответствии с выражением (5) можно определять параметры толщин покрытий и их количество для различных групп и ступеней лопаток компрессора.

Представленная структура многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора позволяет решать вопросы напыления многослойного ФОП в зависимости от следующих параметров: пространственного контура границ *i*-го слоя покрытия; толщины *i*-го слоя покрытия; интенсивности изнашивания *i*-го слоя ФОП; количества слоев покрытий. Приведенный алгоритм формирования многослойного покрытия позволяет обеспечивать ФОП для любой ступени группы лопаток компрессора ГТД с учетом связей (5).

### Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволяют вести структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с ФОП. Это обеспечивает повышение ресурса лопаток компрессора ГТД на основе обеспечения равного ресурса лопаток всех групп и применения ФОП посредством реализации комплексного многосвязного технологического процесса, параметры которого формируются за счет установленных связей (5). При этом проведенные исследования позволили:

1) выполнить анализ особенностей синтеза комплексного многосвязного процесса напыления ФОП с реализацией принципа равенства ресурса лопаток компрессора всех ступеней и групп, который позволил разработать схему синтеза этого процесса;

2) установить основные связи параметров ФОП для лопаток компрессора, которые являются исходными данными для проектирования комплексного многосвязного технологического процесса нанесения ФОП всех групп лопаток компрессора;

3) разработать методику синтеза комплексного многосвязного технологического процесса напыления ФОП групп лопаток, которая позволяет формировать конкретные структуры таких процессов.

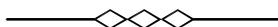
## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Михайлов, А.Н., Михайлов, В.А., Михайлов, Д.А. Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 3(81). – С. 32–41.
3. Михайлов, Д.А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2015. Вып. 4(50). – С. 126-131.
4. Михайлов, Д.А., Хандошко, А.В., Шейко, Е.А., Михайлов, А.Н. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2015. Вып. 4 (50). – С. 132 - 139.
5. Михайлов, Д.А., Пичко, А.П., Шейко, Е.А., Михайлов, А.Н. Методика и алгоритм синтеза технологического обеспечения комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора газотурбинной установки // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2019. Вып. 2 (65). – С. 16-25.
6. Пичко, А.П., Михайлов, Д.А., Михайлов, А.Н. Технологические особенности синтеза структуры процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2019. Вып. 4 (67). – С. 56 - 71.
7. Григорьев, В.А. Вертолетные газотурбинные двигатели / В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.

## REFERENCES

1. Mikhailov, A.N. *Synthesis Fundamentals of Function-oriented Technologies of Mechanical Engineering*. – Donetsk: DonNTU, 2009. – pp. 346.
2. Mikhailov, A.N., Mikhailov, V.A., Mikhailov, D.A. Structural reliability and methods for gas turbine engine life increase based on function-oriented properties support // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. –No.3 (81). – pp. 32-41.
3. Mikhailov, D.A. Basic peculiarities in GTE compressor blades operation and their operation functioning classification / *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems: Inter. Proceedings*. – Donetsk: DonNTU, 2015. Edition 4 (50). – pp. 126-131.
4. Mikhailov, D.A., Khandozhko, A.V., Sheiko, E.A. Mikhailov, A.N. General approach to assurance of function-oriented properties of GTE compressor blades based on principle of simultaneous complete wear of coating // *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems: Inter. Proceedings*. – Donetsk: DonNTU, 2015. Edition 4 (50). – pp. 132-139.
5. Mikhailov, D.A., Pichko, A.P., Sheiko, E.A., Mikhailov, A.N. Procedure and synthesis algorithm for technological support of complex life increase of turbo-compressor blades for gas turbine plant // *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems: Inter. Proceedings*. – Donetsk: DonNTU, 2019. Edition 2 (65). – pp. 16-25.
6. Pichko, A.P., Mikhailov, D.A., Mikhailov, A.N. Technological peculiarities in structure synthesis of finishing-strengthening of compressor blades and turbine with function-oriented coatings // *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems: Inter. Proceedings*. – Donetsk: DonNTU, 2019, Edition 4 (67). – pp. 56-71.
7. Grigoriev, V.A. Helicopter Gas Turbine Engines / V.A. Grigoriev, V.A. Zrelov, Yu.M. Ignatkin [et al.]. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 491.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандошко



Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"  
 Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
 ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»  
 Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru  
 Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.

Сдано в набор 15.01.2020. Выход в свет 31.01.2020.  
 Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.  
 Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии  
 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
 "Брянский государственный технический университет"  
 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16