

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**

05.02.08 – Технология машиностроения

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

**Байков А.В.**

Идентичность всех экземпляров диссертации  
ПОДТВЕРЖДАЮ:

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 01.014.02, д-р техн. наук С.П. Еронько



Донецк – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ .....	14
1.1. Анализ функциональных особенностей работы структурных групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя .....	14
1.2. Исследование существующих методов и технологий для повыше- ния ресурса структурных групп лопаток компрессора газотурбинного дви- гателя .....	23
1.3. Цель и задачи работы .....	33
РАЗДЕЛ 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА СТРУКТУРНЫХ ГРУПП ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	36
2.1. Анализ видов групп лопаток осевого компрессора и их классифи- кация .....	36
2.2. Определение особенностей эксплуатации каждой лопатки в ступе- ни осевого компрессора, лопаток в группе между номерами ступеней и лопаток между видами групп .....	43
2.3. Анализ действующих неравномерностей эрозионного износа лопа- ток компрессора .....	56
2.4. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств каждой лопатке, лопаткам в группе и группам лопаток на основе на основе единых специальных принципов .....	62
2.5. Особенности синтеза технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора на основе комплексных связанных технологических процессов реализации функционально-ориентированных свойств .....	69
2.6. Анализ эксплуатационных особенностей групп лопаток	

компрессора с функционально-ориентированными свойствами .....	81
2.7. Структурная схема диссертационной работы .....	84
2.8. Выводы.....	87
<b>РАЗДЕЛ 3. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНОГО МНОГО- СВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОТДЕЛОЧНО- УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ГРУПП ЛОПАТОК .....</b>	<b>90</b>
3.1. Особенности синтеза комплексных процессов на базе принципа равенства ресурса групп лопаток .....	90
3.2. Установление связей параметров функционально- ориентированных покрытий для групп лопаток компрессора .....	95
3.3. Методика синтеза комплексного отделочно-упрочняющего связного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств групп лопаток .....	100
3.4. Синтез развернутой структуры многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора .....	106
3.5. Выводы.....	113
<b>РАЗДЕЛ 4. СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО- ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ГРУПП ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА .....</b>	<b>115</b>
4.1. Общее положение .....	115
4.2. Способ напыления многослойного функционально- ориентированного покрытия лопаток компрессора в структуре связного технологического процесса обработки групп лопаток .....	116
4.3. Особенности формирования пространственного контура границ слоев многослойного функционально-ориентированного покрытия групп лопаток компрессора .....	123
4.4. Методика определения геометрических параметров пространственного контура границ покрытия групп лопаток компрессора .....	128

4.5. Особенности повышения ресурса лопаток компрессора на базе функционально-ориентированных покрытий и принципа равенства ресурса групп лопаток .....	135
4.6. Выводы .....	138
<b>РАЗДЕЛ 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ</b>	
<b>МНОГОСВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА</b>	
<b>ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО</b>	
<b>ПОКРЫТИЯ ГРУПП ЛОПАТОК. РЕКОМЕНДАЦИИ И</b>	
<b>ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>140</b>
5.1. Общие положения .....	140
5.2. Методика экспериментальной реализации связного технологического процесса формирования функционально-ориентированного покрытия групп лопаток на базе принципа равенства ресурса .....	141
5.3. Экспериментальная реализация технологического процесса формирования функционально-ориентированного покрытия групп лопаток компрессора .....	147
5.4. Общие рекомендации диссертационной работы .....	154
5.5. Внедрения результатов работы в производство .....	159
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>163</b>
Перечень сокращений .....	166
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>167</b>
Приложение П.1. Матрица интенсивности износа покрытия групп лопаток компрессора .....	186
Приложение П.2. Акты внедрения результатов работы .....	188
Приложение П.3. Копия письма о положительном результате экспертизы заявки на изобретение .....	193



## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) происходит в направлении совершенствования термогазодинамических характеристик, улучшения структурно-компоновочных параметров, повышения коэффициента полезного действия, формирования оптимального облика, снижения удельного расхода топлива, увеличения отношения мощности к массе и улучшения целого комплекса других параметров [1, 8, 43]. Это относится также и к вертолетным ГТД, работа которых происходит в особо тяжелых условиях эксплуатации, наличие большого количества пыли, песка, абразива при взлетах и посадках, а также необходимости снижения удельной массы, улучшения экономичности, повышения ресурса и надежности. Все это способствует улучшению эксплуатационных свойств вертолетных ГТД, которые должны решаться на всех этапах их жизненного цикла, в том числе на этапе производства и изготовления.

**Актуальность темы исследования.** Вертолетный 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 технологичность 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 отделочно-упрочняющей обработки 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 функционально-ориентированных свойств. 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 равен-

ства 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 техноло-

гических 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 лопа-

ток 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 синтеза 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, характеризующихся 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.

## РАЗДЕЛ 1

### ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

#### 1.1. Анализ функциональных особенностей работы структурных групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя

В настоящее время, на современных вертолетах для силовых установок широко используются авиационные газотурбинные двигатели (ГТД). При этом применяемые вертолетные ГТД имеют несколько вариантов схем, а именно [43]:

1. По способу отбора мощности:

- одновальные двигатели с выводом вала вперед (рисунок 1.1, а) и выводом вала назад (рисунок 1.1, б);

- двигатели со свободной турбиной с выводом вала отбора мощности назад (рисунок 1.1, в) и вперед (рисунок 1.1, г);

- двигатели со свободной турбиной и двухвальным газогенератором с выходом вала назад (рисунок 1.1, д) и вперед (рисунок 1.1, е).

2. По рабочему циклу:

- двигатели простого термодинамического цикла с подводом теплоты при постоянном давлении  $p = \text{const}$  (цикл Брайтона),

- двигатели с регенерацией теплоты, например, работающие по циклу Ренкина и другим.

На рисунке. 1.1 представлены структурные схемы вертолетных ГТД. Здесь, показано следующее: рисунок 1.1, а – одновальный с выводом вала назад; рисунок 1.1, б – одновальный с выводом вала вперед; рисунок 1.1, в – со свободной турбиной с выводом вала назад; рисунок 1.1, г – со свободной турбиной с выво-

дом вала вперед; рисунок 1.1, д – со свободной турбиной и двухвальным газогенератором с выходом вала назад; рисунок 1.1, е - со свободной турбиной и двухвальным газогенератором с выходом вала вперед. На рисунке 1.1 приведено следующее обозначение:  $a_i$  – структурные элементы ГТД,  $f_j$  – связи между структурными элементами ГТД,  $W$  – направление выхода выходного вала.

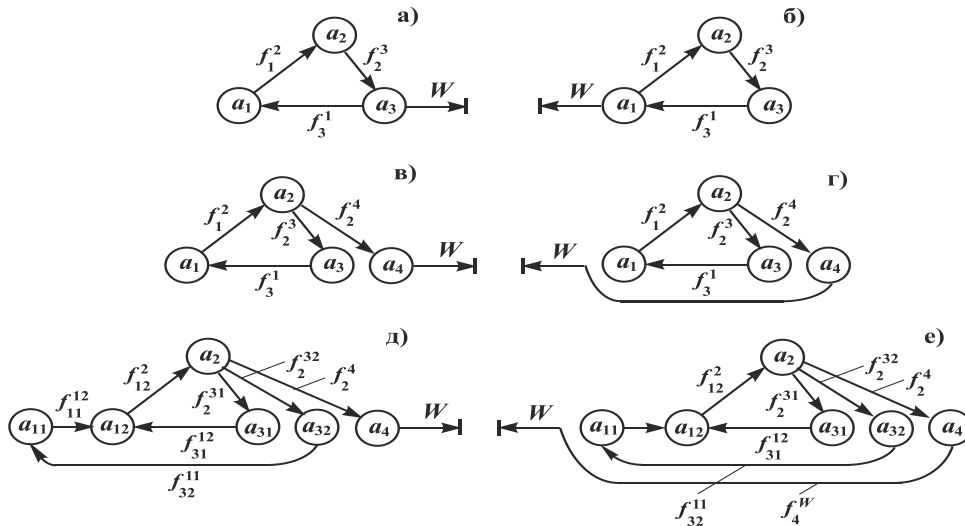


Рисунок 1.1. Структурные схемы вертолетных ГТД: а – с выводом вала назад; б – с выводом вала вперед; в – со свободной турбиной с выводом вала назад; г – со свободной турбиной с выводом вала вперед; д – со свободной турбиной и двухвальным газогенератором с выводом вала назад; е - со свободной турбиной и двухвальным газогенератором с выводом вала вперед

Можно отметить, что обычно для вертолетов чаще всего используются двухвальные двигатели со свободной турбиной. При этом отсутствие механических связей турбокомпрессора с выходным валом свободной турбины позволяет независимо от него изменять частоту его вращения и оперативно регулировать частоту вращения винта вертолета. Это особенно важно для вертолетных ГТД, что выделяет их по этим особенностям в отдельный класс авиационных двигателей.

Можно отметить, что вертолетный ГТД имеет сложную структуру, при этом подсистемы двигателя, а именно входное устройство, компрессор, камеры сгорания и турбины компрессора образуют газогенератор. В этом случае в зависимости от компоновки, газогенератор ГТД может выполняться одновальным или двухвальным с двумя компрессорами низкого и высокого давления.

Можно отметить, что обычно для вертолетов чаще всего используются двухвальные двигатели со свободной турбиной. При этом отсутствие механических связей турбокомпрессора с выходным валом свободной турбины позволяет независимо от него изменять частоту его вращения и оперативно регулировать частоту вращения винта вертолета. Это особенно важно для вертолетных ГТД, что выделяет их по этим особенностям в отдельный класс авиационных двигателей.

Можно отметить,

что обычно для вертолетов чаще всего используются двухвальные двигатели со свободной турбиной. При этом отсутствие механических связей турбокомпрессора с выходным валом свободной турбины позволяет независимо от него изменять частоту его вращения и оперативно регулировать частоту вращения винта вертолета. Это особенно важно для вертолетных ГТД, что выделяет их по этим особенностям в отдельный класс авиационных двигателей.

Таким образом, вертолетный ГТД относится к сложным системам, состоящим из целого комплекса подсистем, узлов и элементов, к которым можно отнести следующие [43, 50]:

- входное устройство;
- компрессор;
- камера сгорания;
- силовой корпус, связывающий турбину и компрессор;
- турбина компрессора, свободная турбина;
- система выхлопа;
- корпус приводов агрегатов;
- топливная, масляная и другие системы и агрегаты.

В приведенной структуре подсистем вертолетного ГТД наиболее важной составляющей является компрессор [43, 45]. Компрессоры ГТД со свободной турбиной выполняются с различными модификациями, а именно осевые, осецентрированные и центробежные. Степень повышения давления для обычных компрессоров ГТД составляет 7 ... 8 раз и 20 ... 25 раз для более мощных. При этом коэффициент полезного действия (КПД) компрессора ГТД достигает значений  $\eta = 0,78$  ... 0,86 и зависит от типа компрессора, степени повышения давления и расхода воздуха. При этом скорость воздуха на выходе из компрессора достигает 0,15 ... 0,3 в зависимости числа Маха [43].

Можно отметить, что для обеспечения работы компрессора с заданными параметрами он состоит из ряда элементов, к которым можно отнести следующие основные элементы [43, 45]:

- наружная оболочка двигателя,
- корпус компрессора,
- статорные лопатки различного назначения,
- роторные лопатки,
- диски,
- лабиринтные уплотнения и другие элементы.

