

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

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе выполнен анализ особенностей эксплуатации лопаток газотурбинного двигателя. При этом установлено, что элементы лопатки изнашиваются неравномерно и это значительно снижает их ресурс. Предложен общий подход обеспечения свойств лопаток на базе многослойных функционально-ориентированных покрытий. Эти покрытия позволяют решать вопросы повышения ресурса лопаток, их ремонтпригодности и многократного восстановления. В статье разработан технологический метод реализации многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток. А также предложено необходимое технологическое обеспечение для формирования функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: лопатка, газотурбинный двигатель, свойства, функционально-ориентированное покрытие, структурирование многослойного покрытия, технологический метод.

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

FEATURES OF STRUCTURING MULTI-LAYERED FUNCTIONALLY-ORIENTED COVERINGS OF BLADES OF GAS-TURBINE ENGINES

The paper analyzes the operating characteristics of the blades of a gas turbine engine. It was found that the elements of the blade wear unevenly and this significantly reduces their resource. A general approach to ensuring the properties of blades based on multilayer functionally oriented coatings is proposed. These coatings allow you to solve the problems of increasing the resource of the blades, their maintainability and repeated restoration. The article developed a technological method for the implementation of multilayer functionally oriented coating of blades. And also the necessary technological support is proposed for the formation of functionally oriented coatings of gas turbine engine blades.

Keywords: blade, gas turbine engine, properties, functionally oriented coating, multilayer coating structuring, technological method.

1. Введение

Лопатки газотурбинного двигателя (ГТД) являются одними из основных элементов авиационных двигателей [1, 2, 3]. С помощью лопаток различного назначения и элементной базы ГТД обеспечивается заданный термодинамический цикл работы авиационного двигателя, и выполняются необходимые его эксплуатационные функции. При этом следует отметить, что ГТД структурируется из множества лопаток, составляющих определенные группы (компрессор, турбина), которые обычно включают несколько тысяч лопаток различного назначения. Вместе с тем, лопатки ГТД это дорогостоящие элементы авиационного двигателя, обусловленные сложными и очень трудоемкими технологическими процессами их изготовления [3, 4, 5].

Если проанализировать особенности эксплуатации лопаток ГТД, то можно отметить, что они работают в сложных эксплуатационных условиях [1, 2, 6]. Это обусловлено целым комплексом их конструктивных и эксплуатационных параметров. Можно

отметить, что одной из главных особенностей эксплуатации лопаток является то, что на каждую лопатку, лопатки группы и между различными группами лопаток действуют по тракту ГТД неравномерные эксплуатационные функции, а именно, абразивно-эрозионный износ, температурные, химические, физические, солевые и другие воздействия. Эти воздействия приводят к неравномерному износу элементов лопаток, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга в ГТД. Это значительно снижает их ресурс, ремонтпригодность и возможность восстановления лопаток ГТД.

Для повышения ресурса лопаток ГТД применяют различные виды покрытий, в том числе и вакуумные ионно-плазменные [3]. Эти покрытия позволяют значительно повысить ресурс лопаток, однако исключить неравномерность их износа не удается из-за сложных особенностей эксплуатации лопаток. При этом износ и быстрое разрушение лопатки происходит из-за местных износов пера, который обычно начинается на входной и периферийной кромке. В этом случае, происходит быстрое разрушение основного материала пера лопатки, что ведет к значительному снижению ресурса и ремонтпригодности лопатки в целом.

Для повышения ресурса лопаток компрессора в условиях действия неравномерного их износа целесообразно обеспечить для элементов пера лопатки функционально-ориентированных свойств (ФОС) [7]. При этом ФОС целесообразно реализовывать для элементов пера каждой лопатки, для лопаток каждой группы и лопаток составляющих группы [8, 9]. ФОС лопаток ГТД повышают ресурс лопаток, их ремонтпригодность и восстанавливаемость за счет адаптации их свойств к особенностям действия неравномерного износа рабочих поверхностей пера лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга.

В данной работе обеспечение ФОС лопаток ГТД выполняется на базе многослойных функционально-ориентированных покрытий (ФОП). Применение ФОП лопаток позволяет до заданного момента времени, например, назначенного ресурса ГТД, исключить износ основного тела пера лопатки в условиях действия неравномерного износа лопатки в процессе ее эксплуатации. В представленной работе ФОП реализованы на базе многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий [8, 9], имеющих специальный пространственный контур границ (ПКГ) каждого слоя. Для выполнения этих покрытий в работе разработан специальный метод их реализации [8] и необходимое технологическое обеспечение [8, 10].

Целью данной работы является обеспечение ФОС лопаток ГТД на основе многослойных ФОП, характеризуемых специальным ПКГ каждого слоя, его толщиной и количеством слоев, параметры которых определяются особенностями эксплуатации лопатки. При этом ФОП обеспечивают повышение ресурса лопаток ГТД в условиях действия переменных эксплуатационных воздействий по элементам пера каждой лопатки, по лопаткам в группе и между группами лопаток. Для формирования ФОП лопаток ГТД в работе разрабатывается технологический метод и связанный технологический процесс реализации специальных покрытий.

