

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**Михайлов Вячеслав Александрович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА  
ВЕРТОЛЕТНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ СВЯЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк – 2019

Работа выполнена в ГОСУДАРСТВЕННОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ УЧРЕЖДЕНИИ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк

Научный  
руководитель:

**Байков Анатолий Викторович**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные  
оппоненты:

Ведущая  
организация:

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: ауд. 6.202,а, пр. Дзержинского, 1, г. Донецк, 283001

Тел: +380 71 3060879, E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: корпус 2, ул. Артёма, 58, г. Донецк, 283001

<http://donntu.org>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 01.014.02

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Вертолетный газотурбинный двигатель (ГТД) состоит из большого числа подсистем, модулей и элементов, которые работают в сложных эксплуатационных условиях. При этом к основным подсистемам этого авиационного двигателя относится компрессор, который имеет множество лопаток различного назначения, располагающихся на дисках ступеней, образующих группы лопаток, выполняющих заданные эксплуатационные функции. Можно отметить, что эти группы лопаток имеют различный характер своей эксплуатации, обусловленный особенностями движения пылевоздушного потока по тракту компрессора, пространственной формой лопаток, их расположением и кинематикой движения. Это приводит к возникновению неодинакового и неравномерного абразивно-эрозионного износа каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга в компрессоре. Все это снижает ресурс вертолетного ГТД в целом, уменьшает потенциальные возможности полного использования всех групп лопаток компрессора из условия равенства их ресурсов, снижает оперативность его ремонта и восстановления, а также ограничивает возможность организации различных структурных групп лопаток в модульные структуры, что значительно снижает параметры их отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), восстановления и ремонта.

Для повышения ресурса лопаток компрессора вертолетных ГТД используется целый комплекс различных методов ОУО, технологических процессов и принципов рациональной обработки. При этом для выравнивания износа рабочих поверхностей лопаток применяются функционально-ориентированные покрытия (ФОП). Эти покрытия обеспечивают реализацию функционально-ориентированных свойств (ФОС) рабочих поверхностей лопаток компрессора, что значительно повышает их ресурс.

Выполненные исследования позволили установить, что в компрессор вертолетного ГТД структурируется из различных групп лопаток. При этом на каждую группу лопаток действуют свои определенные эксплуатационные воздействия, характеризующиеся возникновением различного по характеру и интенсивности износа этих групп лопаток. Поэтому для каждой группы лопаток необходимо обеспечивать свой конкретный технологический процесс ОУО лопаток компрессора с ФОС. Причем существующие технологические процессы и применяемые методы не позволяют выравнивать ресурс лопаток компрессора различных групп лопаток в едином комплексе. Решение этих вопросов становится возможным на базе единых связей и обеспечения заданных параметров ФОС между различными группами лопаток компрессора ГТД. Для этого необходимо совершенствование технологического обеспечения и создание комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток с ФОС.

На основании этого, повышение ресурса лопаток компрессора вертолетных ГТД посредством его выравнивания между структурными группами лопаток на основе комплексных отделочно-упрочняющих многосвязных технологических процессов и обеспечения ФОС является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение.

**Степень разработанности темы.** Выполненные в данной работе исследования направлены на совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных ГТД на основе комплексных многосвязных технологий.

Вопросам совершенствования структурного и технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора ГТД посвящены работы большого количества ученых и специалистов. К основополагающим исследованиям в этом направлении можно отнести работы следующих профессоров: Абраимова Н.В., Безъязычного В.Ф., Богуслаева В.А., Демина Ф.И., Жеманюка П.Д., Елисеева Ю.С., Крылова В.И., Макарова В.Ф., Полетаева В.А., Проничева Н.Д., Тамарина Ю.А., Шитарева И.Л., Яценко В.К. и многих других ученых. В данных работах приводятся сведения по созданию прогрессивных технологий, направленных на повышение качества элементов и лопаток авиационных ГТД. Однако приведенные в них исследования не позволяют совершенствовать структурное и технологическое обеспечение изготовления лопаток компрессора вертолетных ГТД с учетом связей технологических процессов ОУО групп лопаток компрессора и равенства их ресурса. А также проведенный обзор современного состояния вопроса исследований показал, что на базе существующих данных невозможно решать вопросы повышения ресурса лопаток компрессора вертолетных ГТД посредством его выравнивания между структурными группами лопаток на основе существующих технологических процессов и обеспечения ФОС. Поэтому для этого необходимо совершенствовать структурное и технологическое обеспечение лопаток компрессора на основе многосвязных технологий.

Вместе с тем, можно отметить, что выполненные ранее исследования и полученные результаты являются хорошей базой для дальнейшего повышения ресурса лопаток компрессора вертолетных ГТД посредством его выравнивания между структурными группами лопаток на основе комплексных отделочно-упрочняющих многосвязных технологических процессов и обеспечения ФОС.

**Цель и задачи исследования.** Целью данной работы является повышение ресурса лопаток компрессора вертолетных ГТД посредством его выравнивания между структурными группами лопаток на основе комплексных отделочно-упрочняющих многосвязных технологических процессов и обеспечения ФОС.

Для достижения этой цели, в данной работе планируется решение следующих основных задач:

1. Выполнить анализ функциональных особенностей работы структурных групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя. Исследовать существующие методы и технологии для повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора газотурбинного двигателя.

2. Провести анализ особенностей эксплуатации групп лопаток компрессора ГТД, разработать принципы и технологические методы повышения ресурса лопаток на базе комплексного технологического процесса, связывающего отдельные технологические процессы ОУО всех групп лопаток компрессора.

Установить группу связей параметров обеспечения свойств между отдельными технологическими процессами обработки различных групп лопаток.

3. Предложить методы структурного синтеза комплексного многосвязного технологического процесса ОУО групп лопаток компрессора на базе обеспечения ФОС и равенства ресурса их групп.

4. Выполнить конкретную реализацию комплексного многосвязного технологического процесса ОУО групп лопаток с ФОС с учетом равенства их ресурса.

5. Разработать технологическое обеспечение по повышению ресурса групп лопаток компрессора с ФОС и равенством ресурсов их групп.