Также следует отметить, что в указанной выше структуре компрессора особое значение занимают лопатки компрессора. Лопатки компрессора это очень сложные и дорогостоящие элементы авиационного двигателя, от которых зависит работа всего ГТД. Лопатки компрессора имеют сложную пространственную форму и расположение на дисках, различные геометрические параметры и условия эксплуатации по ступеням компрессора, кинематические особенности движения относительно воздушно-пылевого потока в проточной части компрессора. А также для обеспечения заданных эксплуатационных параметров ГТД лопатки в компрессоре объединены в определенные группы. При этом заметим, что в компрессоре по его проточной части при движении пылевоздушного потока происходит изменения следующих параметров: концентрации пыле-абразивных частиц, температурных характеристик, скоростных параметров и степени давления. Можно также отметить, что на работу компрессора оказывают влияние поворотные лопатки направляющего аппарата, которые обеспечивают заданные параметры работы авиационного двигателя.

Для обеспечения заданных параметров работы ГТД компрессор содержит различные группы лопаток, а именно [43]:

- поворотные лопатки входного направляющего аппарата (статор);
- поворотные лопатки направляющего аппарата (статор);
- лопатки направляющего аппарата (статор);
- лопатки спрямляющего аппарата (статор);
- рабочие лопатки (ротор).

Более того, эти группы лопаток имеют определенную пространственную структуру, геометрические параметры, особенности расположения и действия абразивно-эрозионного воздушно пылевого потока по проточной части компрессора. Все это приводит к возникновению в процессе эксплуатации ГТД неравномерного абразивно-эрозионного износа лопаток компрессора, который можно характеризовать следующими особенностями:

- неравномерным износом рабочей поверхности лопатки
- неравномерным износом лопаток в группе

- неравномерным износом групп лопаток относительно друг друга.

Далее, рассмотрим более детально современное состояние этого вопроса с точки зрения возникающих неравномерностей износа лопаток. Это необходимо для того, чтобы далее, используя технологические методы отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) повысить ресурс лопаток компрессора с учетом действия этих неравномерностей, возникающих от абразивно-эрозионного износа лопаток.

Анализируя современное состояние вопроса исследования, а именно функциональные особенности работы структурных групп лопаток компрессора вертолетного ГТД, можно отметить, что в работах авторов [1, 3, 10, 20, 34, 38] приводятся основополагающие данные по структуре ГТД, их эксплуатационным параметрам и особенностям состава авиационных двигателей. В этих работах даны общие сведения о применяемых ГТД для вертолетов, приводятся сведения по их режимным, климатическим, высотным, скоростным и другим характеристикам, а также приводятся данные по особенностям состава двигателей, их конструктивному облику и особенностям повышения ресурса отдельных элементов и подсистем вертолетных двигателей.

В настоящее время в двигателестроении вертолетных ГТД наблюдаются тенденции проведения научных исследований по следующим основным направлениям [10, 37, 40, 44, 47, 67, 69]:

- синтезу рациональной структуры, схем и параметров перспективных ГТД;
- повышению эксплуатационно-технических и экономических характеристик авиационных ГТД;
- обеспечению экологических, эргономических и других свойств;
- совершенствованию ГТД на основе новых научных знаний в области газодинамики, теплообмена, горения, прочности и особенностей эксплуатации;
- разработке и внедрения новых, перспективных и технологий нового поколения;
- развитию испытательной базы и методов экспериментальных исследований элементной базы ГТД.



В работе [44] отмечается, что принимаемые решения по созданию ГТД должно обеспечивать:

- минимальные размеры и массу авиационного двигателя при обеспечении заданных параметров их прочности и надежности;
- минимальный уровень вибраций и шума;
- удобство эксплуатации и ремонта, обеспечения эргономических норм двигателей.

Также следует отметить, что в работах [4, 5] приводятся данные по созданию и внедрению перспективных вертолетных ГТД на современных машинах, по перспективам развития их конструктивного облика и новым направлениям в создании элементной базы.

В работах ведущих ученых и специалистов ОАО «Мотор Сич» Богуслаева В.А., Яценко В.К., Жеманюка П.Д., Пухальской Г.В. Павленко Д.В., Бень В.В. [24, 25, 26] выполняются исследования разрушений лопаток компрессора ГТД. При этом уделяется основное внимание абразивно-эрозионному разрушению лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117. Приведенные в этой работе данные показывают, что рабочие поверхности и функциональные элементы (входная и периферийная кромки) пера лопатки разрушаются (изнашиваются) не равномерно. Приведенные в этой работе фотографии показывают, что максимальные эрозионные разрушения формируются в зоне, расположенной на пересечении входной и периферийной кромок. Эти особенности разрушений лопаток обусловлены неравномерным абразивно-эрозионным износом лопаток, что не позволяет восстанавливать лопатки компрессора и существенно повышать их ресурс.

Выполненные исследования, представленные в работах [27, 28, 29, 30], показали, что возникающая неравномерность абразивно-эрозионного разрушения пера лопатки происходит в результате совместного действия следующих факторов:

- особенностей пространственной формы лопатки компрессора;
- пространственным расположением лопаток на дисках компрессора;
- вращением лопаток вокруг продольной оси компрессора;

- особенностей движения пылевоздушного потока по проточной части компрессора;

- особенностей конструкции проточной части компрессора.

Приведенные в диссертационной работе Ганзена М.А. [41] исследования показывают, что возникающие неравномерности износа пера лопаток компрессора увеличивают минимальные радиальные зазоры в лопаточных машинах при эксплуатации ГТД. Это снижает эффективность процесса сжатия в компрессоре, увеличивает потери в ГТД и удельный расход топлива. В работе [65] для повышения эффективности эксплуатации ГТД предлагается выполнять очистку внутренних полостей систем за счет интенсификации движения промывочных средств. Это особенно необходимо выполнять для лопаток компрессора, работающих в сложных эксплуатационных условиях, при наличии большой концентрации пыли, захватываемой ГТД при взлете и посадке вертолета. Это улучшает работу вертолетного ГТД, но не решает вопросов исключения неравномерного разрушения пера и функциональных элементов лопаток компрессора.

В работах [42, 113, 121, 141], ученые и специалисты по проектированию ГТД приводят данные по повышению ресурса авиационного двигателя посредством применения специальных пылезащитных устройств и различных методов защиты. Вместе с тем, эти мероприятия не позволяют снизить неравномерности действия абразивно-эрозионных разрушений лопаток.

Выполненные исследования, приведенные в работе [42], направлены изучения вопросов влияния эксплуатационных условий на работу вертолетных ГТД. В работах [1, 24, 28, 29, 42] приводятся данные по особенностям работы лопаток компрессора в условиях влажности и водности атмосферного воздуха, морских условиях эксплуатации двигателя и воздействий тепловой волны и других эксплуатационных воздействий. А также в этих работах отмечается, что компрессор ГТД содержит различные группы лопаток, а именно: поворотные лопатки входного направляющего аппарата, поворотные лопатки направляющего аппарата, лопатки направляющего аппарата, лопатки спрямляющего аппарата, рабочие лопатки статора. Эти группы лопаток компрессора имеют отличную друг от друга кон-

струкцию и соответственно пространственную форму. То есть в этих работах отмечается, что компрессор ГТД состоит из различных групп лопаток различного назначения. При этом в работе [42] отмечается, что на входе в компрессор действует неравномерное поле скоростей, происходит неравномерное действие эксплуатационных функций и по длине проточной части компрессора происходит неравномерное сепарирование пыли. Это вызывает неравномерность эрозионного износа различных групп лопаток по длине проточной части компрессора.

Значительные исследования особенностей эксплуатации вертолетных ГТД процессов действия абразивно-эрозионных воздействий на лопатки компрессора представлены в работе [42] группы авторов. Здесь, исследователи приводят данные по действию эксплуатационных функций на лопатки компрессора вертолетного двигателя. При этом в данной работе установлено то, что в компрессоре лопатки по своим характеристикам, выполняемым функциям и особенностям их разрушения структурируются по группам. Причем в каждой группе лопаток компрессора имеются свои особенности эрозионного износа поверхностей лопаток, которые обусловлены неравномерностями их износа. Эти неравномерности износа лопаток компрессора обусловлены следующими особенностями:

- неравномерность по перу лопатки;
- неравномерность по проточной части компрессора.

Вместе с тем, авторы работы [42] не представляют данные по особенностям разрушений различных групп лопаток из-за действия приведенных выше неравномерностей разрушения лопаток компрессора.

В работах [93, 94] автор рассматривает вопросы разрушения лопаток статора компрессора и предлагает методы повышения их ресурса. При этом в данных работах рассматриваются особенности абразивно-эрозионного разрушения лопаток статора компрессора в пределах одной группы. Вместе с тем, лопатки компрессора структурированы в несколько групп. Причем в каждой группе действуют свои особенности эксплуатации и разрушений. При этом для повышения ресурса лопаток компрессора в целом необходимо обеспечивать одинаковый их ресурс. Эти вопросы не рассмотрены в представленной работе.

Особый интерес в области особенностей эксплуатации различных групп лопаток ГТУ представляют исследования, приведенные в работах [103, 104]. Здесь, авторы выполняют исследования особенностей действия эксплуатационных воздействий на группы лопаток компрессора и лопаток турбины. При этом авторы устанавливают связи между особенностями и параметрами разрушений этих групп лопаток, а также решают вопросы повышения их ресурса. На базе этих связей в работе обеспечивается повышение ресурса групп лопаток компрессора и турбины. Вместе с тем, приведенные в этих работах данные не устанавливают особенности эксплуатации групп лопаток компрессора. При этом компрессор ГТД обычно структурируется пятью группами лопаток, на которые действуют различные воздействия и при этом происходят различные разрушения лопаток этих групп. Это приводит к неполному использованию эксплуатационного потенциала всех групп лопаток компрессора, что снижает технико-экономические показатели эксплуатации вертолетного ГТД.

Таким образом, выполненный анализ функциональных особенностей эксплуатации лопаток компрессора показал, что система лопаток компрессора образуют различные группы, при этом они имеют различный износ, характеризуемый следующим:

- неравномерностью абразивно-эрозионного износа рабочей поверхности каждой лопатки компрессора;
- неравномерностью износа лопаток компрессора по ступеням в группе;
- неравномерностью износа групп лопаток относительно друг друга.
- возникающие неравномерности износа групп лопаток приводят к неравномерному износу рабочих поверхностей лопатки и неодинаковому разрушению групп лопаток компрессора и неполному их использованию при эксплуатации, что снижает технико-экономические показатели эксплуатации компрессоров ГТД.

## **1.2. Исследование существующих методов и технологий для повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора газотурбинного двигателя**

В настоящее время для повышения качества и ресурса лопаток компрессора газотурбинного двигателя применяется множество различных методов и технологий. Рассмотрим основные из этих технологических методов и применяемые технологии.

Для изготовления лопаток компрессора газотурбинного двигателя применяются различные структурные варианты технологических процессов, алгоритмы которых приводятся в работах ведущих ученых и специалистов [25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 50, 66, 67, 68, 106, 108, 112, 121]. В этих работах приводятся данные по изготовлению лопаток компрессора, представляются технологические процессы их изготовления, даются данные по составлению маршрутных технологических процессов изготовления лопаток различных ступеней. А также в этих трудах выполняется анализ качественных показателей изготовления заготовок для лопаток и обеспечения заданных свойств.

Выполняя анализ представленных выше работ можно отметить, что на базе разработанных методов и технологических процессов обеспечивается возможность реализации заданных одинаковых свойств лопаток для всего компрессора. При этом можно отметить, что компрессор состоит из нескольких групп лопаток, на которые действуют различные эксплуатационные функции. Поэтому для различных групп лопаток компрессора необходимо обеспечивать различные свойства групп лопаток для обеспечения выравнивания их ресурса при эксплуатации. Вместе с тем, в представленных работах не приводятся сведения для решения этих вопросов.