В соответствии с поставленной целью в данной работе предполагается решение следующих задач:

- выполнить анализ особенностей эксплуатации лопаток ГТД;
- предложить общий подход обеспечения ФОС лопаток ГТД на базе многослойных ФОП;
- разработать технологический метод реализации многослойных ФОП лопаток ГТД;

- выполнить анализ технологического обеспечения реализации ФОП лопаток ГТД.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Анализ особенностей эксплуатации лопаток ГТД.

Выполненные исследования особенностей лопаток ГТД позволили установить, что процесс их эксплуатации и износа имеет определенные особенности, а именно, рабочая поверхность каждой лопатки, каждой группы лопаток и групп лопаток изнашиваются неравномерно. Это обусловлено комплексом особенностей ГТД:

- пространственной формой лопатки и ее расположением в ГТД;
- кинематикой структурой и параметрами движений лопатки;

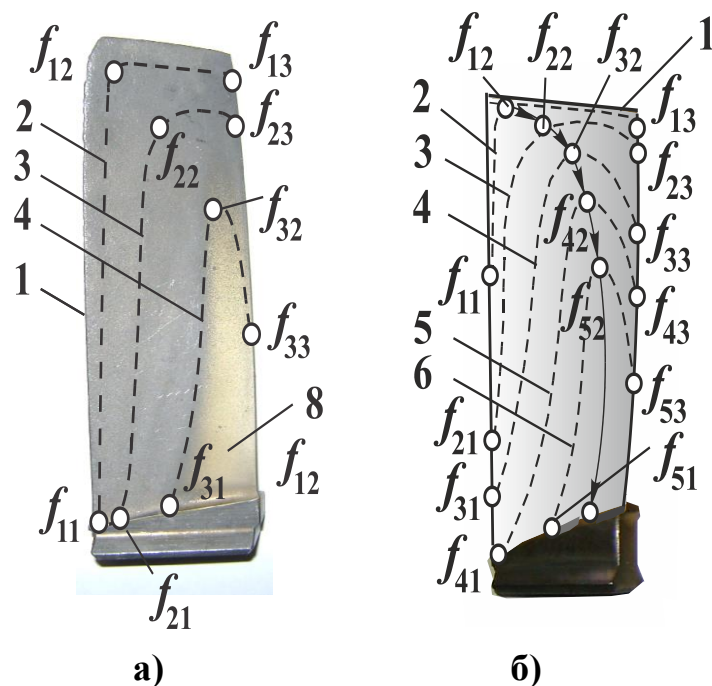


Рисунок 1. Особенности абразивно-эрозионного износа покрытия рабочих лопаток компрессора, координируемых ПКГ износа: а – износ координируется 3-мя ПКГ; б – износ координируется 5-ю ПКГ

износа покрытия рабочих лопаток компрессора. На рисунке 1 буквами показаны ПКГ износа покрытия, например: f_{11}, f_{12}, f_{13} – 1-й ПКГ износа покрытия лопатки компрессора и так далее (рисунок 1, а). Цифры обозначают следующее: 1 – рабочая лопатка компрессора, 2, 3, 4, 5, 6 – ПКГ износа лопаток.

Следует отметить, что для других групп лопаток компрессора ГТД абразивно-эрозионный износ лопаток имеет свои отличительные особенности. На рисунке 2 представлен ПКГ износа покрытия лопатки направляющего аппарата (НА) статора компрессора ГТД модели ТВ3-117.

Проведенные исследования особенностей изнашивания лопаток ГТД, а именно компрессора и турбины, имеют свои определенные особенности, которые характеризуются возникновением ПКГ. Этот ПКГ имеет свои определенные особенности.

- пространственной формой и особенностями газовой воздушного тракта ГТД;
- параметрами термогазодинамического потока ГТД;
- составом абразивно-эрозионной среды потока;
- физическими, химическими и другими составляющими потока среды в ГТД.

На рисунке 1 представлены основные особенности абразивно-эрозионного износа покрытия рабочих лопаток компрессора [6, 7], координируемых пространственным контуром границ (ПКГ) износа. Здесь показано следующее: рисунок 1, а – износ координируется 3-мя ПКГ; рисунок 1, б – износ координируется 5-ю ПКГ. Выполняя анализ особенностей износа покрытия пера лопатки, можно отметить, что износ покрытия характеризуется формированием ПКГ



Рисунок 2. ПКГ износа покрытия лопатки НА статора компрессора

В работе параметры ПКГ определялись через равные промежутки времени. Для определения параметров ПКГ лопатки на нее наносилось опытное нитрид титановое покрытие равной толщины. Измерение геометрических параметров ПКГ изнашиваемого покрытия выполнялись через равные промежутки времени. Количество этих промежутков времени определяются в соответствии со следующим выражением:

$$n = \frac{T_0}{t_i}; \quad (1)$$

где n – количество равных промежутков времени, которое соответствует числу слоев многослойного ФОП;

T_0 – длительность гарантированного ресурса ГТД;

t_i – задаваемый промежуток времени определения ПКГ.

