

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

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

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В представленной работе разработано технологическое обеспечение для формирования геометрических параметров слоев многослойного функционально-ориентированного покрытия лопаток газотурбинного двигателя. Для решения этих вопросов в работе разработан ряд специальных методов формирования функционально-ориентированного покрытия лопаток. Разработан метод и алгоритм реализации пространственного контура границ каждого слоя данного покрытия. Многослойное функционально-ориентированное покрытие лопаток позволяет решать вопросы повышения ресурса авиационных газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, лопатка, свойства, функционально-ориентированное покрытие, многослойное покрытие, пространственный контур границ слоя.

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

## FEATURES OF FORMATION OF PARAMETERS OF MULTILAYER FUNCTIONALLY-ORIENTED COVERINGS OF BLADES OF GAS-TURBINE ENGINES

In the presented work, technological support was developed for the formation of the geometric parameters of the layers of a multilayer functionally oriented coating of the blades of a gas turbine engine. To address these issues, a number of special methods have been developed in the work for the formation of a functionally oriented coating of the blades. A method and algorithm for the implementation of the spatial contour of the boundaries of each layer of a given coating is developed. The multilayer functional-oriented coating of the blades allows solving the issues of increasing the resource of aviation gas turbine engines.

**Keywords:** gas turbine engine, blade, properties, functionally oriented coating, multilayer coating, spatial contour of the layer boundaries

### 1. Введение

В настоящее время для повышения ресурса лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) широко используют различные виды износостойких покрытий [1, 2]. Эти покрытия существенно повышают износостойкость лопаток компрессора и турбины в условиях действия абразивно-эрозионных, термических, физических, химических и других видов эксплуатационных воздействий [1, 3].

Для лопаток компрессора ГТД, где действует значительный абразивно-эрозионный износ при небольших температурных воздействиях среды, обычно применяют однослойные или многослойные износостойкие вакуумно-плазменные композиционные покрытия, образуемые посредством химических и плазмохимических процессов, называемые в мировой практике *PVD* (*Physical vapor deposition*). Для лопаток турбины и свободной турбины применяют специальные абразивостойкие, температуростойкие, температурозащитные и другие виды защитных многослойных покрытий, создаваемых на основе композиции различных материалов.

Следует отметить, что на все виды лопаток ГТД обычно наносятся покрытия,

как однослойные, так и многослойные, одинаковой толщины [1, 3]. При этом в процессе эксплуатации ГТД на лопатки, группы лопаток и подсистемы лопаток (компрессор, турбина) действуют неравномерные эксплуатационные воздействия. Это обусловлено особенностями формы лопатки, ее расположением в подсистеме, кинематикой движения, особенностями движения воздушно-абразивного потока по тракту двигателя и другими процессами. Возникающие неравномерные воздействия приводят к неодинаковому износу зон поверхностей лопаток, лопаток в группах и лопаток в компрессоре и турбине, что приводит к преждевременному выходу их из строя, снижению уровня ремонтпригодности лопаток и снижению технико-экономических показателей ГТД [4, 5, 6].

В работах [4, 5, 6] предложено для выравнивания неравномерного и неодинакового износа лопаток ГТД, а именно поверхностей лопаток, лопаток в группах и групп лопаток относительно друг друга, применять многослойные функционально-ориентированные покрытия (ФОП). Многослойное ФОП это специальное покрытие, которое позволяет исключить неравномерность износа пера лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга. Это повышает ресурс ГТД, ремонтпригодность лопаток и технико-экономические показатели эксплуатации авиационного двигателя.

Можно отметить, что для реализации ФОП лопаток ГТД разработан ряд технологий [3, 4] и способов формирования ФОП [4, 6, 7, 8]. Однако вопрос формирования пространственного контура границ (ПКГ) каждого слоя многослойных ФОП остается недостаточно изученным в этих работах. Поэтому в данной работе будут более детально рассмотрены вопросы формирования многослойного ФОП лопаток с учетом особенностей износа лопатки, формирования технологического обеспечения с заданным ПКГ элементов и вариантов их реализации.