Кроме того, при эксплуатации ГТД рабочую поверхность каждой лопатки компрессора действуют переменные абразивно-эрозионные воздействия, что приводит к неодинаковому разрушению (износу) рабочей поверхности лопатки ком-

прессора. При этом применяемы методы и технологических процессы не позволяют решать вопросы одинакового износа рабочей поверхности лопатки компрессора. Это значительно снижает технологические возможности существующих методов и применяемых технологий изготовления лопаток компрессора.

В работе ученых и специалистов ОАО «Мотор Сич» [24] приводятся данные по изготовлению и отделочно-упрочняющей обработке деталей машиностроения, представлены рекомендации по формированию характеристик поверхностного слоя деталей машин различными методами и даны основы проектирования технологических процессов механической обработки. На базе этих данных обеспечивается возможность изготовления лопаток компрессора и повышения их качества. При этом в работах [25, 26] изложены особенности технологии поверхностного деформационного упрочнения лопаток компрессора ГТД и даны основные характеристики применяемого оборудования и оснастки. Здесь, также рассмотрены основные закономерности формирования параметров качества поверхностного слоя лопаток компрессора различными технологическими методами. Особый интерес в этих работах представляют для решения вопросов повышения качества лопаток компрессора разработанные математические модели коэффициентов упрочнения лопаток ГТД различными методами, позволяющими прогнозировать их эффективность на стадии разработки технологических процессов. А также в работах [28, 29, 30] приводятся комплексные данные, направленные на решение технологических вопросов производства авиационных двигателей, а именно следующих:

- основ технологии изготовления лопаток;
- основ проектирования технологических процессов изготовления деталей авиационных двигателей и технологической подготовки производства;
- методов обработки деталей авиационных двигателей.

Представленные в этих работах данные и выполненные исследования позволяют обеспечивать лопаткам компрессора высоких параметров качества. Вместе с тем, выполненный анализ приведенных в этих работах результатов исследований показывает, что на базе существующих технологий невозможно обеспечивать изменяющиеся свойства поверхностей пера лопатки, не позволяют обеспечи-

вать изменяющиеся свойства лопаток в каждой группе и между группами - в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций. Это обусловлено тем, что для различных ступеней лопаток применяются одинаковые структуры технологических процессов, обеспечивающие одинаковые свойства лопаток на которые действуют различные эксплуатационные воздействия. При этом для различных ступеней лопаток могут использоваться технологии, обеспечивающие различные по ступеням свойства лопаток. Однако эти технологии не имеют связей между собой, поэтому для различных групп лопаток применяются не связанные технологии. Все это снижает эксплуатационные свойства лопаток компрессора в целом и технико-экономические показатели эксплуатации ГТД.

Можно отметить, что глубокие исследования в области отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора ГТД приведены в работе [25], в которой рассмотрены вопросы современного состояния отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора, приведены методики оценки их выносливости и структурирования технологических процессов. А также в этой работе исследованы технологические особенности обеспечения несущей способности лопаток компрессора ГТД для различных ступеней. При этом рассмотрены конкретные методы отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора, а именно следующие:

- виброабразивная обработка пера лопатки;
- виброобработка лопаток;
- дробеструйное упрочнение шариками крупногабаритных лопаток;
- упрочнение лопаток шариками в ультразвуковом поле;
- пневмодробеструйное упрочнение шариками;
- ионно-плазменное азотирование;
- магнитно-абразивное полирование лопаток и другие.

Эти методы позволяют комплексно решать вопросы повышения качества лопаток компрессора ГТД. А также на базе этих методов появляется возможность реализовывать комбинированные методы отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора. Комбинированный метод обработки изделий это совокуп-



ность не менее двух различных методов обработки, направленных на комплексное обеспечение свойств лопаток компрессора. Вместе с тем, все эти методы позволяют решать вопросы обеспечения только одинакового свойства поверхностей пера лопатки, одинаковых свойств лопаток в группе и свойств лопаток между группами. При этом в компрессоре на каждую поверхность лопатки, на каждую группу лопаток и на совокупность групп действуют переменные эксплуатационные воздействия. Поэтому каждая поверхность лопатки, лопатки в группе и группы лопаток должны иметь переменные свойства в зависимости от особенностей их эксплуатации в компрессоре. Это мероприятие позволит обеспечить равный ресурс всех лопаток компрессора и его повышение в процессе эксплуатации ГТД. Поэтому представленные в этой работе данные не позволяют решать вопросы обеспечения переменных свойств лопаток компрессора по каждой лопатке, по лопаткам каждой группы и по лопаткам между группами. Это снижает параметры качества лопаток компрессора и не позволяет значительно повышать их ресурс в условиях действия нескольких уровней неравномерностей эксплуатационных воздействий.

Также можно отметить, что в работе [24] выполнены исследования по структурному состоянию и фазовому составу материала лопатки при упрочнении ее пера, а также здесь определяется условный предел текучести поверхностного слоя лопатки кинематическим индентированием. Это очень важные вопросы для обеспечения заданных параметров качества пера лопатки и его материала. Вместе с тем, эти подходы и применяемые методы не позволяют обеспечивать изменяющиеся свойства пера лопатки в условиях действия неравномерностей эксплуатационных воздействий.

Выполненные в работе [24] исследования позволили разработать технологические рекомендации по применению комплексной обработки лопаток компрессора из титановых сплавов. Эти рекомендации заключаются в комплексном применении методов отделочно-упрочняющей обработки и организационно-технических мероприятий по повышению несущей способности лопаток компрессора, которые заключаются в следующем:

- комплексная обработка поверхностей пера лопатки является необходимой совокупностью финишных операций повышения качества поверхностного слоя;

- для устранения поперечных рисок при ОУО на входной и выходной кромках лопаток необходимо продольным полированием (глянцеванием) тщательно доводить эти кромки;

- после ионно-плазменного упрочнения лопаток целесообразно рекомендовать последующее скользящее пневмодробеструйное упрочнение поверхностей.

Приведенные исследования позволяют решать вопросы повышения параметров качества поверхностного слоя лопатки компрессора, при этом обеспечиваются равномерные свойства поверхностей лопаток и не позволяют реализовывать переменные свойства поверхностей лопаток в условиях действия неравномерных и не одинаковых эксплуатационных воздействий в ГТД.

Можно отметить, что в работе [24, 26] приводятся сведения по повышению качеству поверхностного слоя лопаток компрессора. Здесь, приводятся данные по влиянию виброгалтовки на рассеивание долговечности лопаток компрессора из стали 14X17H2Ш, выполняется расчет коэффициентов упрочнения и характеристик поверхностного слоя, а также выполняется обоснование факторов, влияющих на изменение коэффициента упрочнения посредством алмазного выглаживания. Эти методы позволяют значительно повысить параметры качества лопаток компрессора ГТД. Однако, в условиях действия на поверхности лопаток компрессора неравномерных эксплуатационных воздействий - абразивно-эрозионного характера, значительное повышение их ресурса выполнить не возможно.

Также специалисты ОАО «Мотор Сич» предлагают для повышения абразивно-эрозионных воздействий использовать специальные вакуумные ионно-плазменные покрытия равной толщины в комбинации с ионным азотированием поверхностного слоя материала лопаток компрессора [24]. Эти мероприятия существенно повышают ресурс лопаток компрессора. Однако, в следствии действия на поверхности пера лопатки компрессора неравномерных эксплуатационных воздействий, возникают неравномерные износы покрытий пера лопатки, которые снижат эффект действия этих покрытий. При этом данные неравномерности изно-

са покрытий приводят к не полному использованию эксплуатационного потенциала всего покрытия в целом, что приводит к снижению ресурса лопаток.

В работе Бородавко В.И. [32] рассмотрена нетрадиционная технология изготовления пакета лопаток турбин из жаропрочной высоколегированной трудно-свариваемых сталей. Представлено преимущество применения электронно-лучевой сварки при производстве пакета лопаток вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде. А также рассмотрена специально спроектированная технологическая оснастка для автоматизации процесса сварки пакета лопаток. Приведены результаты лазерного сканирования геометрии пакета лопаток с помощью координатно-измерительного устройства. Выполненные исследования показали, что термические деформации находятся в пределах допуска на данной операции и полностью исключают последующую механическую обработку. Представленные в этой работе результаты показали, что разработанная технология изготовления пакета лопаток с использованием концентрированных потоков энергии [32], позволяет повысить качество, снизить количество брака и себестоимость изготовления пакета лопаток.

Данные исследования и приведенные результаты, которые представлены в работе [32], позволяют повысить параметры качества лопаток. Однако эти исследования позволяют решать вопросы повышения качества лопаток и обеспечивать необходимые их свойства с одинаковыми физико-механическими параметрами рабочих поверхностей. Это не позволяет решать вопросы обеспечения свойств лопаток компрессора в зависимости от действия изменяющихся эксплуатационных абразивно-эрозионных воздействий. Поэтому указанные особенности ограничивают технологические возможности применения результатов этой работы.

В работах [66, 67, 68] группы авторов под руководством профессора, д.т.н. Макарова В.Ф. представлены результаты теоретических исследований устойчивости процесса глубинного шлифования лопаток газотурбинного двигателя. Для решения этих вопросов в представленных трудах используются математические модели теплодинамической системы шлифовального станка. Данная модель учи-

тывает динамические характеристики обрабатываемого станка, которые влияют на стабильность и предел выносливости лопаток авиационного двигателя.

Выполненные исследования, представленные в работах [66, 67, 68], а также в работе [97], позволяют повышать качество функциональных элементов и рабочих поверхностях лопаток. Однако, эти результаты не позволяют обеспечивать рабочим поверхностям лопаток компрессора изменяющиеся и неравномерные свойства пера, что ограничивает технологические возможности представленных в приведенных работах результатов.

Для повышения качества лопаток компрессора необходимы нетрадиционные технологические процессы. В работах [108, 112, 121] представлены результаты, направленные на синтез нетрадиционных структурных вариантов технологических процессов по повышению качества лопаток ГТД. При этом в работе [108] приводятся сведения направленные на создание технологии получения качественных поверхностей турбинных лопаток струйной фокусированной электролитно-плазменной обработкой. Здесь, выполняется оценка технологических возможностей и результатов проведенных экспериментов, которые позволяют рекомендовать технологам возможность применения метода струйной электролитно-плазменной обработки для процесса финишной обработки лопаток. Развитие предлагаемой технологии в целом позволяет повысить точность обработки и снизить затраты на разработку технологических процессов получения лопаток ГТД. Также можно отметить, что исследование процесса подготовки поверхностей деталей турбины авиационных двигателей под газотермическое напыление приводятся в работе [112].

Все эти исследования, представленные в работах [108, 112, 121] направлены на повышение качества функциональных элементов и поверхностей лопаток ГТД. При этом приведенные в этих работах данные позволяют обеспечивать технологическими методами постоянные свойства лопаток и не позволяют реализовывать свойства пера лопатки с изменяющимися свойствами в зависимости от действия эксплуатационных функций в компрессоре. Это снижает технико-экономические свойства лопаток компрессора ГТД.

Одним из видов повышения ресурса лопаток компрессора ГТД является применение различных видов покрытий рабочих поверхностей пера лопатки. Особенно эффективно для повышения ресурса лопаток компрессора применение вакуумных ионно-плазменных покрытий. В работах [10, 13, 25, 26, 37, 49, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 63, 64, 98, 110, 112, 127, 130, 137, 152, 153] приводятся сведения по реализации различных видов покрытий лопаток и изделий машиностроения с помощью различных методов. Эти покрытия позволяют значительно повышать ресурс лопаток при действии абразивно-эрозионного износа в компрессоре ГТД. Вместе с тем, эти покрытия наносятся равной толщины или имеют одинаковые физико-механические свойства. При этом в условиях действия неравномерного и неодинакового износа, эти покрытия не эффективны, так как они быстро изнашиваются в зонах максимального износа и остаются неизношенными в зонах с минимальным действием износа. Поэтому применение этих покрытий для лопаток компрессора является неэффективным. Более того, следует заметить, что компрессор ГТД состоит из нескольких различных групп лопаток, на которые действуют различные по характеру разрушения.