Геометрические параметры ПКГ в данной работе выполнялись в соответствии с методикой, разработанной в работе [8]. При этом количество равных промежутков времени замеров определяется в соответствии с заданным числом слоев многослойного ФОП, реализуемых равной толщины в соответствии с толщиной опытного покрытия.

3. Общий подход обеспечения ФОС лопаток ГТД на базе многослойных ФОП.

ФОП лопатки ГТД это специальное многослойное покрытие, в котором каждый слой покрытия имеет свой ПКГ и заданную его толщину, а также число его слоев находится в соответствии с особенностями эксплуатации опытного однослойного покрытия лопатки в ГТД. При этом физико-механические свойства ФОП и опытного покрытия лопаток должны иметь одинаковые параметры. Можно отметить, что ФОП ГТД обеспечивает следующее [9]:

- по сравнению с применением традиционных покрытий лопаток ГТД - ФОП обеспечивает повышение ресурса лопаток, их ремонтпригодности и увеличения числа восстановления лопаток;

- единовременный износ всех слоев ФОП лопаток в заданный момент времени - без разрушения основного материала пера лопатки лопаток в условиях неравномерного действия эксплуатационных воздействий по элементам пера лопатки, что позволяет решать вопросы управления ресурсом лопаток;

- обеспечивать равный, кратный или функционально-зависимый ресурс групп лопаток в условиях неравномерного действия эксплуатационных воздействий по тракту ГТД;

- обеспечивается возможность управлять ресурсом лопаток и ФОП в зависимости от величины назначенного ресурса лопаток ГТД;

- обеспечивают адаптацию лопатки к особенностям ее эксплуатации в зависимости от действия переменных эксплуатационных функций на перо лопатки, на лопатки группы и лопатки групп.

Следует отметить, что в ГТД лопатки сгруппированы в определенные группы [8]. При этом переменные эксплуатационные функции действуют следующим образом:

- на элементы пера каждой лопатки (рис. 1, рис. 2);

- на лопатки каждой группы;

- на лопатки между группами, например, лопатки ротора и лопатки статора, лопатки компрессора и лопатки турбины и тому подобное.

Общий подход обеспечения ФОС лопаток заключается в следующем:

1. В обеспечении ФОС лопатки на базе многослойного ФОП из условия единовременного износа всех слоев пера каждой лопатки в период назначенного ресурса ГТД.

2. В обеспечении ФОС лопаток каждой группы на базе многослойных ФОП из условия единовременного износа ФОП всех лопаток группы в период назначенного ресурса ГТД.

3. В обеспечении ФОС групп лопаток на базе многослойных ФОП из условия единовременного износа ФОП на лопатках всех групп в период назначенного ресурса ГТД.

Предлагаемый общий подход в реализации ФОП позволяет исключать изнашивание основного материала пера лопатки в период назначенного ресурса ГТД. При этом обеспечивается одинаковый ресурс всех лопаток ГТД, что позволяет решать вопросы повышения ресурса, ремонтпригодности лопаток и увеличения числа восстановлений их работоспособности.

Основные и управляемые параметры ФОП лопаток являются следующие:

- ПКГ каждого слоя покрытия,
- толщина покрытия каждого слоя покрытия:
- количество слоев покрытия,
- физико-механические свойства покрытия каждого слоя.

Можно отметить, что ФОП лопаток компрессора реализуются на базе следующих принципов выполнения функционально-ориентированных технологий [6]:

1. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе изделия, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств в этом функциональном элементе лопатки (обеспечение ФОС ФОП).

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента лопатки, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зонального элемента реализации технологических воздействий на лопатку и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств лопатки (обеспечение заданных геометрических параметров ПКГ каждого слоя).

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах лопатки (обеспечение заданного количества слоев многослойного ФОП).

Рассмотрим более детально приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств ФОП.

Можно отметить, что на основании первого принципа обеспечивается функциональное соответствие особенностей действия элементарной эксплуатационной функции (например, абразивно-эрозионный износ) на перо лопатки, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств. Этот принцип отвечает на вопрос: какое технологическое воздействие или свойство изделия нужно выполнить или обеспечить в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции? То есть он обеспечивает заданное свойство пера лопатки. Поэтому

первый принцип ориентации технологических воздействий и ФОС ФОП в соответствии с действующей функцией можно математически представить следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} : F &\rightarrow TB ; \\ \varphi_{12} : TB &\rightarrow C ; \\ \varphi_{13} : C &\rightarrow F , \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где φ_{11} - отображение (преобразование) эксплуатационной функции F покрытия лопатки в технологические воздействия TB ;

φ_{12} - отображение (преобразование) технологических воздействий TB в свойства C покрытия лопатки;

φ_{13} - отображение (преобразование) свойств C в технологические воздействия TB .