Целью данной работы является создание технологического обеспечения для реализации геометрических параметров слоев многослойного ФОП лопаток ГТД на основе анализа особенностей износа покрытий при эксплуатации лопаток, разработки методики и алгоритма реализации ПКГ слоев покрытий путем синтеза способов формирования этих покрытий.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи:

- выполнить анализ особенностей формирования ПКГ износа покрытий лопаток и ПКГ слоев многослойного ФОП;
- разработать алгоритм реализации технологического процесса формирования многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя;
- предложить методику определения геометрических параметров ПКГ многослойного ФОП лопаток.

Эти задачи решаются в данной работе.

## **2. Особенности формирования ПКГ слоев многослойного ФОП лопаток**

При реализации многослойного ФОП возникает необходимость формирования ПКГ каждого слоя. Этот вопрос может решаться двумя способами:

1. Посредством использования специального способа нанесения рельефного покрытия, предложенного в работе [7].
2. За счет применения специального алгоритма и экранов, с помощью которых формируется многослойное ФОП и ПКГ каждого слоя [8].

Можно отметить, что вопрос формирования многослойного ФОП за счет применения специального алгоритма и экранов [8] рассмотрен более детально в работе [6].

Поэтому далее, рассмотрим вопрос реализации ПКГ ФОП на основе разработанного второго способа нанесения рельефного покрытия, предложенного в работе [7].

Этот способ нанесения нитрида титанового покрытия с ПКГ выполняется посредством размещения на поверхности пера лопатки компрессора трафарета, который изготавливается таким образом, что при его установке на перо лопатки, элементы трафарета располагаются там, где необходимо наносить покрытие, при этом на свободную от элементов трафарета часть поверхности пера лопатки наносят сажевую маску, например, методом копчения, потом трафарет снимают и выполняют нанесение нитрида титанового покрытия на всю свободную поверхность пера лопатки и поверхность сажевой маски, после чего удаляют нитрид титановое покрытие с поверхности сажевой маски вместе с сажей. Таким образом, применяя этот способ можно реализовать 1-й слой ФОП с заданным своим 1-м ПКГ слоя, затем - 2-й слой ФОП с заданным 2-м ПКГ слоя, и так далее, пока не будет реализован  $n$ -й слой ФОП с заданным  $n$ -м ПКГ слоя.

Технологический процесс формирования ФОП пера лопатки с применением разработанного способа реализации ПКГ каждого слоя покрытия выполняется в три этапа (рисунок 1) [7]:

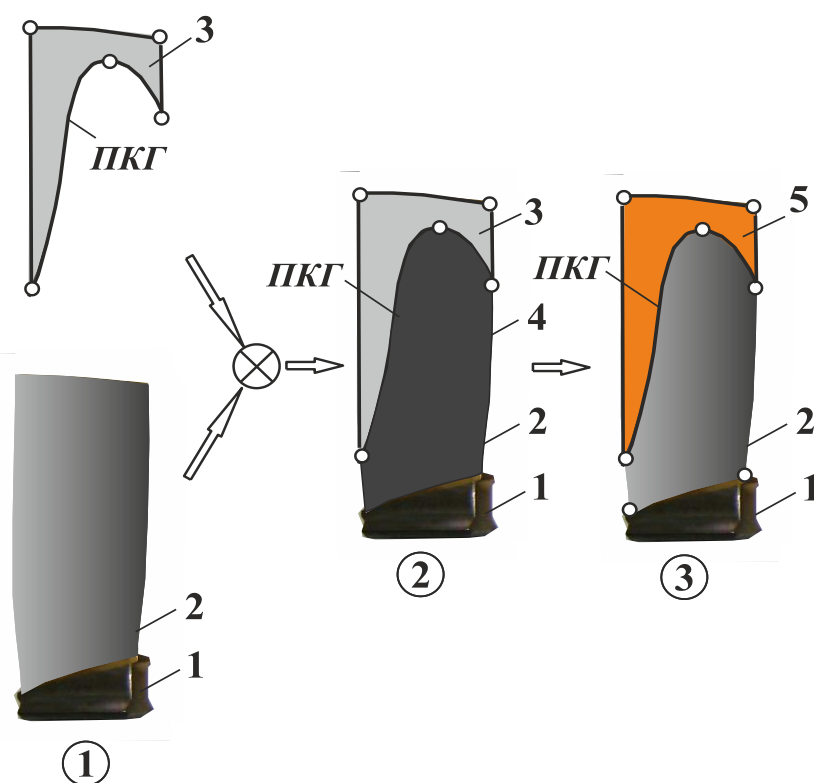


Рисунок 1. Схема формирования одного слоя ФОП с ПКГ

Далее, циклы нанесения слоев ФОП повторяются до полного формирования ФОП с  $n$  слоями.