Также следует отметить, что для лопаток компрессора широко применяют различные физические [14, 31, 59, 125], химические [64, 105, 137, 142], термические [24, 120, 140, 144] и комбинированные [14, 15, 21, 25, 35, 38, 44, 51, 61, 62, 98, 108, 119, 128, 151, 152, 153, 154] методы отделочно-упрочняющей обработки лопаток и деталей машин, а также используется легирование поверхностного слоя [10, 151] для упрочнения деталей. Эти методы существенно повышают физико-механические свойства лопаток компрессора. Однако данные методы обеспечивают только одинаковые и постоянные физико-механические свойства исполнительных поверхностей лопаток компрессора. Они не позволяют решать вопросы обеспечения свойств лопатки и групп лопаток в зависимости от действия на них эксплуатационных функций. Это снижает технологические возможности приведенных методов и ресурс лопаток при эксплуатации.

Можно отметить, что в работе профессоров Абраимова Н.В. и Елисеева Ю.С. приводятся данные по особенностям эксплуатации лопаток и действия раз-

личных видов эксплуатационных воздействий. В этой работе приведены особенности реализации технологий диффузионного и конденсационного нанесения покрытий, термомеханического их упрочнения. А также предложены способы и алгоритмы восстановления покрытий на рабочих поверхностях лопаток из жаростойких сталей. Однако эти методы позволяют решать вопросы обеспечения заданных свойств лопаток с одинаковыми свойствами их рабочих поверхностей. Это снижает эксплуатационные возможности лопаток компрессора в условиях действия неравномерных воздействий.

В работе ведущих специалистов Демина Ф.И., Проничева Н.Д., Шитарева И.Л. [50] приведен анализ точности и параметров качества изготовления лопаток компрессора ГТД. В этой работе производятся комплексные данные по структурно-технологическим параметрам обеспечения свойств лопаток, формированию принципиального плана технологического процесса изготовления лопаток с заданными свойствами, а также синтезу структуры маршрутной технологии обеспечения свойств лопаток компрессора. В работе Полетаева В.А. [106] рассмотрены особенности технологии обработки лопаток компрессора на многоцелевых станках, применения электрофизических методов их обработки. А также в этой работе изложены некоторые вопросы упрочнения поверхностей лопаток, нанесения покрытий и контроля. На базе сведений, приведенных в этих работах, обеспечивается возможность реализации заданных параметров свойств лопаток компрессора с одинаковыми свойствами. При этом в условиях действия неравномерных воздействий по поверхности пера лопатки и по различным группам лопаток компрессора применение этих технологий для повышения ресурса лопаток в ряде случаев не эффективно.

В диссертационной работе Михайлова Д.А. [93] и работах ученых [73, 75, 76] приведены данные по обеспечению функционально-ориентированных свойств лопаток ГТД. На базе этих данных обеспечиваются свойства лопаток компрессора в зависимости от изменяющихся по поверхностям лопатки эксплуатационных функций. Функционально-ориентированные свойства лопатки позволяют полностью ее адаптировать к особенностям действия эксплуатационных функций. Это

позволяет значительно повысить эксплуатационные свойства лопаток. Вместе с тем, в компрессоре лопатки располагаются по группам, и в пределах каждой группы, а также между группами действуют изменяющиеся эксплуатационные воздействия. При этом для обеспечения свойств группам лопаток компрессора необходимы группы технологий, причем эти технологии должны быть комплексными и связными между собой. Это необходимо для того, чтобы обеспечить одинаковый ресурс всех лопаток в группе и между группами в условиях действия различных видов неравномерностей абразивно-эрозионного характера в компрессоре. К сожалению, приведенные в работах [73, 75, 76] рекомендации не позволяют комплексно и связно решать вопросы обеспечения равного ресурса лопаток компрессора. Это ограничивает потенциальные возможности ГТД к дальнейшему повышению ресурса лопаток компрессора.

В работах группы авторов [86, 102, 103, 104] приводятся сведения по обеспечению функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом связей свойств между этими лопатками. Вместе с тем, можно отметить, что компрессора состоит из ряда различных групп лопаток и на эти лопатки и их группы действуют неравномерности абразивно-эрозионного износа трех рангов. Поэтому приведенные в этих работах данные не позволяют решать вопросы обеспечения равного ресурса каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток компрессора - в условиях действия неравномерностей их износа трех рангов.

Таким образом, выполненный анализ существующих методов и технологий для повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора ГТД позволил установить следующее:

- 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;



- применяемые в настоящее время технологии направлены на обеспечение одинаковых свойств лопаток всех ступеней компрессора всех групп лопаток;
- 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 неоднородных износов лопаток трех рангов.

### **1.3. Цель и задачи работы**

Выполненный анализ современного состояния вопроса исследования, проведенные исследования функциональных особенностей работы структурных групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя, а также выполненные исследования существующих методов и технологий для повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора газотурбинного двигателя, позволили сформулировать следующие выводы:

1. В компрессоре ГТД лопатки сгруппированы в различные группы: поворотные лопатки входного направляющего аппарата (статор), поворотные лопатки направляющего аппарата (статор), лопатки направляющего аппарата (статор), лопатки спрямляющего аппарата, рабочие лопатки ротора.

2. На каждую лопатку, группу лопаток и группы лопаток действуют изменяющиеся абразивно-эрозионные эксплуатационные воздействия, которые характеризуются возникновением неравномерностей износа лопаток трех рангов, а именно:

- неравномерностью износа рабочей поверхности каждой лопатки;

- неравномерностью износа лопаток в каждой группе лопаток;
- неравномерностью износа лопаток между различными их группами в компрессоре.

3. Возникающие неравномерности износа лопаток компрессора приводят к неодинаковому износу различных лопаток в компрессоре, неполному их использованию в компрессоре, снижению эксплуатационного потенциала лопаток и технико-экономических показателей ГТД.

4. 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.

5. Применяемые в настоящее время технологии направлены на обеспечение одинаковых свойств лопаток всех ступеней компрессора всех групп лопаток.

6. 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 неоднородных износов лопаток трех рангов.

На основании этих выводов в данной работе определена цель диссертационной работы.

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 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.

Эти задачи решаются в данной диссертационной работе.

## РАЗДЕЛ 2

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА СТРУКТУРНЫХ ГРУПП ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

#### 2.1. Анализ видов групп лопаток осевого компрессора и их классификация

Можно отметить, что компрессор ГТД и его составляющие части работают в сложных эксплуатационных условиях, при действии климатических, температурных, абразивно-эрозионных и других воздействиях. При этом научно-технический прогресс и современные особенности создания ГТД непрерывно требуют их совершенствования, повышения качества, надежности и других параметров. Это приводит к необходимости совершенствования составляющих компрессора ГТД.

В этих условиях корпусные детали компрессора должны иметь тонкостенную пространственную форму с необходимыми ребрами жесткости, фасонными поверхностями рабочих контуров, облегчениями, заданными выемками, связями и другими элементами. Рабочий тракт компрессора ГТД выполняется с минимальными значениями отклонений формы от номинального значения. При этом лопатки компрессора должны иметь сложную пространственную форму с малыми размерами по толщине профиля и высокоточными элементами замковой части [50]. А также и другие составляющие элементы компрессора должны иметь совершенные формы и физико-механические свойства. Кроме того, компрессор ГТД должен иметь аэродинамические свойства, высокую надежность составляющих элементов, модульную структуру, заданные эксплуатационные параметры и другие характеристики.

Можно отметить, что основными элементами компрессора являются лопатки, которые в своей совокупности с составляющими элементами компрессора обеспечивают заданную часть термодинамического цикла Брайтона, которая определяется степенью повышения давления, уровнем потерь, коэффициентом полезного действия и другими параметрами.

В данной работе планируется рассмотреть особенности работы осевых компрессоров вертолетных ГТД.

Осевой компрессор вертолетного ГТД имеет сложную структуру лопаток, которые структурированы в определенные группы:

- группа поворотных лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) (статор);
- группа поворотных лопаток направляющего аппарата (НА) (статор);
- группа лопаток направляющего аппарата (НА) (статор);
- группа лопаток спрямляющего аппарата (СА) (статор);
- группа рабочих лопаток (ротор).

Каждая из этих групп выполняет свои определенные эксплуатационные функции. При этом на лопатки каждой группы действуют свои определенные эксплуатационные функции, которые вызывают различный абразивно-эрозионный износ рабочих поверхностей и функциональных элементов лопаток различных групп. Это обусловлено следующими особенностями:

- пространственной формой и расположением лопаток каждой группы и ступени;
- кинематикой движения рабочих лопаток статора;
- особенностями движения пылевоздушного потока по проточной части компрессора;
- особенностями концентрации пыли абразивного потока по тракту компрессора;
- пространственной формой и характеристиками проточной части компрессора.

На рисунке 2.1 представлена гипотетическая схема структуры лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117. Данный ГТД имеет пять групп лопаток, а именно: поворотные лопатки ВНА, поворотные лопатки НА, лопатки НА (статор), лопатки СА, рабочие лопатки ротора. Здесь  $v_{ij}$  – обозначает количество лопаток в  $i$  – ой группе ступеней  $j$  – ой заданной ступени.

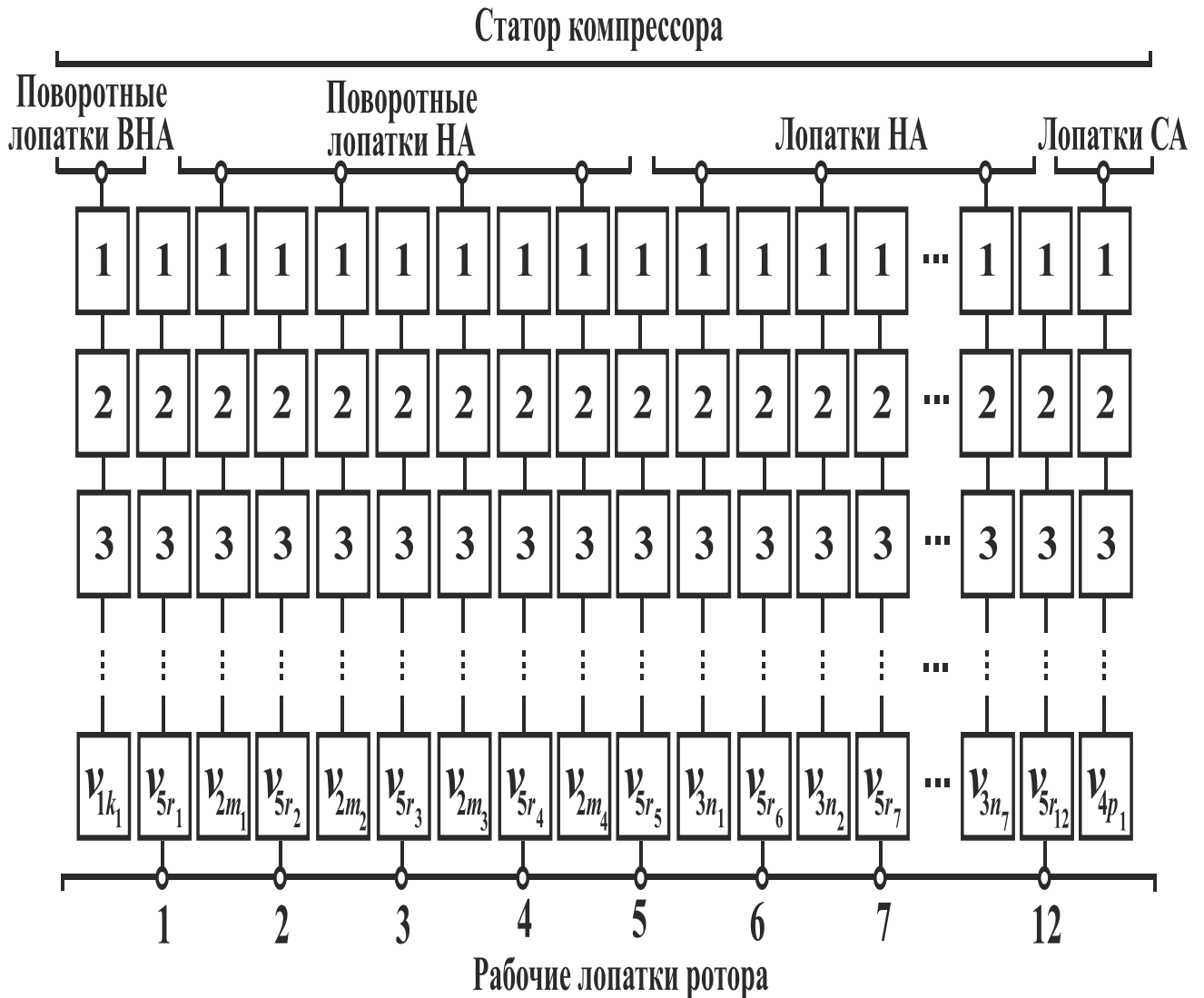


Рисунок 2.1. Гипотетическая схема структуры лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117