6. Разработать новый способ нанесения многослойного ФОП лопаток компрессора и реализация структуры связного технологического процесса групп лопаток на основе принципа равенства ресурсов. Исследовать основные особенности формирования пространственного контура границ слоев многослойного ФОП групп лопаток компрессора.

7. Разработать методику экспериментальной реализации связного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса. Выполнить экспериментальную реализацию многосвязного технологического процесса формирования многослойного ФОП различных групп лопаток компрессора ГТД.

8. Предложить общие рекомендации по синтезу структуры комплексного многосвязного технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки групп лопаток компрессора на основе ФОП и принципа равенства ресурсов их групп. Внедрить результаты работы в производство.

**Объект и предмет исследования.** *Объектом* исследования является структура комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора ГТД с ФОП на основе равенства ресурсов их групп, а *предметом* – множество связей параметров свойств лопаток компрессора между отдельными технологическими процессами обработки их групп.

*Научная идея работы* заключается в создании структуры комплексного технологического процесса на основе многосвязных процессов и обеспечения ФОС из условия равенства ресурса групп лопаток компрессора ГТД, на которые действуют неодинаковые эксплуатационные воздействия.

**Научная новизна полученных результатов.** В работе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных ГТД на основе связных технологий. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Установлено, что на лопатки компрессора действуют неравномерные эксплуатационные функции, которые реализуются по группам лопаток, при этом абразивно-эрозионный износ лопаток компрессора характеризуется неравномерностями трех рангов.

2. Впервые разработан технологический подход синтеза комплексного технологического процесса ОУО лопаток компрессора на основе многосвязных технологических процессов и обеспечения ФОС структурных групп лопаток из

условия равенства их ресурса.

3. Определено множество связей параметров структуры отдельных технологических процессов для обеспечения необходимого множества ФОС группам лопаток компрессора из условия равенства их ресурса по большему его значению.

#### **Теоретическая значимость работы.**

1. Установлены закономерности абразивно-эрозионного износа рабочих поверхностей каждой лопатки, лопаток в каждой группе и лопаток между группами в компрессоре, которые обусловлены неравномерностями трех рангов.

2. Разработан технологический подход синтеза комплексных многосвязных технологических процессов ОУО лопаток компрессора из условия равенства их ресурсов отдельных групп, обусловленных действием неравномерностей трех рангов, возникающих при абразивно-эрозионном износе их в процессе эксплуатации.

3. Определены связи между параметрами свойств лопаток, обеспечиваемых отдельными технологическими процессами в комплексном многосвязном технологическом процессе ОУО лопаток компрессора.

4. Разработана методика и алгоритм синтеза структуры комплексных многосвязных технологических процессов ОУО лопаток компрессора обеспечивающих равный их ресурс в условиях действия неравномерностей трех рангов, возникающих в компрессоре от абразивно-эрозионного износа.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработанная структура комплексного многосвязного технологического процесса ОУО обеспечивает возможность обеспечения ФОС лопаток на базе ФОП из условия равенства ресурса различных групп лопаток компрессора в условиях действия неравномерностей трех рангов абразивно-эрозионного их износа.

2. Предлагаемая методика синтеза структуры комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора обеспечивает повышение из ресурса на 60 %.

3. Предлагаемые общие рекомендации синтеза структуры комплексного многосвязного технологического процесса ОУО групп лопаток компрессора на основе ФОП и принципа равенства ресурсов их групп позволило выполнить синтез конкретных вариантов технологических процессов для различных групп лопаток компрессора ГТД.

4. Результаты работы внедрены на ООО «Горловский энергомеханический завод» (ДНР), ОАО «Ейский станкостроительный завод» (Россия), в Филиале Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Россия) и в ГОУВПО «ДОННТУ» (ДНР). Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы в производство составит 146000,00 рублей РФ.

**Методология и методы исследования.** В данной диссертационной работе представлен комплекс научно-технических разработок, базирующихся на следующем: общих положениях, принципах, методах и правилах технологии машиностроения; основополагающих принципах, методах и методологии син-

теза функционально-ориентированных технологий; общих принципах теории производительности и правилах синтеза структуры технологических процессов; алгебре групп и теории множеств; методах морфологического анализа и синтеза структуры операций технологических процессов; экспериментальных исследованиях, которые проводились на базе методов теории планирования эксперимента; математической обработке результатов экспериментов, которая выполнялась с помощью статистических методов.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные научные положения и разработки:

- научное положение о том, что объединяя структуру отдельных технологических процессов, для ОУО множества групп лопаток компрессора в соответствии с множеством вариантов эксплуатационных воздействий на эти группы лопаток, обеспечивается возможность выполнения свойств лопаток из условия равенства их ресурсов и создания комплексных связных технологических процессов ОУО лопаток всего компрессора с ФОП;

- научное положение о том, что обеспечивая ФОС группам лопаток на базе ФОП в соответствии с особенностями действия абразивно-эрозионного износа групп лопаток характеризуемыми неравномерностями трех рангов обеспечивается возможность реализации равного ресурса групп лопаток компрессора;

- научное положение о том, что на базе обеспечения ФОС лопаток и равенства ресурса лопаток компрессора всех групп обеспечивается возможность повышения ресурса всех лопаток компрессора;

- установленные закономерности абразивно-эрозионного износа групп лопаток компрессора, характеризуемых неравномерностями износа трех рангов;

- технологический подход синтеза комплексных многосвязных технологических процессов обработки групп лопаток компрессора на базе принципа равенства ресурса и обеспечения ФОС лопаткам, обеспечивающий повышение ресурса лопаток компрессора в целом;

- методика и алгоритм синтеза структуры комплексных многосвязных технологических процессов ОУО лопаток компрессора обеспечивающих равный их ресурс в условиях действия неравномерностей трех рангов, возникающих в компрессоре от абразивно-эрозионного износа.

**Степень достоверности результатов и апробация результатов.** Достоверность представленных результатов и обоснованность выводов подтверждаются корректным использованием апробированных методов исследований и научных теорий, адекватностью разработанных моделей, применением современного математического аппарата, приборов и технологического оборудования, достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных исследований, полученными результатами экспериментальных исследований лопаток компрессора с ФОП с использованием образцов-свидетелей, эффективностью внедрения результатов работы в производство.

Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих международных научно-технических конференциях и семинарах: «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей

школы» (г. Донецк, 2005 г.); Conferinta Stiintifica Internationala Iasi-Chisinau: Tehnologii Moderne. Calitate. Restructurari. TMCR 2005 (г. Кишинев, 2005 г.); «Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла» (г. Брянск, 2005 г.); «Современные проблемы и перспективы механики» (г. Ташкент, 2006 г.); «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2005 г., 2006 г., 2018 г., 2019 г.); «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» (г. Петропавловск-Камчатский, Россия, 2018 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОННТУ», на XXV и XXVI международных научно-технических конференциях «Машиностроение и техносфера XXI века», проводимых в 2018 г. и в 2019 г. в городе Севастополе (Россия).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 14 научно-технических работах, в том числе: 6 статей в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ДНР; 2 статьи в ведущих рецензируемых журналах ВАК России; 5 публикаций в материалах международных конференций; 1 декларационный патент на изобретение Украины.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 197 страницы, в том числе 165 страниц основного текста, 57 рисунка, 10 таблиц, перечень сокращений, 154 литературных источника, 3 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена актуальность и определена новизна тематики работы, сформулированы цель и задачи диссертации, определен объект и предмет исследований, представлена научная и практическая ценность работы.

**В первом разделе** работы проведен литературный обзор современного состояния вопроса исследований, представлен анализ особенностей работы лопаток компрессора вертолетного ГТД и исследованы существующие методы и технологии для повышения их ресурса.

Выполненный анализ литературных источников показал, что в компрессоре ГТД на каждую лопатку, группу лопаток и группы лопаток действуют изменяющиеся абразивно-эрозионные эксплуатационные воздействия, которые характеризуются возникновением неравномерностей износа лопаток трех рангов.

А также исследования показали, что применяемые в настоящее время технологии не обеспечивают возможность комплексно решать вопросы обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток, свойств лопаток в группе и свойств лопаток между группами в зависимости от особенностей действия эксплуатационных воздействий трех рангов. При этом для обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора - из условия равного их ресурса по группам и между группами, необходимо создание комплексной связной технологии, обеспечивающей реализацию свойств лопаток на

базе единого принципа, например, обеспечения равного ресурса всех лопаток групп в условиях действия не равномерных износов лопаток трех рангов.



Рисунок 1. Виды групп лопаток осевого компрессора ГТД модели ТВЗ-117 и особенности их разрушений

Неравномерность действия эксплуатационных воздействий на структурные элементы ГТД можно оценивать неравномерностями 3-х рангов (рисунок 1). При этом установлено, что существующие традиционные методы повышения ресурса ГТД не обеспечивают дальнейшее повышение его ресурса в условиях действия эксплуатационных неравномерностей 3-х рангов. Для повышения ресурса лопаток компрессора в условиях действия на них неравномерностей износа трех рангов необходимо применение функционально-ориентированных свойств.

В работе разработан подход (рисунок 2) в обеспечении ФОС лопаток компрессора на базе единого принципа, который позволяет выполнять равный, кратный, заданный, предельный, гарантированный или другой вид ресурса. Это

Таким образом, на основании сделанных выводов по существующим проблемам в данной области определена цель и сформулированы основные задачи диссертационной работы.

**Второй раздел** диссертационной работы посвящен вопросам исследований технологических особенностей повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора вертолетного двигателя.

Проведенный анализ состава лопаток компрессора ГТД позволил установить, что компрессор имеет сложную структуру и состоит из множества элементов (лопаток), узлов и подсистем. Эти элементы структурированы в ступени лопаток, группы ступеней и подсистемы (рисунок 1).

В процессе эксплуатации ГТД на структурные элементы, в каждой группе лопаток, между группами ступеней лопаток, между узлами и ступенями действуют изменяющиеся по этим элементам эксплуатационные воздействия (эрозионные, коррозионные, химические, физические, механические и комбинированные воздействия).

обеспечивает повышение ресурса лопаток компрессора в целом и увеличение их эксплуатационного потенциала, а также повышает ремонтпригодность.

Разработанный технологический подход позволяет выполнять синтез комплексных связанных технологических процессов реализации ФОС для лопаток компрессора.

Проведенные исследования особенностей синтеза этих технологий, позволили установить следующее:

- выполнить анализ особенностей действия неравномерностей износа и синтеза ФОП лопаток компрессора;
- предложить гипотетическую схему общего подхода в обеспечении ФОС лопаток ГТД с применением ФОП, обеспечивающих защиту основного материала лопатки от износа с неравномерностями 3-х рангов (рисунок 3);
- установить основные характеристики общего подхода в повышении ресурса лопаток компрессора ГТД на основе обеспечения ФОС;

- представить структурную схему синтеза связанных технологических процессов обеспечения ФОС отдельным группам лопаток компрессора ГТД на базе принципа равного их ресурса (рисунок 3);

- в работе представлены особенности синтеза ФОП лопатки со специальной структурой и конфигурацией, сформированное в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций (рисунок 4).

Выполненный анализ работоспособности ГТД с ФОС элементной базы показывает, что они обеспечивают повышение общего

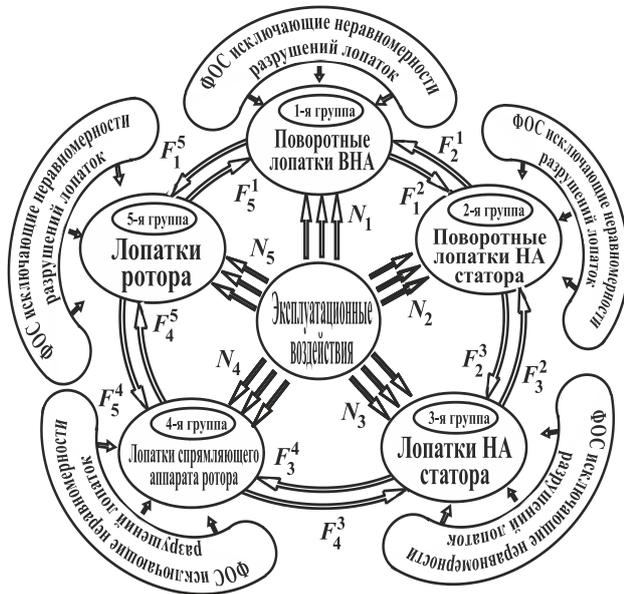


Рисунок 2. Структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и обеспечения ФОС