Можно отметить, что нитрид титановое покрытие легко удаляется с поверхности пера лопатки в зонах, где имеется сажевая маска - посредством зачищающего полирования (глянцевания). При этом в зонах, где нет сажевой маски, нитрид титановое по-

- на первом этапе осуществляется изготовление специального трафарета с необходимым ПКГ его элементов и устанавливается на лопатку компрессора;

- на втором этапе выполняется нанесение сажевой маски на поверхность пера лопатки - свободной от трафарета, при этом сажевая маска с помощью трафарета образуется с заданным ПКГ;

- на третьем этапе производится напыление слоя покрытия на перо лопатки, включая зоны сажевой маски, затем выполняется удаление покрытия, расположенного над сажевой маской, посредством зачищающего полирования, что обеспечивает заданный ПКГ данного слоя покрытия.

крытие остается благодаря наличию диффузионных процессов его с основным материалом пера лопатки и частичной реализации имплантационных процессов.

Также следует отметить, что согласно предлагаемому способу, для выполнения сажевой маски на перо лопатки с заданным ПКГ применяются специальные трафареты из тонкой алюминиевой фольги. Это позволяет образовывать сажевую маску на поверхности пера лопатки с заданным ПКГ. Указанный процесс повторяется  $n$  раз до нанесения  $n$  слоев ФОП.

На рисунке 1 представлена схема формирования одного слоя ФОП с ПКГ. Здесь обозначены следующие позиции: 1 – лопатка компрессора, 2 – перо лопатки, 3 – трафарет из алюминиевой фольги, 4 – сажевая маска, 5 – нитрид титановое покрытие. При реализации данного способа формирования ПКГ каждого слоя нитрид титанового ФОП на перо лопатки компрессора, например из титанового сплава ВТ-8м, трафарет с ПКГ изготавливается из тонкой алюминиевой фольги. При этом для каждого слоя покрытия используется свой конкретный трафарет со своим ПКГ. Сажевая маска на поверхность пера лопатки наносится, например, методом копчения с помощью масляной фитильной горелки. Для каждого слоя нитрид титанового покрытия изготавливается трафарет со своим специальным ПКГ (рисунок 1).

В этом случае, на первом этапе процесса (рисунок 1), для каждого слоя ФОП, осуществляется изготовление специального трафарета 3 с необходимым ПКГ его элементов и выполняется установка его на перо 2 лопатки компрессора 1. На втором этапе, выполняется нанесение сажевой маски 4 на поверхность пера 2 лопатки 1, свободной от трафарета 3. Сажевая маска 4 реализуется посредством масляной фитильной горелки. При этом за счет трафарета 3, сажевая маска 4 образует необходимый ПКГ сажи на поверхности пера 2 лопатки 1. В этом случае, сажевая маска 4 необходима для образования ПКГ слоя покрытия, реализуемого на третьем этапе и предотвращения диффузионных процессов покрытия с основным материалом пера 2 лопатки 1.

Далее, на третьем этапе процесса, производится напыление слоя покрытия 5 на перо 2 лопатки 1, включая зоны сажевой маски 4, затем выполняется удаление покрытия, расположенного над сажевой маской, посредством зачищающего полирования, что обеспечивает реализацию заданного ПКГ данного слоя покрытия 5.

После реализации трех этапов по напылению первого слоя ФОП, выполняется процесс повторения всех этапов для процесса напыления второго слоя ФОП, затем – третьего слоя ФОП, и так далее, пока не будут реализованы все слои ФОП лопатки компрессора (рисунок 1). Для каждого слоя покрытия 5 пера 2 лопатки 1 трафарет 3 имеет свой ПКГ элементов.