В авиационном вертолетном двигателе модели ТВ3-117 (рисунок 2.1) на входе в компрессоре монтируются поворотные лопатки ВНА, затем - группа поворотных лопаток НА, потом - группа лопатки НА, и на выходе компрессора, располагаются лопатки СА. Указанные группы лопаток устанавливаются с использо-

ванием корпуса статора компрессора. Статор компрессора имеет группу рабочих лопаток ротора, состоящую из 12 ступеней лопаток (рисунок 2.1).

В качестве примера, на рисунке 2.2. показан общий вид некоторых вариантов поворотных лопаток НА нескольких ступеней ГТД модели ТВ3-117. В этом

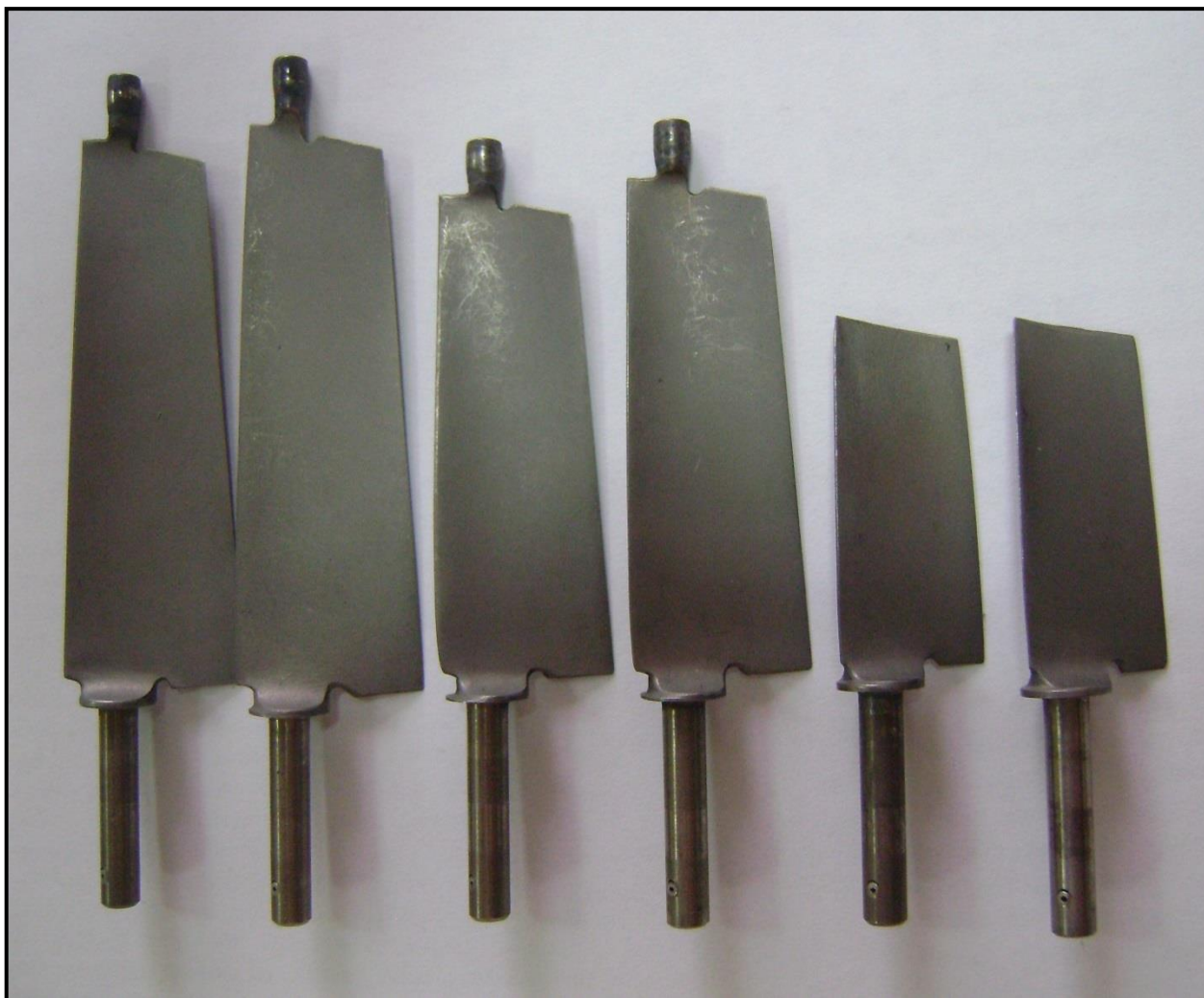


Рисунок 2.2. Общий вид поворотных лопаток НА нескольких ступеней ГТД модели ТВ3-117

двигателе установлены 4 ступени поворотных лопаток НА.

На рисунке 2.3 приведен общий вид лопаток НА статора ГТД модели ТВ3-117. Здесь показано: на рисунке 2.3, а – лопатки одной ступени на бандаже; на рисунке 2.3, б – лопатки нескольких ступеней. Данная группа лопаток НА монтируется на специальных бандажах.

На рисунке 2.4 представлен общий вид рабочих лопаток ротора компрессора ГТД модели ТВ3-117. Эта группа лопаток состоит из 12 ступеней. Именно эти

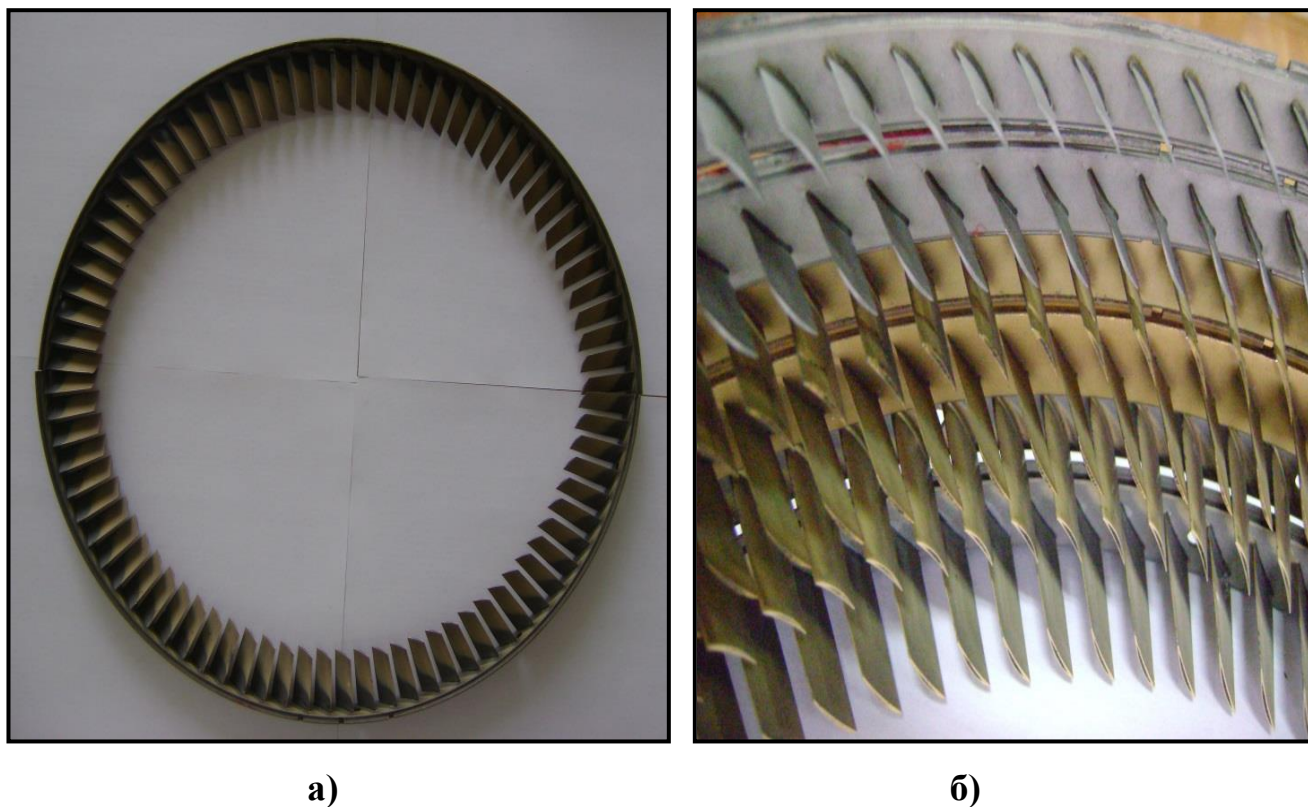


Рисунок 2.3. Общий вид лопаток НА статора ГТД модели ТВ3-117:

а – лопатки одной ступени на бандаже, б – лопатки нескольких ступеней

лопатки работают в особо сложных условиях эксплуатации при действии изменяющихся по длине проточной части компрессора эксплуатационных воздействий.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить следующее:

1. Для обеспечения заданных параметров работы вертолетного ГТД, его компрессор имеет множество лопаток различного назначения.
2. Множество лопаток компрессора вертолетного ГТД структурированы в подмножества лопаток, которые образуют группы лопаток.
3. Эти элементы структурированы в ступени лопаток и группы ступеней различного назначения.
4. Группы ступеней компрессора подразделяются на следующие виды:



- группа поворотных лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) (статор);
- группа поворотных лопаток направляющего аппарата (НА) (статор);
- группа лопаток направляющего аппарата (НА) (статор);
- группа лопаток спрямляющего аппарата (СА) (статор);
- группа рабочих лопаток (ротор).