Следует иметь в виду, что представленная система отображений (2) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

Также можно отметить, что соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, первый принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие параметров ориентации технологических воздействий и свойств. Например, равный или кратный равному ресурсу покрытия.

На базе второго принципа реализуется выполнение топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента лопатки (ПКГ), в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам элемента реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на лопатку и геометрических параметров ПКГ элемента обеспечения необходимых свойств за счет заданной технологии. Этот принцип, в полной мере, дает ответы на вопросы: куда нужно наносить покрытие, его каждый слой, и какие геометрические параметры ПКГ каждого слоя необходимо обеспечивать. А также, куда необходимо реализовывать технологические воздействия и где обеспечивать необходимые свойства изделия? То есть, какие параметры ПКГ каждого слоя ФОП лопатки необходимо обеспечивать и где располагать этот слой покрытия. При этом второй принцип ориентации можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} : G(F) &\rightarrow G(TB) ; \\ \varphi_{22} : G(TB) &\rightarrow G(C) ; \\ \varphi_{23} : G(C) &\rightarrow G(F) , \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где φ_{21} - отображение (преобразование) геометрических параметров ПКГ зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ лопатки в геометрические параметры ПКГ зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$;

φ_{22} - отображение (преобразование) геометрических параметров ПКГ зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$ в геометрические параметры ПКГ зоны обеспечения свойств $G(C)$ лопатки;

φ_{23} - отображение (преобразование) геометрических параметров ПКГ зоны обеспечения свойств $G(C)$ в геометрические параметры ПКГ зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ лопатки.

Здесь также следует иметь в виду, что представленная система отображений (3) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

А также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, второй принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие геометрических параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

Третий принцип ориентации обеспечивает количественное соответствие множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах лопатки. Этот принцип дает ответ на вопрос: сколько видов, типов или вариантов технологических воздействий (слоев многослойного ФОП) нужно реализовать на изделие (лопатку) в процессе его изготовления и при этом обеспечить множество свойств? Третий принцип ориентации технологических воздействий и свойств ФОП лопатки в зависимости от действующих эксплуатационных функций можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{31} : M(F) &\rightarrow M(TB); \\ \varphi_{32} : M(TB) &\rightarrow M(C); \\ \varphi_{33} : M(C) &\rightarrow M(F), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где φ_{31} - отображение (преобразование) множества зон действия эксплуатационной функции $M(F)$ лопатки в множество зон реализации технологических воздействий $M(TB)$;

φ_{32} - отображение (преобразование) множества зон реализации технологических воздействий $M(TB)$ в множество зон обеспечения свойств $M(C)$ лопатки;

φ_{33} - отображение (преобразование) множества зон обеспечения свойств $M(C)$ в множество зон действия эксплуатационной функции $M(F)$ лопатки.

В этом случае также следует иметь в виду, что представленная система отображений (3) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

При этом также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, третий принцип может обеспечивать полное или частичное количественное соответствие множеств параметров ориентации технологических воздействий и свойств, а именно количество слоев ФОП.

Приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств изделий дают технологам ключ для научно обоснованного обеспечения заданного, требу-

емого или предельного потенциала возможностей лопаток с ФОП при эксплуатации в ГТД.

Таким образом, приведенные принципы дают возможность решать вопросы полной ориентации технологических воздействий и свойств ФОП при реализации функционально-ориентированных технологий в зависимости от особенностей эксплуатации лопаток компрессора.

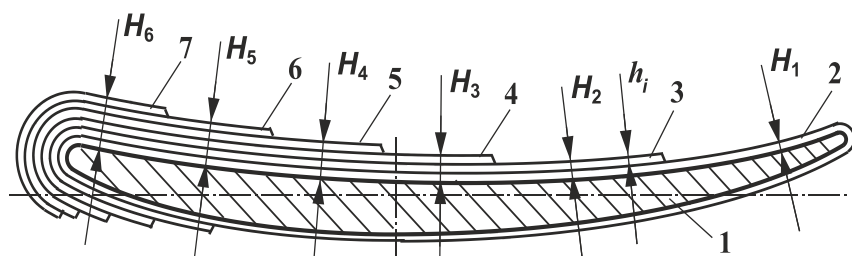


Рисунок 3. Поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из 6-ти слоев постоянной толщины

На рисунке 3 представлено поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из 6-ти слоев постоянной толщины [7, 8]. Здесь 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. А также на рисунке 3 показаны следующие позиции: 1 – поперечное сечение пера лопатки, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – слои нитрид титанового покрытия одинаковой толщины h_i . Каждый слой данного покрытия имеет свой ПКГ, образованный с помощью специальных экранов.