Можно отметить, что для каждой лопатки группы количество слоев ФОП и их толщина определяются гарантированным ресурсом ГТД и интенсивностью износа лопатки в каждой ступени и группе лопаток.

### **3. Алгоритм реализации технологического процесса формирования многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя.**

На рисунке 2 представлен алгоритм реализации технологического процесса формирования ФОП с ПКГ каждого слоя. Можно отметить, что этот алгоритм реализуется в следующей последовательности:

1. Задаются исходные данные технологического процесса реализации ФОП лопатки компрессора.
2. Задается параметр  $i = 1$ , который обозначает первый слой ФОП.

3. Выполняется первый этап технологического процесса.
4. Реализуется второй этап технологического процесса.
5. Выполняется третий этап технологического процесса.
6. Назначается значение слоя покрытия  $i = i + 1$ , то есть добавляется следующий слой покрытия.
7. Выполняется проверка, а именно если  $i < n$  идет возврат к процедуре первого этапа технологического процесса.
8. Если  $i = n$ , данный процесс завершается, так как все слои ФОП сформированы и переходит к этапу *END*.

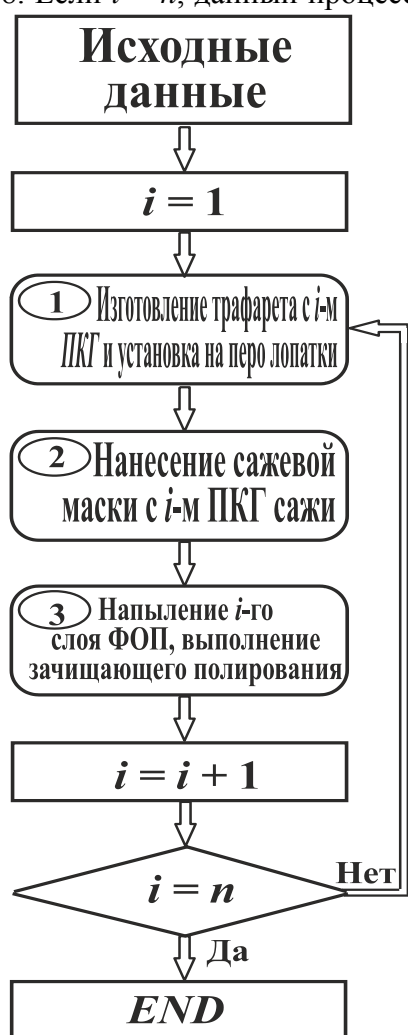


Рисунок 2. Алгоритм реализации технологического процесса формирования ФОП с ПКГ каждого слоя

По предлагаемому способу [7] экспериментально установлено, что только сажевая маска не выгорает при температурах нанесения нитрид титанового покрытия на лопатки компрессора. При этом через сажу не проходят потоки ионов нитрид титана до основного материала пера лопатки, что позволяет высокопроизводительными методами выполнять ПКГ каждого слоя ФОП.

А также реализация данного способа позволяет с помощью сажевых масок обеспечивать сложный ПКГ покрытия лопаток компрессора с помощью трафаретов, даже в единичном и мелкосерийном производстве ФОП. Таким образом, предлагаемый способ позволяет повысить производительность напыления нитрид титанового ФОП на лопатки компрессора и расширить технологические возможности этого процесса.

В заключении можно отметить, что разработанный способ [7] реализации ПКГ каждого слоя для ФОП позволяет обеспечивать сложный пространственный контур каждого слоя покрытия, состоящего из  $n$  покрытий. А также этот способ расширяет технологические возможности реализации ФОП лопаток компрессора и является вторым способом формирования этого покрытия.

#### 4. Методика определения геометрических параметров ПКГ многослойного ФОП лопаток

Для реализации предлагаемых способов формирования ФОП лопаток компрессора [7, 8] на первом этапе, при определении ПКГ, который изменяется в процессе эксплуатации лопаток с покрытием, необходимо определять геометрические параметры ПКГ для реализации специальных экранов [7] или трафаретов [8] с заданными параметрами ПКГ.