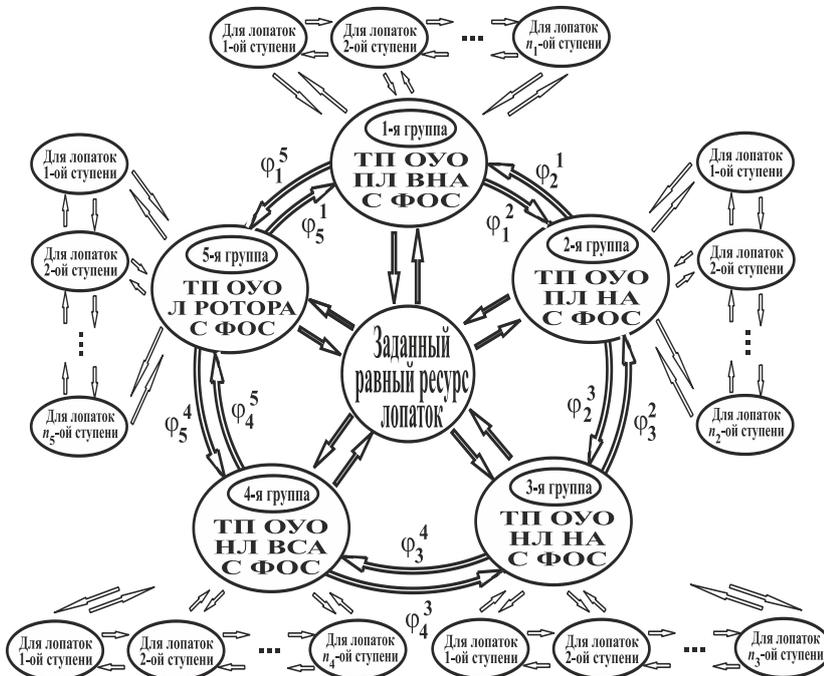


Рисунок 3. Структурная схема синтеза связанных технологических процессов обеспечения ФОС отдельным группам лопаток компрессора ГТД на базе принципа равного их ресурса

ресурса ГТД, увеличение его межремонтного ресурса и количества возможных восстановлений. При этом применение многократных восстановлений работоспособности ГТД за счет установки в двигатель запасных частей с ФОС позволяет существенно повышать его ресурс.

Учитывая то, что ресурсы всех лопаток с ФОП должны быть равны, можно записать следующее выражение:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_k = \dots = R_K, \quad (1)$$

где  $R_k$  - ресурс  $k$ -ой лопатки компрессора;  $K$  - общее количество лопаток.

В выражении (1), каждый элемент определяется по следующей формуле:

$$R_k = \sum_{s=1}^S R_{ks} = \sum_{s=1}^S \frac{h_{ks}}{\mu_{ks}}, \quad (2)$$

где  $R_{ks}$  - ресурс  $s$ -го слоя ФОП  $k$ -ой лопатки компрессора;

$\mu_{ks}$  - интенсивность износа  $s$ -го слоя ФОП  $k$ -ой лопатки компрессора;

$S$  - общее количество слоев ФОП  $k$ -ой лопатки компрессора.

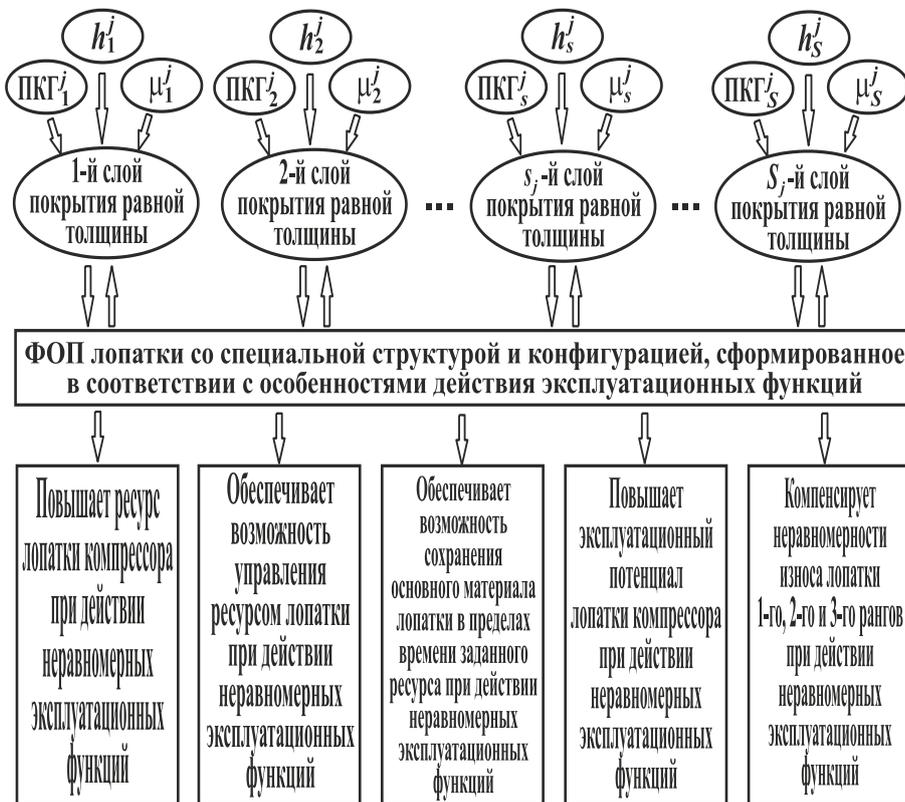


Рисунок 4. Особенности синтеза ФОП лопатки со специальной структурой и конфигурацией, сформированное в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций

вопросов совершенствования структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных ГТД на основе связанных технологий, и обеспечить достижение поставленной цели.