В качестве примера на рисунке 4 показан общий вид лопатки 1-й ступени компрессора с последовательно напыленным четырехслойным ФОП (нитрид титановое по-

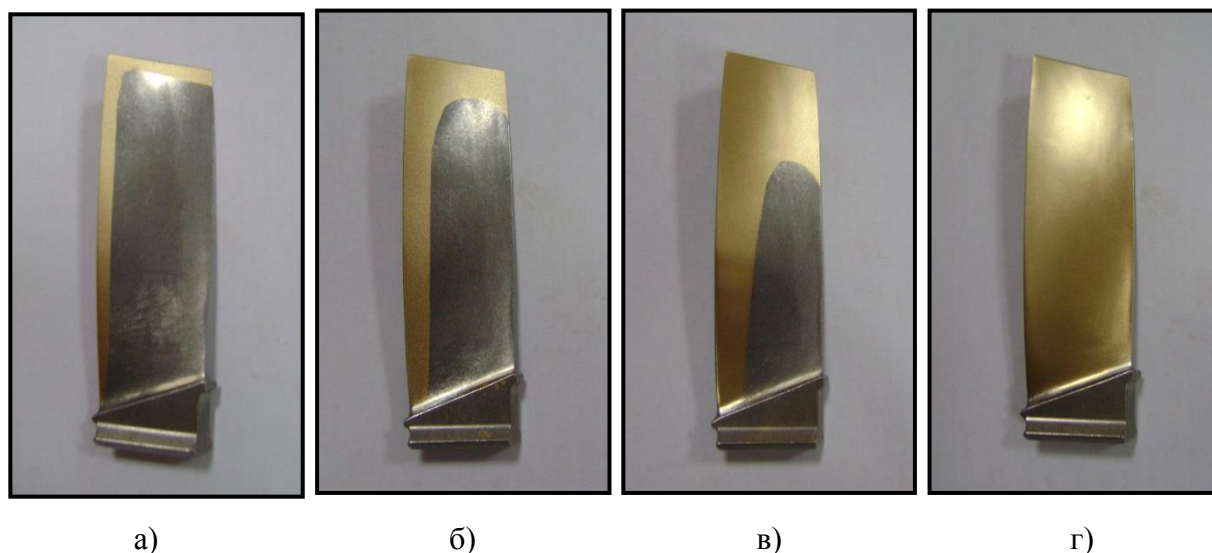


Рисунок 4. Общий вид лопатки 1-й ступени компрессора с последовательно напыленным четырехслойным ФОП (нитрид титановое): а – с одним слоем, б – с двумя слоями, в – с тремя слоями, г – с четырьмя слоями

крытие). Здесь представлено: на рисунке 4а показана лопатка с одним слоем покрытия;

на рисунке 4б – с двумя слоями покрытий; на рисунке 4в – с тремя слоями покрытий; на рисунке 4г – с четырьмя слоями покрытий.

При напылении четырехслойного ФОП их параметры определялись в соответствии с разработанным технологическим методом реализации ФОП лопаток. При этом каждый раз перед напылением покрытия выполнялись операции полирования и ультразвуковой очистки поверхностей лопаток компрессора.

4. Технологический метод реализации многослойных ФОП лопаток ГТД.

Технологический процесс напыления ФОП лопаток компрессора выполняется путем последовательного нанесения отдельных слоев покрытия (рисунок 3), каждый из которых имеет заданный ПКГ, толщину и физико-механические свойства, обеспечивающие необходимую интенсивность износа покрытия. При этом формируется такое покрытие, которое на завершающем моменте гарантированного ресурса лопатки компрессора полностью изнашивается. Причем повышение ресурса и его регулировку для группы лопаток ступени и групп лопаток относительно друг друга из условия равенства ресурса всех лопаток компрессора можно выполнять за счет изменения толщины каждого слоя ФОП. В этом случае, на заключительном этапе гарантированного ресурса покрытия лопаток, оно полностью изнашивается с поверхности пера лопатки, а основной материал пера лопатки в зонах предельного действия износа - не изнашивается. Это сохраняет лопатку в целом и позволяет многократно ее восстанавливать за счет многократного напыления ФОП [7, 8].