Можно отметить, что в процессе износа покрытия лопатки компрессора происходит износ покрытия равной толщины, при этом ПКГ покрытия со временем изменяется. Для определения особенностей изменения ПКГ в процессе абразивно-эрозионного износа лопатки при эксплуатации компрессора ГТД, выполняется, через равные промежутки времени, фотографирование особенностей износа лопатки компрессора с покрытием.

На рисунке 3 в качестве примера представлены лопатки компрессора со схемами ПКГ износа покрытия. Здесь показано: рисунок 3, а – общий вид рабочей лопатки с тремя ПКГ; рисунок 3, б – схема рабочей лопатки с пятью ПКГ; рисунок 3, в – общий вид лопатки направляющего аппарата (НА) статора с ПКГ.

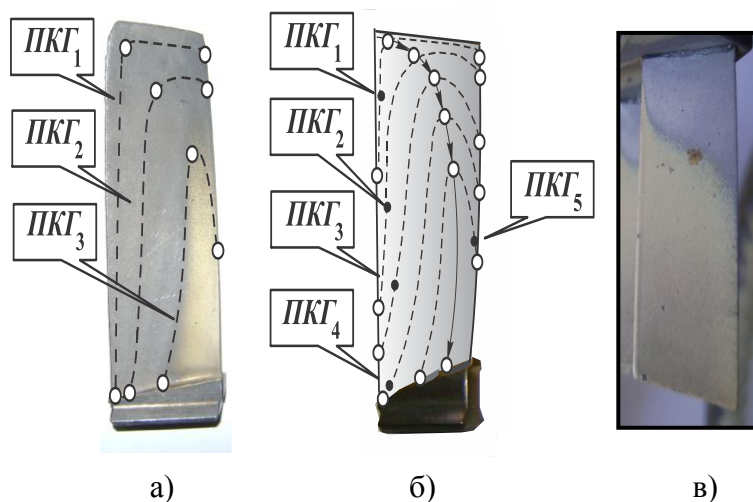


Рисунок 3. Лопатки компрессора со схемами ПКГ износа покрытия: а – общий вид рабочей лопатки с тремя ПКГ (5-я группа лопаток); б – схема рабочей лопатки с пятью ПКГ (5-я группа лопаток); в – общий вид лопатки НА статора с ПКГ (3-я группа лопаток)

Значение величины равных промежутков времени определяется на основании следующего выражения:

$$T_i = \frac{T_o}{n}, \quad (1)$$

где  $T_i$  – значение величины равного промежутка времени наблюдения за износом покрытия лопатки компрессора;  $T_o$  – гарантированный ресурс лопаток компрессора;  $n$  – количество слоев ФОП.

Далее, в программе CorelDraw строится усредненная кривая линия ПКГ износа и определяются ее координаты. На рисунке 3 приведены