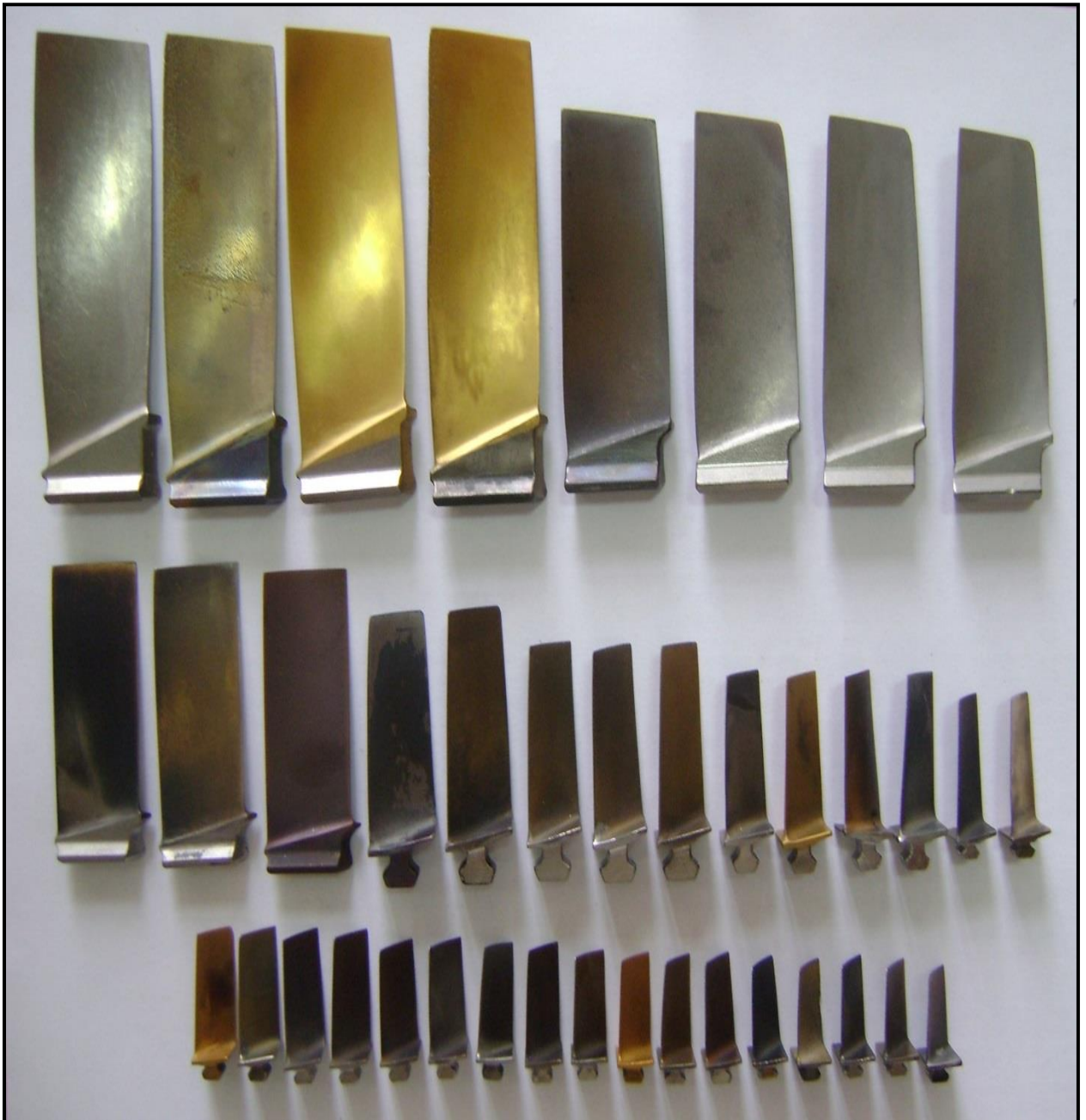


Рисунок 2.4. Общий вид рабочих лопаток ротора 12 ступеней ГТД модели ТВ3-117

Проведенные исследования позволили установить следующее:

1. ГТД имеет сложную структуру и состоит из множества элементов (лопаток), узлов и подсистем. Эти элементы структурированы в ступени лопаток, группы ступеней и подсистемы.

2. 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). Неравномерность действия эксплуатационных воздействий на структурные элементы ГТД можно оценивать неравномерностями различных рангов. Например, в компрессоре ГТД модели ТВЗ-117 действуют неравномерности 3-х рангов [89, 90, 91], вызванные эрозионно-абразивным износом. В целом на элементы, узлы и подсистемы ГТД действует определенная структура эксплуатационных функций.

3. Существующие традиционные методы повышения ресурса ГТД обеспечивают дальнейшее повышение его ресурса в условиях действия неравномерностей эксплуатационных воздействий. Однако эти методы не позволят значительно повышать ресурс ГТД так как здесь, имеются определенные ограничения. При этом невозможно обеспечить повышение полного эксплуатационного потенциала ГТД и адаптации его к особенностям эксплуатации.

4. Для повышения ресурса ГТД, работающего в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций и соответственно неравномерных разрушений элементов, узлов и подсистем, необходимо обеспечивать специальные неравномерные их свойства, причем в соответствии с действием эксплуатационных функций. Это возможно выполнять на основе применения функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [74].

5. Обеспечение ФОС на базе ФОТ позволяет исключить влияние неравномерного действия эксплуатационных функций и повысить ресурс ГТД. При этом применяя функционально-ориентированные покрытия [88] обеспечивается воз-

возможность повышения общего ресурса ГТД за счет увеличения межремонтного ресурса элементов и количества их восстановлений в процессе эксплуатации.

6. Главным в применении ФОР для повышения ресурса ГТД является то, что создаются условия для повышения полного эксплуатационного потенциала ГТД и адаптации его элементов, узлов и подсистем к особенностям эксплуатации.

## **2.2. Определение особенностей эксплуатации каждой лопатки в ступени осевого компрессора, лопаток в группе между номерами ступеней и лопаток между видами групп**

Анализируя конструктивную схему рисунка 2.5 [89, 90, 91] можно отметить, что осевой компрессор ГТД модели ТВ3-117 имеет определенную структуру лопаток, состоящую из пяти групп лопаток, выполняющих свои эксплуатационные функции:

1. Группа лопаток ВНА (1 ступень).
2. Группа поворотных лопаток НА статора (4 ступени).
3. Группа лопаток НА статора (8 ступеней).
4. Группа лопаток спрямляющего аппарата (1 ступень).
5. Группа лопаток ротора (12 ступеней).

Рабочий процесс вертолетного турбовального двигателя (рисунок 2.6) гипотетически соответствует идеальному термодинамическому циклу Брайтона [43] с подводом  $Q_1$  и отводом  $Q_2$  теплоты при постоянных давлениях и изоэнтропическом сжатии (кривая  $A-B$ ) и расширении (кривая  $C-D$ ). Здесь, в качестве рабочего тела рассматривается воздух с удельной теплоемкостью  $c_p$  и показателем изоэнтропы  $k$ , молекулярный состав которого не меняется.

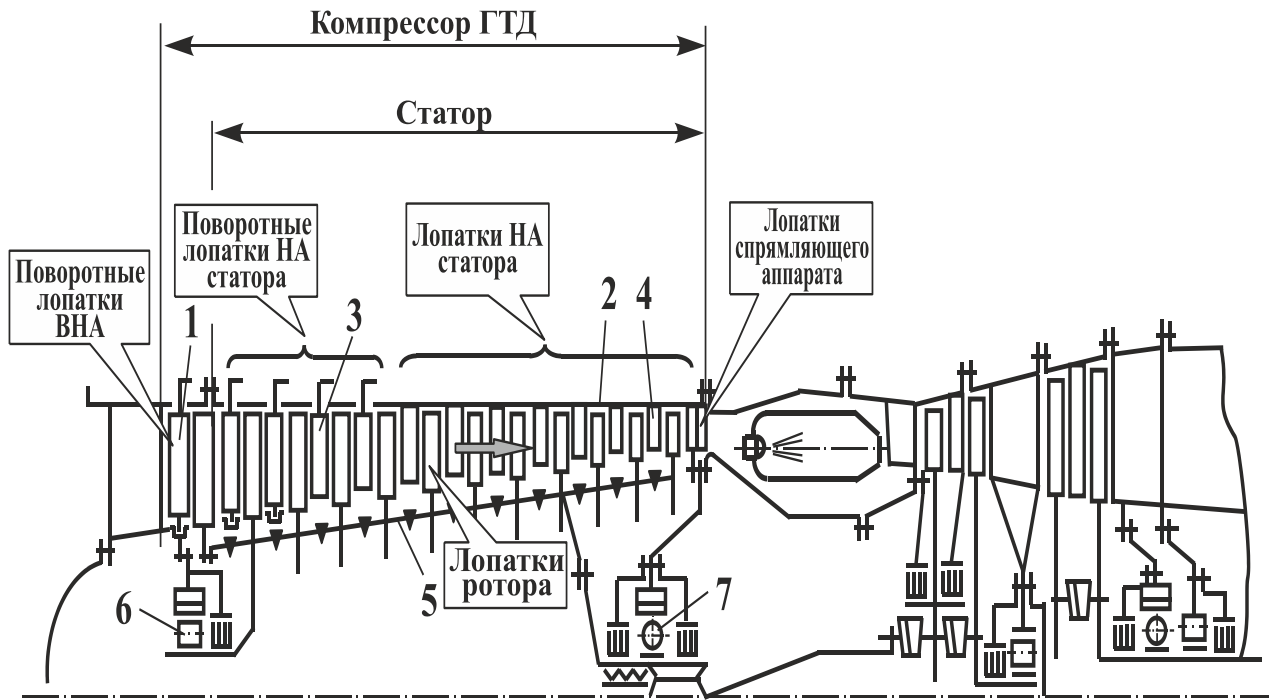


Рисунок 2.5. Конструктивная схема вертолетного ГТД модели ТВ3-117: 1 – поворотные лопасти входного направляющего аппарата (ВНА), 2 – статор компрессора, 3 – поворотные лопасти направляющего аппарата (НА) статора, 4 – лопасти НА статора, 5 – ротор компрессора, 6 – передняя радиальная опора, 7 – задняя радиально-упорная опора

На рисунке 2.6 показана диаграмма идеального цикла Брайтона. Здесь, приведены данные для степени повышения давления  $\pi_{сж} = p_b/p_a = 12$ , максимальной температуры цикла  $T_c = 1600$  К и температуры начала сжатия  $T_a$  и степени повышения температуры  $\theta_{II} = 1,73$ . Для ГТД модели ТВ3-117  $\pi_{сж} = 9,9$ . Получаемая при этом работа  $L_{уд}$  является удельной, поскольку цикл рассматривается для 1 кг массы рабочего тела. Она соответствует заштрихованной площади рисунка 2.6, которая равна разности работ в турбине (турбинах) и сжатия в компрессоре.