Разработанный технологический метод формирования ФОП базируется на процессе нанесения покрытия постоянной толщины (рисунок 3) на перо лопатки при помощи зонального защитного экрана. В этом случае, покрытие формируется многослойным переменной толщины из слоев постоянной толщины с различными топографическими параметрами ПКГ каждого слоя, которые наносятся с использованием нескольких зональных защитных экранов, пространственный контур границ каждого, из которых определяется по результатам абразивно-эрозионного износа однослойного опытного покрытия постоянной толщины на лопатке в условиях эксплуатации, при котором топографические параметры ПКГ не износившейся части опытного покрытия на поверхности пера лопатки последовательно отображаются через равные промежутки времени на различные зональные защитные экраны и реализуются на каждом из них свои ПКГ за весь период ресурса опытного покрытия, причем в процессе нанесения каждого слоя покрытия зональные защитные экраны с отображенными ПКГ устанавливаются на лопатку в обратной последовательности относительно последовательности измерений топографических параметров отображений ПКГ износа опытного покрытия, а толщина каждого наносимого слоя многослойного покрытия определяется толщиной опытного покрытия, при этом первый слой покрытия наносится без зонального защитного экрана.

А также в соответствии предлагаемым технологическим методом, толщина любого наносимого слоя многослойного покрытия (рисунок 3) может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения длительности промежутка времени между измерениями топографических параметров отображений ПКГ износа опытного покрытия на зональные защитные экраны.

При этом толщина любого наносимого слоя многослойного покрытия (рис. 4) может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения параметров его стойкости [7, 8].

Кроме того, в процессе нанесения многослойного покрытия (рис. 5), зональные защитные экраны устанавливаются на лопатку в соответствии с последовательностью

измерений топографических параметров отображений ПКГ износа опытного покрытия, в этом случае последний слой покрытия наносится без зонального защитного экрана [7, 8].

Процесс нанесения ФОП выполняется в три этапа.

Сначала, на первом этапе (рисунок 5), предварительно производится испытание в условиях эксплуатации газотурбинного двигателя опытного однослойного покрытия 8 постоянной толщины на пера лопатки 1, имеющего физико-механические свойства и свою толщину h_i , одинаковые с наносимым ФОП каждого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7. При этом выполняются замеры топографических параметров ПКГ 9, 10, 11, 12, 13 не износившейся части опытного покрытия на поверхности пера лопатки, которые показаны на рисунке 5 точками $f_{11} f_{12} f_{13}$, $f_{21} f_{22} f_{23}$, $f_{31} f_{32} f_{33}$, $f_{41} f_{42} f_{43}$, $f_{51} f_{52} f_{53}$, через равные промежутки времени за весь период ресурса этого покрытия при эксплуатации газотурбинного двигателя заданной модели [7, 8].

Затем, на втором этапе (рисунок 5), выполняется отображение топографических параметров ПКГ износа 9, 10, 11, 12, 13 на различные зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18, соответственно. При этом реализуются на каждом из них свои ПКГ $t_{11} t_{12} t_{13}$, $t_{21} t_{22} t_{23}$, $t_{31} t_{32} t_{33}$, $t_{41} t_{42} t_{43}$, $t_{51} t_{52} t_{53}$, за весь период ресурса опытного покрытия 8 [7, 8].

Далее, на третьем этапе (рис. 5), выполняется последовательный процесс нанесения каждого слоя покрытий. При этом первое покрытие 19 на пера лопатки наносится без зонального защитного экрана, а покрытия 20, 21, 22, 23, 24 выполняются с зональными защитными экранами, на которых отображены ПКГ. В этом случае, зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18, устанавливаются на лопатку 1 в обратной последовательности относительно последовательности измерений топографических параметров отображений ПКГ износа 9, 10, 11, 12, 13 опытного покрытия, а толщина каждого наносимого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7 многослойного покрытия определяется толщиной опытного покрытия 8. Поэтому на пера лопатки 1 получают многослойное ФОП переменной толщины из слоев постоянной толщины 2, 3, 4, 5, 6, 7 (рис. 5) с различными топографическими параметрами ПКГ каждого слоя, а именно $a b c d$ (1-й слой), $a b c s_{23} s_{22} s_{21} a$, (2-й слой), $s_{31} b c s_{33} s_{32} s_{31}$ (3-й слой), $s_{41} b c s_{43} s_{42} s_{41}$ (4-й слой), $s_{51} b c s_{53} s_{52} s_{51}$ (5-й слой), $s_{61} b c s_{63} s_{62} s_{61}$ (6-й слой), зависящими от особенностей эксплуатации лопатки в ГТД [7, 8].

В процессе нанесения покрытия, толщина h_i (рис. 3) любого наносимого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7 многослойного покрытия может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения длительности промежутка времени между измерениями топографических параметров отображений 9, 10, 11, 12, 13 ПКГ износа опытного покрытия 8 на зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18 [7, 8].

А также, толщина h_i (рис. 3) любого наносимого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7 многослойного покрытия может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения параметров его стойкости, например, в зависимости от изменения параметров микротвердости [7, 8].

Кроме того, в процессе нанесения многослойного покрытия, зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18 (рис.5) устанавливаются на лопатку 1 в соответствии с последовательностью измерений топографических параметров отображений ПКГ износа опытного покрытия 8, в этом случае последний слой покрытия наносится без зонального защитного экрана [7, 8].