В третьем разделе работы приведен структурный синтез комплексного

На основании выражений (1) и (2) устанавливаются связи между параметрами слоев покрытий, и последовательно формируется ФОП каждой лопатки компрессора ГТД.

В случае, если слои ФОП будут выполняться равной толщины и одинакового состава, выражение (2) будет иметь следующий вид

$$R_k = S \frac{h_{ks}}{\mu_{ks}}.$$

Представленная структурная схема диссертационной работы позволяет вести анализ

многосвязного технологического процесса ОУО групп лопаток компрессора.

В этом случае, выполнен анализ особенностей синтеза комплексных процессов на базе принципа равенства ресурса групп лопаток, который представлен в виде схемы на рисунок 5.

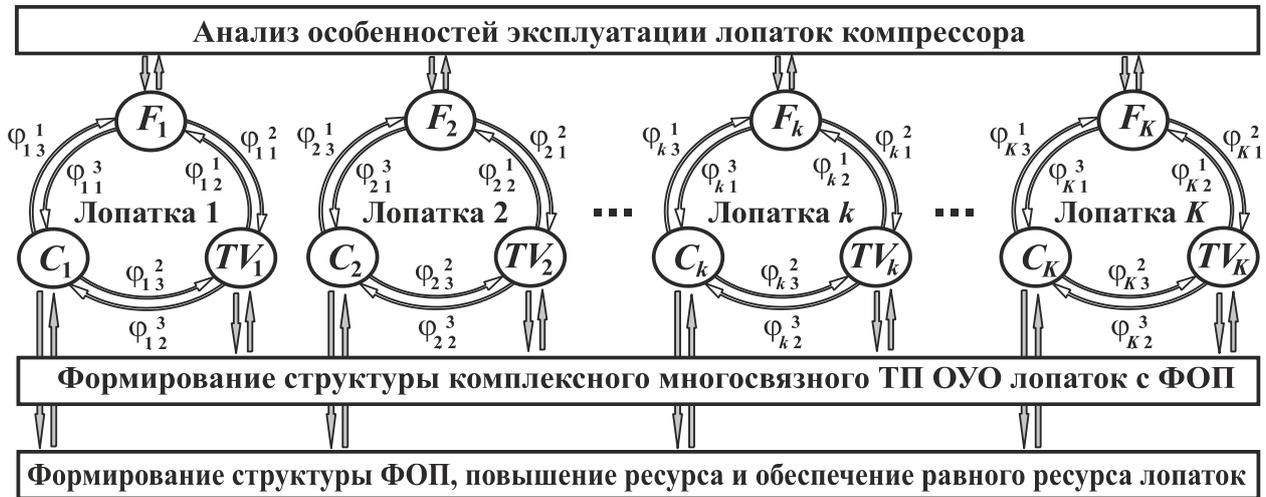


Рисунок 5. Особенности формирования структуры комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП

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.

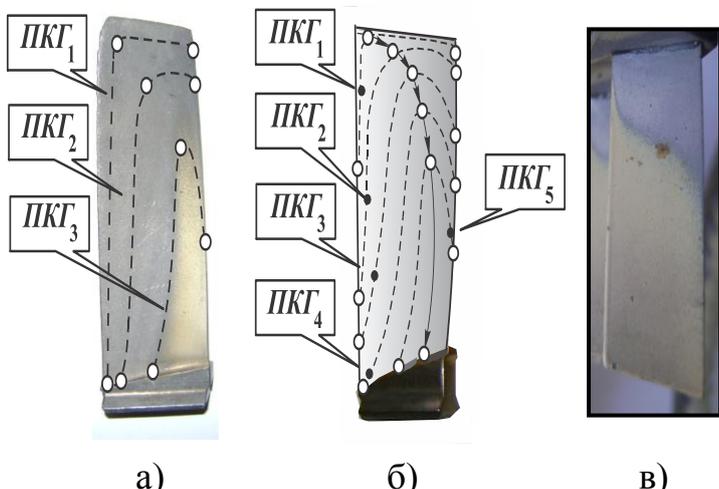
Также следует отметить, что структура технологического процесса для каждой лопатки группы определяется на базе следующих параметров (рисунок 5):

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

Между элементами формирования структуры (рисунок 5) каждого технологического процесса ОУО лопаток компрессора действуют прямые  $\varphi_{ki}^j$  и об-

ратные  $\varphi_{kj}^i$  связи. В целом, эта схема реализуется с использованием итерационно-рекуррентного подхода через анализ или формирования структуры.

В работе установлены связи параметров ФОП для групп лопаток компрессора, которые при одинаковой толщине и интенсивности износа каждого слоя ФОП для любой лопатки, будут иметь следующий вид:



$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{T_o \mu_1}{S_1}; \\ h_2 &= \frac{S_1 h_1 \mu_2}{S_2 \mu_1}; \\ h_3 &= \frac{S_2 h_2 \mu_2}{S_3 \mu_1}; \\ &\dots\dots\dots; \\ h_k &= \frac{S_{(k-1)} h_{(k-1)} \mu_k}{S_k \mu_{(k-1)}}; \\ &\dots\dots\dots; \\ h_K &= \frac{S_{(K-1)} h_{(K-1)} \mu_K}{S_K \mu_{(K-1)}}. \end{aligned} \right\} (3)$$

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

$S_k$  - количество слоев ФОП  $k$ -й лопатки компрессора;

$K$  - общее количество лопаток компрессора.

С помощью выражения (3) 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), который определяется на основе ПКГ износа опытного покрытия (рисунок 6).

В работе разработана методика синтеза комплексного связанного технологического процесса обеспечения ФОС групп лопаток. С помощью этой методики выполняется последовательный синтез многослойного ФОП с необходимыми параметрами ПКГ каждого слоя покрытия.

А также в данной работе выполнен синтез развернутой структуры многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора. Этот технологический процесс позволяет решать вопросы напыления многослойного ФОП в зависимости от следующих параметров: ПКГ  $i$ -го слоя покрытия; толщины  $i$ -го слоя покрытия; интенсивности износа  $i$ -го слоя ФОП; количества слоев покрытий.

В работе разработан также алгоритм формирования многослойного ФОП, который позволяет обеспечивать покрытие для любой ступени группы лопаток компрессора ГТД.