На основании диаграммы рисунка 2.6, для осевого компрессора важнейшим является обеспечение параметров сжатия газозоудного потока проточной части в соответствии с кривой *A-B*. Однако, на практике идеальный цикл всегда отли-

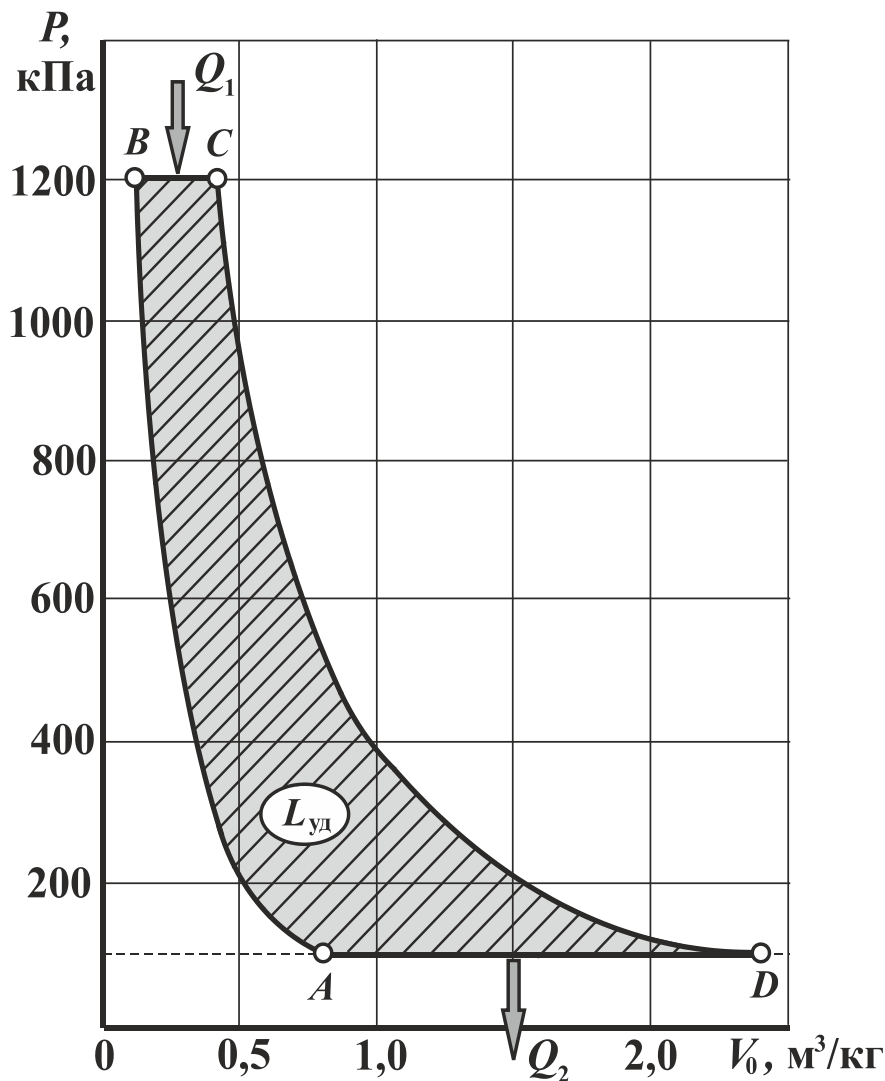


Рисунок 2.6. Диаграмма идеального цикла Брайтона

основном из-за эрозионно-абразивного их износа и действия целого комплекса других эксплуатационных воздействий.

Процессы увеличения зазоров проточной части осевого компрессора можно рассматривать системно на базе модели эксплуатационных преобразований свойств лопаток компрессора (рисунок 2.7). На рисунке 2.7 показано:  $V$  – вход (свойства лопаток до эксплуатационных воздействий),  $W$  – выход (свойства лопаток после эксплуатационных воздействий),  $M$ ,  $E$ ,  $I$  – потоки эксплуатационных воздействий материального, энергетического и информационного типов, соответственно. Здесь, можно отметить, что под действием потоков эксплуатационных

чается от реального термодинамического цикла. На это оказывает влияние целый комплекс различных параметров. Важнейшие из них это постоянно увеличивающиеся зазоры между лопатками ротора и статора, лопатками ротора и корпусом компрессора и лопатками статора и ротором. С увеличением зазоров проточной части компрессора снижаются все параметры термодинамического цикла. Увеличение зазоров между лопатками и элементами проточной части компрессора происходит в

воздействий происходит преобразование начальных свойств лопаток в конечные,

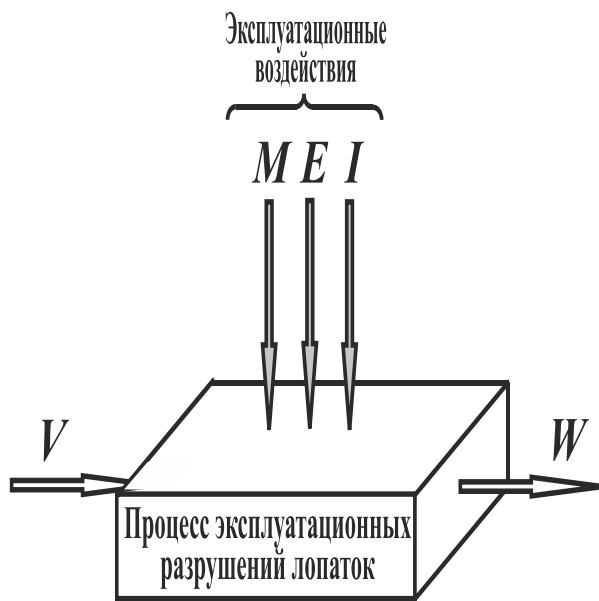


Рисунок 2.7. Системная модель эксплуатационных преобразований свойств лопаток компрессора

структурной схемы, представленной на рисунке 2.9. Здесь показано, что осевой компрессор имеет пять групп лопаток.

Можно отметить, что процесс действия эксплуатационных воздействий потоков среды и возникающих при этом разрушений лопаток компрессора имеет определенные особенности. А именно, этот процесс обусловлен неравномерными действиями на элементы лопатки, на лопатки группы и лопатки входящие в различные виды их групп. Эти особенности неравномерных действий и разрушений можно характеризовать следующими неравномерностями:

- неравномерность 1-го ранга (неравномерность по элементам лопатки),
- неравномерность 2-го ранга (неравномерность по номерам ступеней),
- неравномерность 3-го ранга (неравномерность по видам групп ступеней).

Следует отметить, что эти неравномерности приводят к неравномерным разрушениям лопаток осевого компрессора. Эти неравномерности усложняют процесс применения технологических методов повышения ресурса эксплуатации лопаток компрессора. Вместе с тем, для повышения ресурса лопаток компрессора

то есть происходит разрушение лопаток и элементов проточной части компрессора, при этом зазоры между элементами проточной части компрессора увеличиваются.

На рисунке 2.8 показаны особенности изменения параметров потока в проточной части компрессора: 1 – давление, 2 – температура, 3 – скорость. Если проанализировать эти особенности (рисунок 2.8) действия эксплуатационных воздействий потоков среды и разрушений пяти каскадных групп лопаток компрессора, то этот процесс можно представить в виде

необходимо рассматривать особенности их разрушения в едином комплексе и из этих условий обеспечивать свойства лопаток комплексно для всего компрессора.

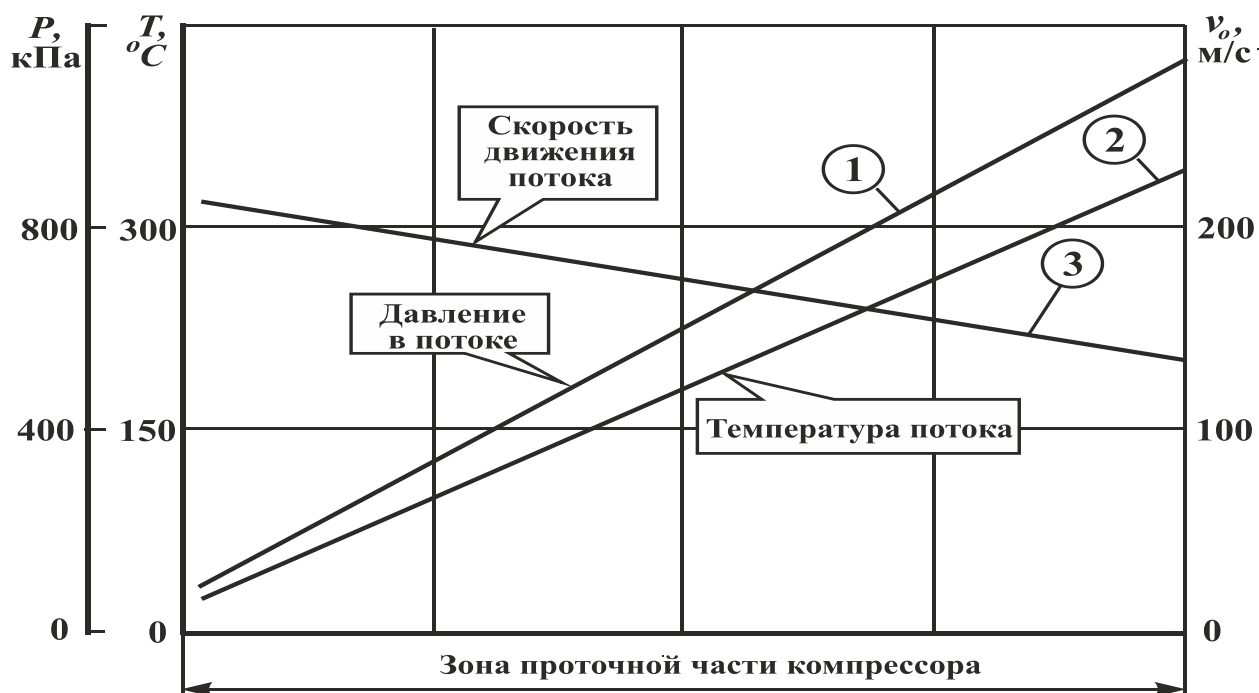


Рисунок 2.8. Особенности изменения параметров потока в проточной части компрессора: 1 – давление, 2 – температура, 3 - скорость

Выполненный анализ видов разрушения лопаток осевого компрессора ГТД позволил установить, что при обеспечении свойств лопаток необходимо учитывать следующие особенности (рисунок 2.9):

- неравномерные воздействия и разрушения лопатки в пределах каждой ступени в одноименном виде групп лопаток;
- неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от номера ступени в одноименном виде групп лопаток;
- неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от вида групп лопаток.

Можно отметить, что основные виды эксплуатационных воздействий среды на лопатки компрессора ГТД можно представить следующим образом (рисунок 2.10):

- газозвушной поток с включениями пыли, пепла, песка, абразива и тому подобных частиц;
- потоки крупных частиц и элементов;



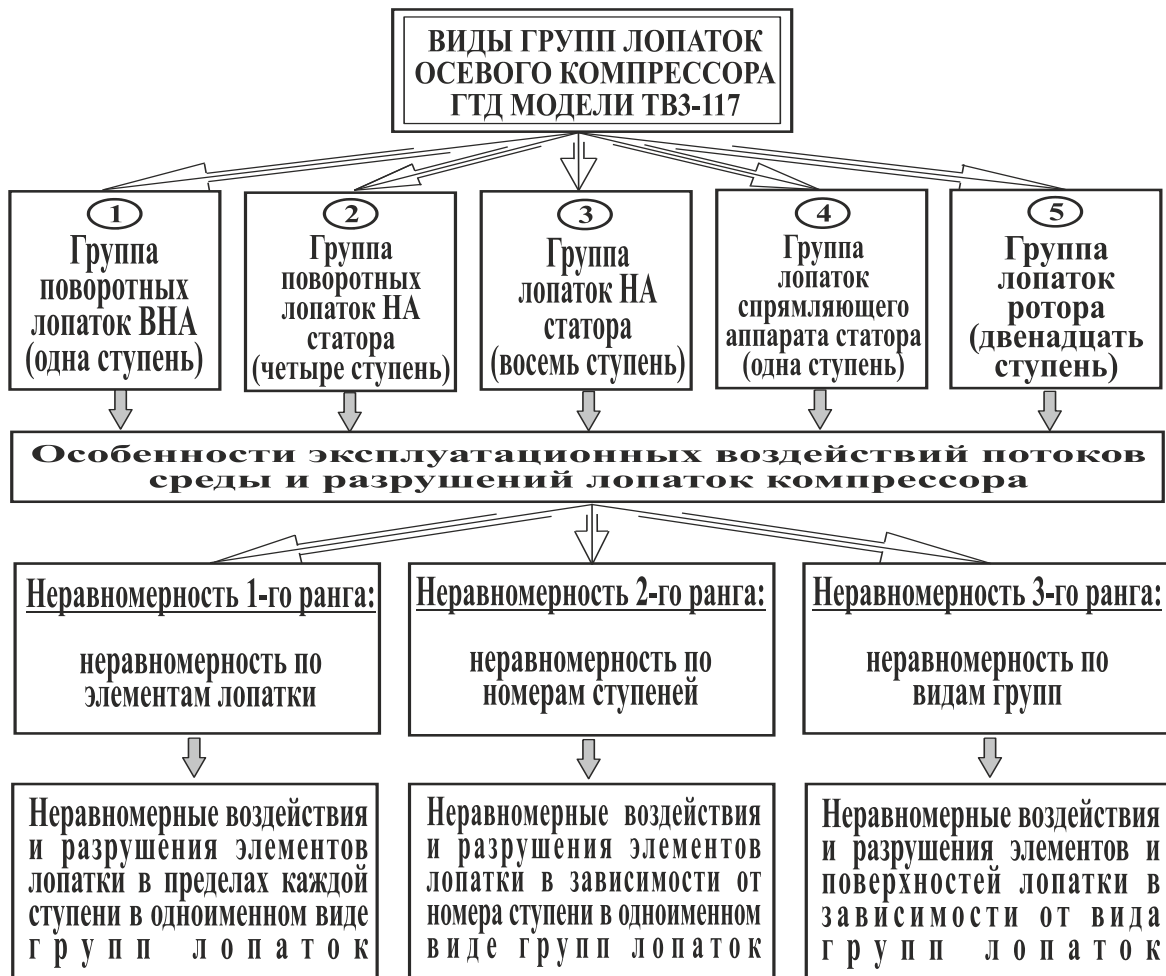


Рисунок 2.9. Виды групп лопаток осевого компрессора ГТД модели ТВЗ-117 и особенности их разрушений