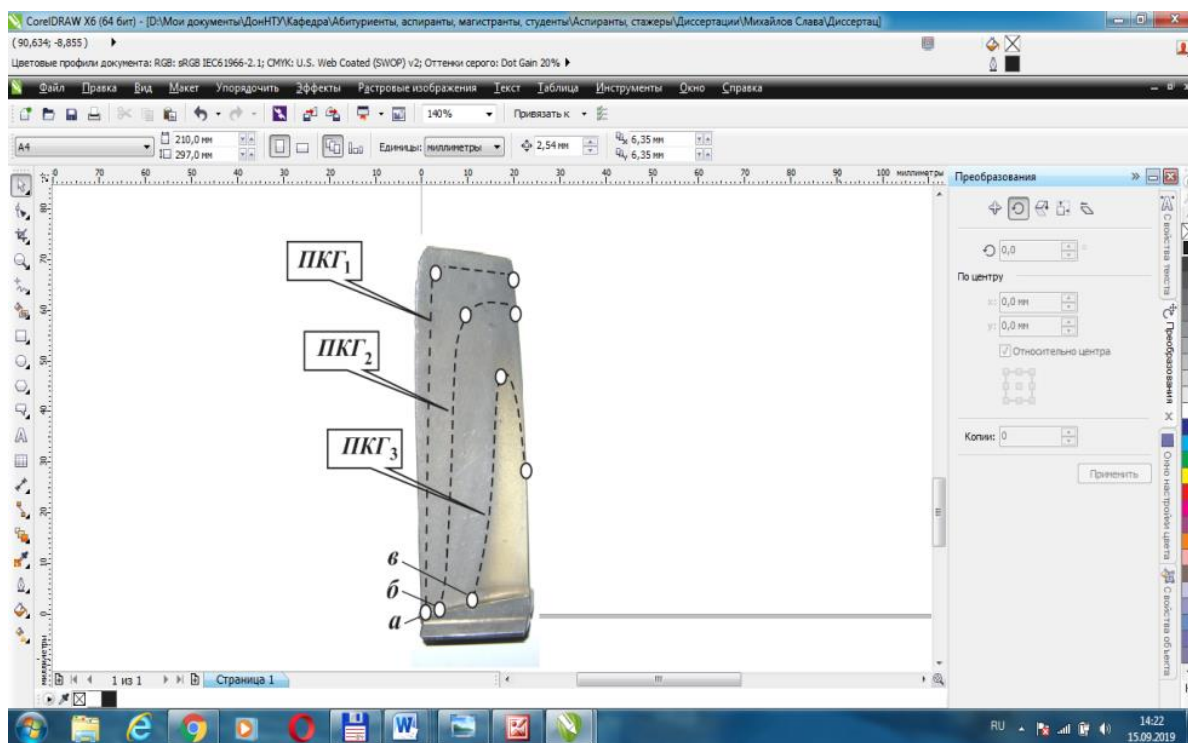


Рисунок 4. Общий вид рабочей лопатки компрессора с ПКГ износа покрытия в окне программы CorelDraw Graphics Suite X6 в процессе определения его координат

примеры наложения ПКГ по износу покрытия на поверхности пера лопатки.

Для решения этих задач в данной работе разработана методика определения геометрических параметров ПКГ покрытия групп лопаток компрессора. Эта методика включает выполнение следующих этапов исследований:

1. Через равные промежутки времени, определяемыми по выражению (1), выполняется фотографирование особенностей износа опытного покрытия лопаток компрессора.

2. Выполняется установка полученной фотографии с особенностями износа опытного покрытия лопатки компрессора - на экран монитора в программе CorelDraw Graphics Suite X6. Реальные размеры лопатки на фотографии приводятся в соответствие со значениями линейки окна монитора.

3. По характеру износа покрытия на пера лопатки в программе CorelDraw Graphics Suite X6 строится усредненная кривая линии ПКГ (рисунок 4).

4. Фотография лопатки с кривой первого  $ПКГ_1$  передвигается на экране монитора таким образом, что она точкой  $a$  устанавливается на листе монитора в начало системы координат, имеющими параметры  $x = 0, y = 0$ .

5. Крестик курсора последовательно ориентируется по точкам кривой линии  $ПКГ_1$  через равные участки по оси  $x$ , и в верхнем левом углу экрана определяется значение координаты  $y$  (рисунок 4). Полученные данные значений координат ПКГ записываются в таблицы.

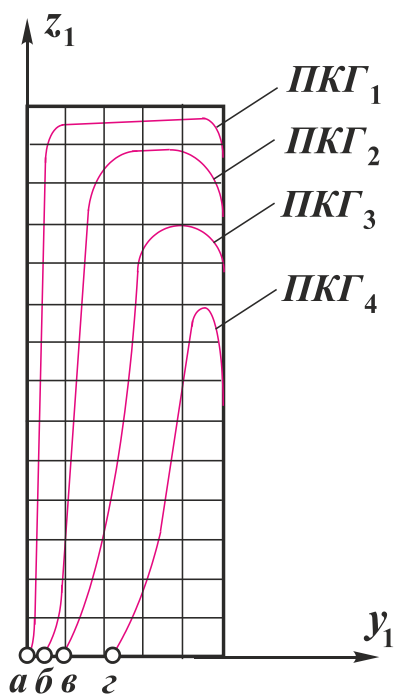


Рисунок 5. ПКГ абразивно-эрозионного износа однослойного покрытия пера рабочей лопатки компрессора ГТД

6. Далее, продолжается эксплуатация ГТД, и через период, определяемый по формуле (1), производится фотографирование пера лопатки с изношенным покрытием. При этом все позиции данной методики повторяются и определяются координаты  $ПКГ_2$ , затем –  $ПКГ_3$ , и так далее до определения всех  $ПКГ_n$ .