**В четвертом разделе** диссертации решены вопросы синтеза технологического обеспечения по реализации ФОП для групп лопаток компрессора.

В работе разработан способ напыления многослойного ФОП лопаток компрессора (заявка на изобретение № 2018107164/02(010972). Российская Федерация, МПК 8 С 23 С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя (положительное решение)), который выполняется в структуре связанного технологического процесса обработки групп лопаток. Этот способ заключается в том, что многослойное ФОП формируется многослойным - переменной толщины из слоев постоянной толщины с различными топографическими параметрами ПКГ каждого слоя. При этом процесс реализации ФОП последовательно выполняется в три этапа: получение параметров ПКГ износа однослойного опытного покрытия в условиях эксплуатации; отображение ПКГ износа опытного покрытия на зональные защитные экраны; последовательная установка на лопатку экрана и нанесение слоев многослойного покрытия. Предлагаемый способ позволяет напылять ФОП с качественно новыми свойствами.



Рисунок 7. Алгоритм реализации технологического процесса формирования ФОП с ПКГ каждого слоя

При реализации многослойного ФОП возникает необходимость формирования ПКГ каждого слоя. Поэтому в работе решены вопросы формирования ПКГ слоев многослойного ФОП групп лопаток компрессора.

На рисунок 7 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*.

В работе разработана также методика определения геометрических параметров ПКГ границ покрытия групп лопаток компрессора, которая базируется

на определении координат ПКГ в плоскости  $z O y$  в программе CorelDraw Graphics Suite X6 (рисунок 8).

А также выполнен анализ особенностей повышения ресурса лопаток компрессора на базе ФОП и принципа равенства ресурса групп лопаток. Применение ФОП лопаток компрессора позволяет в период их гарантированного ресурса и действия неравномерного износа трех рангов решить следующие вопросы:

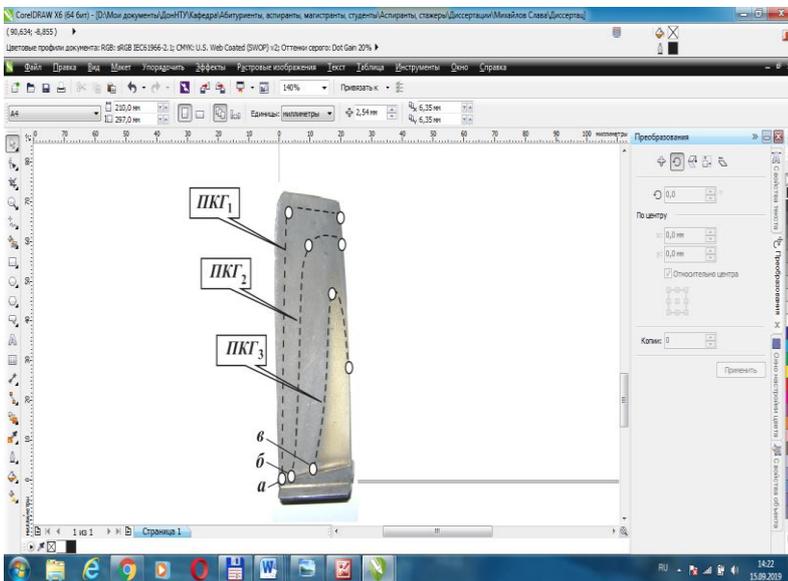


Рисунок 8. Общий вид рабочей лопатки в окне программы CorelDraw Graphics Suite X6 при определении координат ПКГ в плоскости  $z O y$

- исключить износ основного материала пера лопатки за счет обеспечения изменяющихся свойств ФОП по поверхности пера в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций;

- обеспечить одинаковый износ лопаток группы за счет обеспечения изменяющихся свойств лопаток по ступеням в группе лопаток;

- обеспечить одинаковый износ групп лопаток относительно друг друга в компрессоре.

В этом случае, толщина каждого слоя ФОП будет определяться на основании следующего выражения:

$$h_i = h_{i1} + h_{i2} + h_{i3} + h_{i4} = \frac{\mu_i T_o}{n}; \quad (4)$$

где  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя ФОП;

$h_{i1}$  – первая составляющая части толщины  $i$ -го слоя ФОП, компенсирующая износ поверхности пера лопатки из-за действия неравномерности 1-го ранга;

$h_{i2}$  – вторая составляющая части толщины  $i$ -го слоя ФОП, компенсирующая износ поверхности пера лопатки из-за действия неравномерности 2-го ранга;

$h_{i3}$  – третья составляющая части толщины  $i$ -го слоя ФОП, компенсирующая износ поверхности пера лопатки из-за действия неравномерности 3-го ранга;

$h_{i4}$  – четвертая составляющая части толщины  $i$ -го слоя ФОП, предназначенная для решения вопросов повышения ресурса всех лопаток компрессора;

$\mu_i$  – интенсивность износа нитрид титанового  $i$ -го слоя ФОП;

$T_o$  – гарантированный ресурс лопаток компрессора;

$n$  – число слоев ФОП лопатки компрессора.

Используя выражение (4) определяется толщина каждого слоя ФОП лопаток компрессора, которое будет компенсировать неравномерности износа лопаток трех рангов и обеспечит возможность повышения ресурса в целом.

В пятом разделе диссертации представлены данные по экспериментальной реализации многосвязного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток и приведены рекомендации по его выполнению.

В работе разработана методика экспериментальной реализации связанного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса, основные этапы которой представлены на рисунке 9. Представленная методика позволяет формировать многослойные ФОП лопаток компрессора, обеспечивающие равный ресурс лопаток в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций трех рангов, посредством реализации комплексного многосвязного технологического процесса.