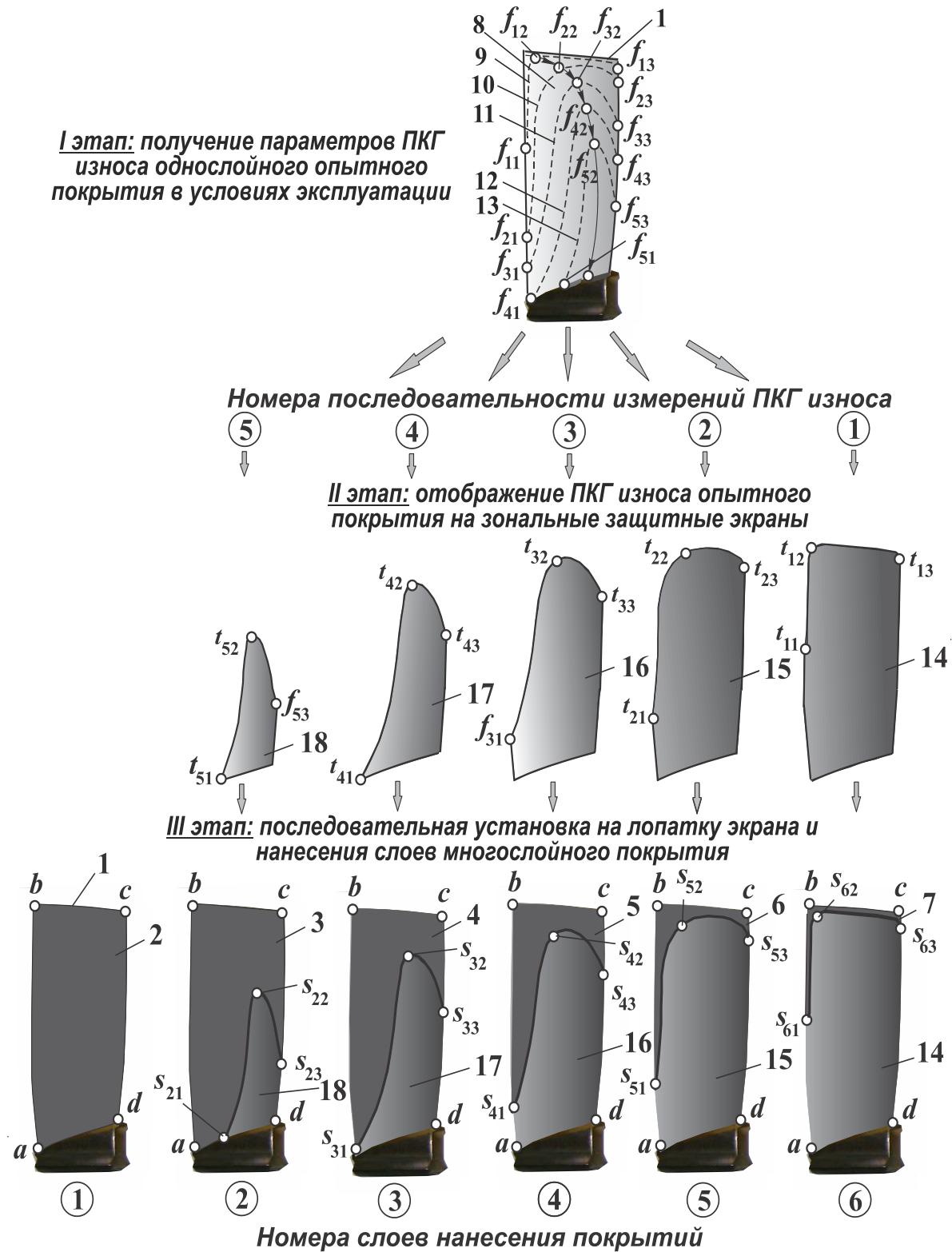


Рисунок 5. Основные этапы выполнения способа реализации многослойного ФОП рабочих лопаток компрессора

Многослойное ФОП лопатки ГТД, работающей в условиях действия неравномерного абразивно-эрозионного износа, полностью исключает разрушение тела пера лопатки в период эксплуатации, повышает общий ресурс, межремонтный ресурс лопатки и количество восстановлений лопатки посредством этих покрытий при ремонтах. Кроме того, ФОП лопатки имеет способность полностью разрушаться в заданный период времени, что исключает процесс его удаления в процессе ремонта лопатки с последующим нанесением нового покрытия [7, 8].

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать технологический метод напыления многослойного ФОП лопаток компрессора в структуре связанного технологического процесса обработки групп лопаток. Этот метод позволяет напылять ФОП, которое обеспечивает возможность повышения ресурса и ремонтпригодности каждой лопатки за счет реализации принципа единовременного износа покрытия в период гарантированного ресурса лопаток компрессора, а также выравнивания ресурса лопаток в каждой группе и выравнивания ресурса групп лопаток относительно друг друга в ГТД.