На основании полученных данных координат ПКГ обеспечивает возможность реализации следующего:

1. Изготовления комплекта защитных экранов с ПКГ для реализации разработанного способа формирования многослойных ФОП [7] пера лопатки компрессора.

2. Изготовление трафаретов для реализации сажевых масок и формирования ФОП [8] пера лопатки компрессора.

На рисунке 5 показаны пространственные контуры границ (ПКГ) абразивно-эрозионного износа пера рабочей лопатки компрессора ГТД модели ТВ3-117 рабочей лопатки 1-ой ступени. Здесь, схематично показаны 4-е замера ПКГ через равные промежутки времени. Значение времени замеров определялись на основании выражения (1). Для данных лопаток  $T_i = 1500$  час. При этом количество измерений и число слоев ФОП составляет  $n = 4$ .

В процессе измерения координат ПКГ, сначала выполняется измерение параметров  $ПКГ_1$  первого контура (рисунок 5) лопатки компрессора, затем –  $ПКГ_2$  второго контура, и так далее, пока все контуры не будут скоор-

динированы в соответствии с предлагаемой методикой. Результаты измерений координат ПКГ износа пера лопатки компрессора заносятся в таблицы.

В таблице 1 представлены геометрические параметры 1-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти ФОП в системе координат  $y_1, O, z_1$ . Эти параметры определялись по лопаткам компрессора ГТД серии ТВ3-117, представленных ОАО «Луганский авиаремонтный завод».

Таблица 1. Геометрические параметры 1-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат  $y_1, O, z_1$

Номер группы лопаток	Номер ступени лопаток	Номер ПКГ	Номер точки ПКГ	$y_1$	$z_1$	Номер точки ПКГ	$y_1$	$z_1$
5	1	1	1	0	0	16	63,0	2,334
			2	0,5	0,349	17	65,0	2,532
			3	1,0	0,482	18	66,0	2,995
			4	1,5	0,614	19	67,0	3,591
			5	2,0	0,680	20	67,5	4,054
			6	2,5	0,813	21	67,545	4,913
			7	3,0	0,879	22	67,611	8,0
			8	3,5	0,945	23	67,809	11,0
			9	4,0	1,010	24	67,876	14,0
			10	5,0	1,011	25	68,206	20,0
			11	10,0	1,077	26	68,272	22,839
			12	20,0	1,342	27	68,0	23,765
			13	40,0	1,805	28	67,0	24,559
			14	50,0	1,937	29	66,0	24,956
			15	60,0	2,201	30	64,0	25,0

После определения координат 1-го ПКГ<sub>1</sub> износа покрытия пера лопатки выполняется процесс определения координат 2-го ПКГ<sub>2</sub>. Результаты замеров заносятся в таблицу 2.

Можно отметить, что процесс определения геометрических параметров 2-го ПКГ<sub>2</sub> износа покрытия пера лопатки, а также последующих ПКГ, выполняется аналогично измерениям для 1-го ПКГ<sub>1</sub>. В этом случае, производится фотографирование особенностей износа опытного покрытия ПКГ пера лопатки (рисунок 5), выполняется установка полученной фотографии на экран монитора в программе CorelDraw Graphics Suite X6, производится необходимое ориентирование фотографии в соответствии с разработанной методикой и затем, производится определение параметров ПКГ.

В таблице 2 представлены геометрические параметры 2-го ПКГ рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат  $y_1, O, z_1$ .



Таблица 2. Геометрические параметры 2-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат  $y_1, O, z_1$ 

Номер группы лопаток	Номер ступени лопаток	Номер ПКГ	Номер точки ПКГ	$y_1$	$z_1$	Номер точки ПКГ	$y_1$	$z_1$
5	1	2	1	0	2,069	10	7,824	56,565
			2	1,002	2,598	11	8,816	60,0
			3	1,928	3,0	12	10,536	62,5
			4	3,855	4,508	13	13,643	64,105
			5	4,252	6,955	14	18,345	64,370
			6	4,583	10,0	15	21,119	63,642
			7	5,310	20,0	16	23,368	61,856
			8	6,832	40,0	17	24,559	59,872
			9	7,361	50,0	18	25,0	56,829

Далее, после определения координат 2-го  $ПКГ_2$  износа покрытия пера лопатки выполняется процесс определения координат 3-го  $ПКГ_3$ . Результаты замеров заносятся в таблицу 3.