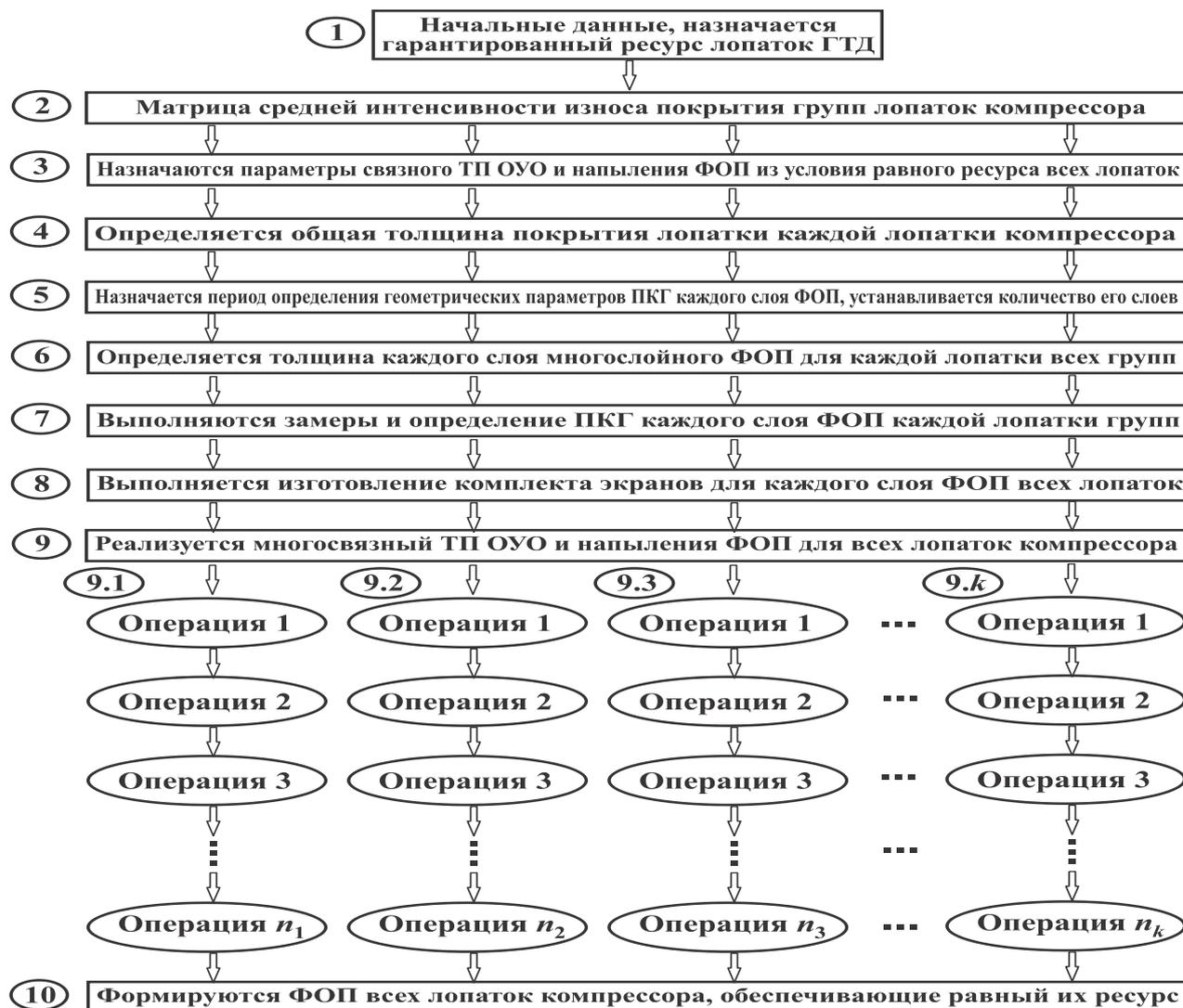


Рисунок 9. Основные этапы методики экспериментальной реализации связанного технологического процесса формирования ФОП.

В представленной работе выполнена экспериментальная реализация конкретного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора ГТД. А также приведены данные по его реализации с использованием вакуумной ионно-плазменной установки ННВ 6.6-И1 (рисунок 10) и другого технологического оборудования. При этом установлено, что ФОП и принцип



Рисунок 10. Общий вид установки ННВ 6,6 – И1 для напыления ФОП лопаток

равного ресурса всех лопаток компрессора позволяют повысить их ресурс, адаптировать их работу к особенностям эксплуатации, обеспечить равный ресурс лопаток всех групп и повысить их ремонтпригодность.

Выполненные в диссертационной работе исследования позволили сформулировать общие рекомендации по увеличению ресурса лопаток компрессора ГТД. Разработанные рекомендации по реализации комплексного связного технологического процесса реализации ФОП лопаток компрессора позволяют формировать ФОП всех лопаток компрессора и обеспечивать равный их ресурс в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, а именно абразивно-эрозионного износа лопаток, характеризующихся неравномерностями 3-х рангов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в данной работе исследования позволили повысить ресурс лопаток компрессора вертолетных ГТД посредством его выравнивания между структурными группами лопаток на основе комплексных отделочно-упрочняющих многосвязных технологических процессов и обеспечения ФОС.

Полученные в диссертационной работе результаты направлены на решение следующих вопросов:

1. Установлено, что при эксплуатации лопаток компрессора ГТД действуют на поверхностях пера и в группах лопаток неравномерные абразивно-эрозионные воздействия, характеризующиеся неравномерностями их износа 3-х рангов.

Анализ существующих технологических методов повышения ресурса лопаток компрессора ГТД позволил установить, что для лопаток компрессора и их групп, работающих в условиях действия неравномерностей их износа 3-х рангов, необходимы специальные связные технологические процессы ОУО лопаток, обеспечивающих равный ресурс всех групп лопаток.

2. Впервые в данной работе разработан технологический подход в обеспечении ФОС лопаток компрессора на базе единого принципа - обеспечения равенства ресурса всех лопаток и их групп в компрессоре. Это обеспечивает повышение ресурса лопаток компрессора в целом и увеличение их эксплуатационного потенциала, а также повышает ремонтпригодность за счет обеспече-

ния многократного восстановления лопаток. Этот подход базируется на комплексном связанном технологическом процессе реализации ФОС для лопаток компрессора.

3. В работе выполнен анализ особенности синтеза комплексного много-связного технологического процесса ОУО групп лопаток с ФОП. При этом приведены данные для реализации ФОП на базе принципа равенства ресурса групп лопаток компрессора. А также представлена схема синтеза комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП.