5. Технологическое обеспечение реализации ФОП лопаток ГТД.

Для реализации многослойных ФОП необходима разработка технологического обеспечения и необходимых процессов. Эти вопросы решены в работах [8, 11]

Учитывая, что ресурс лопатки должен быть одинаков можно записать следующее выражение:

$$\sum_{s_1=1}^{S_1} \frac{h_{1s_1}}{\mu_{1s_1}} = \sum_{s_2=1}^{S_2} \frac{h_{2s_2}}{\mu_{2s_2}} = \sum_{s_3=1}^{S_3} \frac{h_{3s_3}}{\mu_{3s_3}} = \dots = \sum_{s_k=1}^{S_k} \frac{h_{ks_k}}{\mu_{ks_k}} = \dots = \sum_{s_K=1}^{S_K} \frac{h_{Ks_K}}{\mu_{Ks_K}}; \quad (5)$$

где h_{ks_k} - толщина s_k -го слоя ФОП k -й лопатки компрессора;

μ_{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 (5) можно представить следующим образом

$$\frac{S_1 h_1}{\mu_1} = \frac{S_2 h_2}{\mu_2} = \frac{S_3 h_3}{\mu_3} = \dots = \frac{S_k h_k}{\mu_k} = \dots = \frac{S_K h_K}{\mu_K}. \quad (6)$$

где h_k и μ_k - толщина и интенсивность износа одного любого слоя ФОП, соответственно.

На основании выражения (6) устанавливаются связи между основными параметрами соседних лопаток групп или всех лопаток компрессора. Эти связи необходимы при формировании структуры комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОП лопаток. Данная структура технологии обусловлена многослойным ФОП. В этом случае, закономерности связей параметров ФОП определяются на основании следующих выражений [8, 11]:

$$\left. \begin{aligned}
 h_1 &= \frac{T_o \mu_1}{S_1}; \\
 h_2 &= \frac{S_1 h_1 \mu_2}{S_2 \mu_1}; \\
 h_3 &= \frac{S_2 h_2 \mu_2}{S_3 \mu_1}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 h_k &= \frac{S_{(k-1)} h_{(k-1)} \mu_k}{S_k \mu_{(k-1)}}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 h_K &= \frac{S_{(K-1)} h_{(K-1)} \mu_K}{S_K \mu_{(K-1)}}.
 \end{aligned} \right\} (7)$$

С помощью выражения (7) определяются связи параметров покрытий лопаток при нанесении многослойного ФОП с одинаковой толщиной слоев покрытия. При этом каждый слой ФОП формируется со своим специальным ПКГ.

На базе параметров связи (7) строится многосвязный технологический процесс реализации ФОП лопаток ГТД [8, 11].

6. Заключение

Таким образом, в представленной работе решены вопросы обеспечения ФОС лопаток ГТД на основе многослойных ФОП со специальным ПКГ каждого слоя, обеспечивающих повышение их ресурса в условиях действия переменных эксплуатационных воздействий по элементам пера лопатки. При этом разработан новый технологический метод реализации многослойных ФОП, который выполняется в соответствии с заданным алгоритмом, предусматривающим формирование заданного ПКГ каждого слоя, его толщину и количество слоев в соответствии с особенностями эксплуатации лопатки. Для обеспечения этого в работе решены следующие вопросы:

1. Выполнен анализ особенностей эксплуатации лопаток ГТД, при этом установлено, что на каждую лопатку, группу лопаток и между группами лопаток действуют переменные воздействия;

2. В работе предложено для повышения ресурса лопаток и их ремонтпригодности (за счет многократного их восстановления) обеспечивать ФОС лопаток на базе ФОП. Для выполнения этого разработан общий подход, основывающийся на особых принципах реализации многослойных ФОП, включающий реализацию:

- ПКГ каждого слоя покрытия;
- определение толщины каждого слоя покрытия;
- определение количества необходимых слоев покрытий.

Эти составляющие позволяют решить вопросы единовременного износа всего покрытия в заданный момент времени, например, за длительность назначенного ресурса ГТД.

3. Для формирования ФОП лопаток в работе разработан необходимый алгоритм формирования покрытий лопаток.

4. Для реализации предлагаемых покрытий лопаток разработано необходимое технологическое обеспечение, базирующееся на особенностях синтеза связанных технологических процессов формирования многослойного ФОП лопаток ГТД [8, 11].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. 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.
4. Авиаинформ // Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2019. – Вып. № 12 (189). – 132 с.
5. Авиаинформ // Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2020. – Вып. № 2 (191). – 140 с.
6. 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.
7. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – 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 единовременного 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. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированных покрытий. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 22 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 // Наукоемкие технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1 (103). – С. 40-48. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>

Поступила в редколлегию 20.02.2020 г.