В таблице 3 представлены геометрические параметры 3-го ПКГ рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат  $y_1, O, z_1$ .

Аналогично определяются параметры координат 4-го  $ПКГ_4$  износа покрытия пера лопатки. Результаты замеров заносятся в таблицу 4.

В таблице 4 представлены геометрические параметры 4-го ПКГ рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат  $y_1, O, z_1$ .

Для 5-го слоя ФОП ПКГ не определяется, так как он реализуется без экрана.

Таблица 3. Геометрические параметры 3-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат  $y_1, O, z_1$ 

Номер группы лопаток	Номер ступени лопаток	Номер ПКГ	Номер точки ПКГ	$y_1$	$z_1$	Номер точки ПКГ	$y_1$	$z_1$
5	1	3	1	4,434	0	7	14,025	45,0
			2	6,815	5,0	8	14,356	49,0
			3	9,858	15,0	9	17,877	53,0
			4	11,710	25,0	10	20,0	54,663
			5	13,165	35,0	11	23,484	53,340
			6	13,636	40,0	12	25,0	49,768

Таблица 4. Геометрические параметры 4-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти ФОП в системе координат  $y_1, O, z_1$ 

Номер группы лопаток	Номер ступени лопаток	Номер ПКГ	Номер точки ПКГ	$y_1$	$z_1$	Номер точки ПКГ	$y_1$	$z_1$
5	1	4	1	11,049	0	7	21,566	43,088
			2	13,929	13,0	8	22,293	44,014
			3	17,002	15,0	9	22,889	44,146
			4	18,788	25,0	10	24,079	42,889
			5	20,177	35,0	11	24,939	39,846
			6	21,301	42,029	12	25,0	36,605

Таким образом, предлагаемая методика позволяет формировать координаты ПКГ для технологического обеспечения синтеза многослойного ФОП лопаток ГТД на базе специальных экранов или трафаретов, предлагаемых в работах [7, 8].

### 5. Заключение

В заключении можно отметить, что выполненные исследования направлены на создание технологического обеспечения для формирования геометрических параметров слоев многослойного ФОП лопаток ГТД. Эти исследования проведены на основе анализа особенностей износа покрытия, возникающего при эксплуатации лопатки, разработки методики и алгоритма реализации ПКГ слоев многослойного покрытия. Они позволили разработать ряд специальных способов формирования ФОП на уровне изобретений.

Проведенные исследования позволяют формировать многослойное ФОП лопаток ГТД в зависимости от действующих эксплуатационных функций (например, абразивно-эрозионного износа) и необходимых параметров ПКГ каждого слоя. На основании выполненных исследований в данной работе решено следующее:

- выполнен анализ особенностей формирования ПКГ износа однослойного опытного покрытия лопатки и особенностей формирования ПКГ слоев многослойного ФОП;
- разработан алгоритм реализации технологического процесса формирования многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя;
- предложена методика определения геометрических параметров ПКГ многослойного ФОП лопаток.

ФОП лопаток адаптирует их работу к особенностям действия неравномерного износа лопатки и их групп в ГТД, что значительно повышает ресурс авиационного двигателя [5, 6].

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. 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.
2. Авиинформ // Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2020. – Вып. № 2 (191). – 140 с.
3. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4 (50). – С. 126–131.
4. Михайлов, В. А. Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – 18 с.
5. 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 // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1 (103). – С. 40-48. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>.
6. 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.
7. Патент № 54100 Украина, А МПК 7 С23С 14/04. Спосіб нанесення нітридного декоративного рельєфного покриття на поверхню виробу / В. О. Михайлов. – № 2002053915; заявл 14.05.2002, БИ 3003. – 6 с.
8. 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 и [др.]. – № 2018107164; заявл. 26.02.2018; Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.

Поступила в редколлегию 22.04.2020 г.