4. В работе установлено множество связей между параметрами ФОП, которые обеспечивают возможность последовательно реализовывать ФОП лопаток компрессора - из условия равенства ресурсов всех ступеней и групп лопаток компрессора. Полученные выражения, связывают отдельные технологические процессы реализации ФОП лопаток, и являются начальными параметрами выполнения технологического процесса напыления покрытий.

5. Предложенная методика синтеза комплексного отделочно-упрочняющего связанного технологического процесса позволяет проектировать конкретные варианты процессов напыления ФОП лопаток групп на базе принципа равенства ресурса всех лопаток компрессора. При этом с помощью этой методики обеспечивается возможность выполнять синтез многослойного ФОП с необходимыми параметрами каждого слоя покрытия.

6. В работе разработан новый способ нанесения многослойного ФОП лопаток компрессора и реализация структуры связанного технологического процесса групп лопаток на основе принципа равенства ресурсов. Для реализации ФОП в работе исследованы основные особенности формирования ПКГ слоев многослойного ФОП групп лопаток компрессора. При этом разработан способ реализации ПКГ каждого слоя для ФОП, который позволяет обеспечивать сложный пространственный контур каждого слоя покрытия, состоящего из  $n$  покрытий.

7. В работе разработана методика экспериментальной реализации связанного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса. Эта методика позволяет формировать многослойные ФОП лопаток компрессора, обеспечивающие равный ресурс лопаток в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций трех рангов.

8. В работе выполнена экспериментальная реализация многосвязного технологического процесса формирования многослойного ФОП различных групп лопаток компрессора ГТД. ФОП и принцип равного ресурса всех лопаток компрессора позволяют повысить их ресурс на 60%, адаптировать их работу к особенностям эксплуатации, обеспечить равный ресурс лопаток всех групп и повысить их ремонтпригодность.

9. Выполненные исследования позволили разработать общие рекомендации по синтезу структуры комплексного многосвязного технологического процесса ОУО групп лопаток компрессора на основе ФОП и принципа равенства ресурсов их групп.

Результаты работы внедрены на ООО «Горловский энергомеханический завод» (ДНР), ОАО «Ейский станкостроительный завод» (Россия), в Филиале Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика

Коми, Россия) и в ГОУВПО «ДОННТУ» (ДНР). Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы в производство составит 146000,00 рублей РФ (сто сорок шесть тысяч рублей РФ).

## СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные работы в ведущих рецензируемых изданиях ВАК ДНР*

1. Михайлов, А. Н. Основы формообразования и повышения производительности при напылении вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения / А. Н. Михайлов, **В. А. Михайлов**, Е. А. Михайлова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2004. - Вып. 28. - С. 108 - 116.

2. Михайлова, Е. А. К вопросу нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние поверхности изделий машиностроения / Е. А. Михайлова, **В. А. Михайлов** // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнар. зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. - Вип. 30. - С. 157-164.

3. Михайлов, А. Н. Общая методология синтеза функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения /А. Н. Михайлов, **В. А. Михайлов**, Е. А. Михайлова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 92. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. - С. 184-195

4. **Михайлов, В. А.** Общий подход комплексного повышения ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе функционально-ориентированного подхода /В. А. Михайлов и [др.] / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. - Вып. 1 (56). - С. 101 - 114.

5. **Михайлов, В. А.** Общие основы и принципы повышения ресурса газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода /В. А. Михайлов и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. - Вып. 3 (58). - С. 32 - 43.

6. Пичко, А. П. Эксплуатационные особенности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности и общий подход в повышении их свойств / А. П. Пичко, **В. А. Михайлов**, Д. А. Михайлов и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Вып. 3 (62). - С. 47 - 54.

### *Научные работы в ведущих рецензируемых журналах ВАК России*

7. **Михайлов, В. А.** Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода /В. А. Михайлов и [др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», №9, 2017. - С. 42-48.

8. Михайлов, А. Н. Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, **В. А. Михайлов**, Д. А. Михайлов

и [др.] // Научно-технические технологии в машиностроении – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2018. - №3 (81). - С. 32-41.

#### *Научные работы в материалах конференций*

9. **Михайлов, В. А.** Основные принципы синтеза функционально-ориентированных покрытий изделий машиностроения / В. А. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2005 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2005. - Т. 2. - С. 277-280.

10. Михайлова, Е. А. Общая классификация вакуумных ионно-плазменных покрытий внутренних цилиндрических поверхностей изделий / Е. А. Михайлова, **В. А. Михайлов**, Г. А. Гришин // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-16 сентября 2006 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2006. - Т. 3. - С. 77-81.

11. **Михайлов, В. А.** Повышение структурной надежности вертолетных газотурбинных двигателей / В. А. Михайлов [и др.] // Сб. научн. трудов XXV Междун. научно-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века» в г. Севастополе 10-16 сентября 2018 г. В 2-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Т. 2. - С. 62-66.

12. Михайлов, А. Н. Новые тенденции в повышении ресурса газотурбинных двигателей и установок на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, **В. А. Михайлов**, Д. А. Михайлов и [др.] // Сб. трудов междун. научно-техн. конф. «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» 17-19 октября 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. Ч. 2. – С. 106-111.

13. Михайлов, А. Н. Методика направленного поиска рациональных структурных вариантов процессов обработки лопаток ГТУ с учетом технологических связей / А. Н. Михайлов, А. П. Пичко, Д. А. Михайлов, **В. А. Михайлов**, А. А. Колодяжный, Е. А. Шейко // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. трудов XXVI междун. научно-техн. конф. г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - С. 311-317.

#### *Другие научные работы*

14. Декларационный патент на изобретение № 54100 А МПК 7 С23С 14/04. Спосіб нанесення нітридного декоративного рельєфного покриття на поверхню виробу / В. О. Михайлов **В. О.** Заявка № 2002053915 от 14.05.2002, БИ 3003. – 6 с.

**Личный вклад автора в работах**, опубликованных с соавторами: [1, 2, 3, 4, 5, 6] - соискателем разработаны принципы, структурные модели и выполнен анализ результатов исследований; [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] – соискателем выполнены анализ эксплуатационных свойств и исследования особенностей обеспечения свойств лопаток; [14] – соискателем разработаны конкретные примеры реализации свойств изделий.