- ударные, динамические и вибрационные нагрузки;
- действие различных видов сил и возникающих при этом напряжений изгиба и кручения, растяжения и сжатия, смятия и среза;
- пар, жидкости, вода, льдинки, снег;
- кислотные, щелочные, солевые и другие виды воздействий;
- температурные и другие воздействия;
- комбинированные воздействия.

На этом множестве эксплуатационных воздействий, наиболее значительные, влияющие на увеличения зазоров в проточной части осевого компрессора, являются воздействия первого вида (рисунок 2.10). То есть постоянно действующие эрозионные воздействия мелких частиц пыли, песка и абразива.



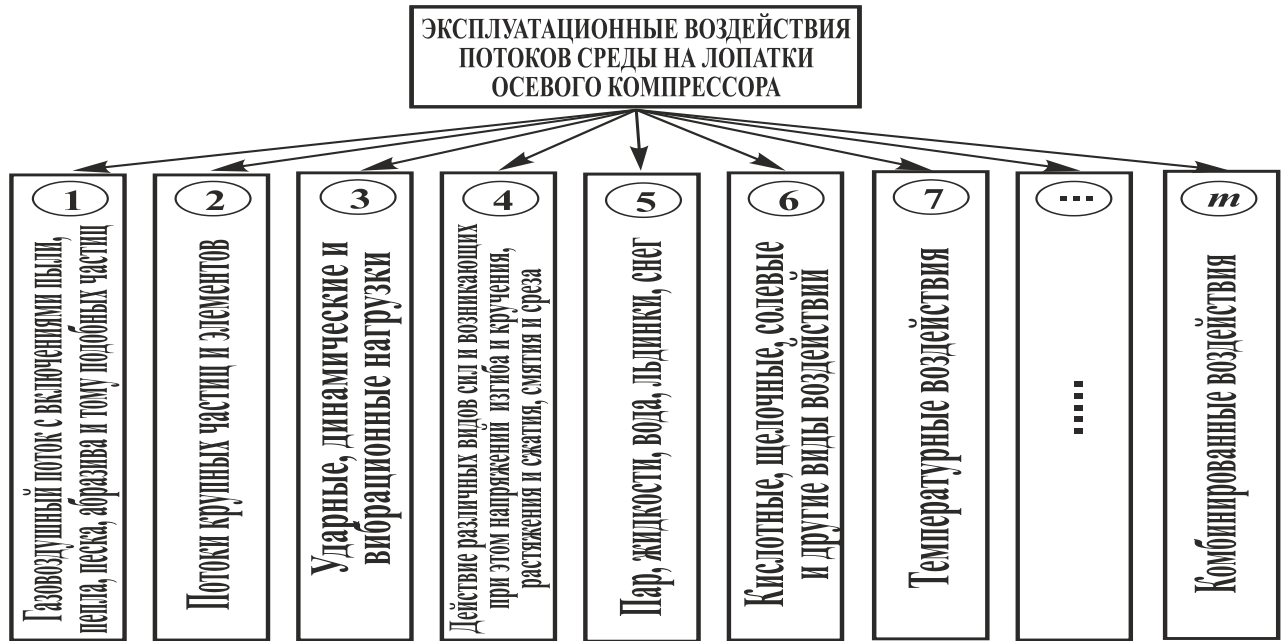


Рисунок 2.10. Виды эксплуатационных воздействий среды на лопатки компрессора ГТД

На рисунке 2.11 показаны основные виды эксплуатационных разрушений лопаток осевого компрессора ГТД:

- эрозионные разрушения поверхностного слоя пера лопатки;
- местные царапины, риски, забоины и вмятины элементов пера лопатки;



Рисунок 2.11. Виды эксплуатационных разрушений лопаток осевого компрессора ГТД

- усталостные и ударные разрушения лопатки от действия различных видов разрушений;
- излом пера лопатки;
- коррозионные разрушения поверхностного слоя пера лопатки;
- разрушения поверхностного слоя от действия кислот, щелочей, солей и других видов воздействий;
- комбинированные разрушения лопатки.

Можно отметить, что на практике обычно возникают комбинированные разрушения лопаток. При этом следует отметить, что эрозионно-абразивный износ лопаток наиболее отрицательно влияет на увеличение зазоров в проточной части компрессора, что и снижает эксплуатационные параметры компрессора ГТД.

Параметры, влияющие на возникновение неравномерностей разрушения ло-

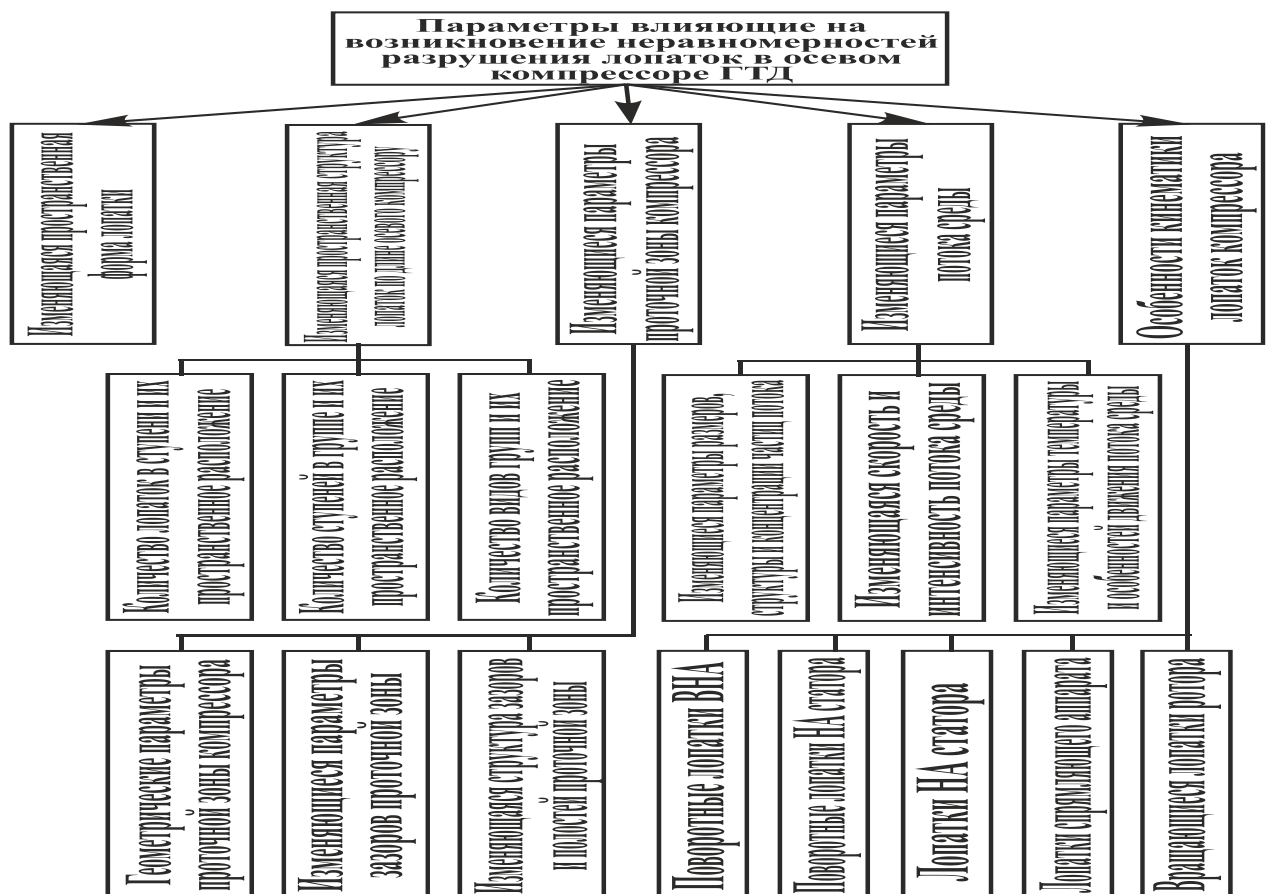


Рисунок 2.12. Параметры, влияющие на возникновение неравномерностей разрушения лопаток в осевом компрессоре ГТД

паток в осевом компрессоре ГТД можно классифицировать следующим образом (рисунок 2.12):

- изменяющаяся пространственная форма лопатки;
- изменяющаяся пространственная структура лопаток по длине осевого компрессора;
- изменяющиеся параметры проточной зоны компрессора;
- изменяющиеся параметры потока среды в проточной части компрессора;
- особенности кинематики лопаток компрессора.

Анализируя классификацию рисунка 2.11 можно отметить, что на возникновение неравномерности разрушения лопаток влияет изменяющаяся их пространственная форма. Перо лопатки имеет сложную пространственную форму [43, 50, 145], которая в определенной мере влияет на особенности эрозионно-абразивного износа элементов пера лопатки.

Также следует учитывать то, что на возникновение неравномерностей разрушений пера лопатки влияет изменяющаяся пространственная структура лопаток по длине осевого компрессора (рисунок 2.12). Эти особенности существенно зависят от следующего: количества лопаток в ступени и их пространственного расположения; количества ступеней в группе и их пространственного расположения; количества видов групп и их пространственного расположения. Кроме того, возникновение неравномерностей разрушений пера лопатки обусловлены изменяющимися параметрами проточной зоны компрессора, которые определяются: геометрическими параметрами проточной зоны; изменяющимися параметрами зазоров проточной зоны [43]; изменяющейся структурой зазоров и полостей проточной зоны. Более того, возникновение неравномерностей происходит из-за изменяющихся параметров потока среды в проточной части компрессора, которые определяются: изменяющимися параметрами размеров, структуры и концентрации частиц потока; изменяющейся скоростью и интенсивностью потока среды; изменяющимися параметрами температуры и особенностями движения потока среды по проточной части компрессора. И наконец, возникновение неравномерностей разрушений лопаток происходит из-за особенностей кинематики лопаток

компрессора, которые определяют - какие элементы компрессора имеют вращение или неподвижность. В целом, действие этих параметров необходимо учитывать комплексно.

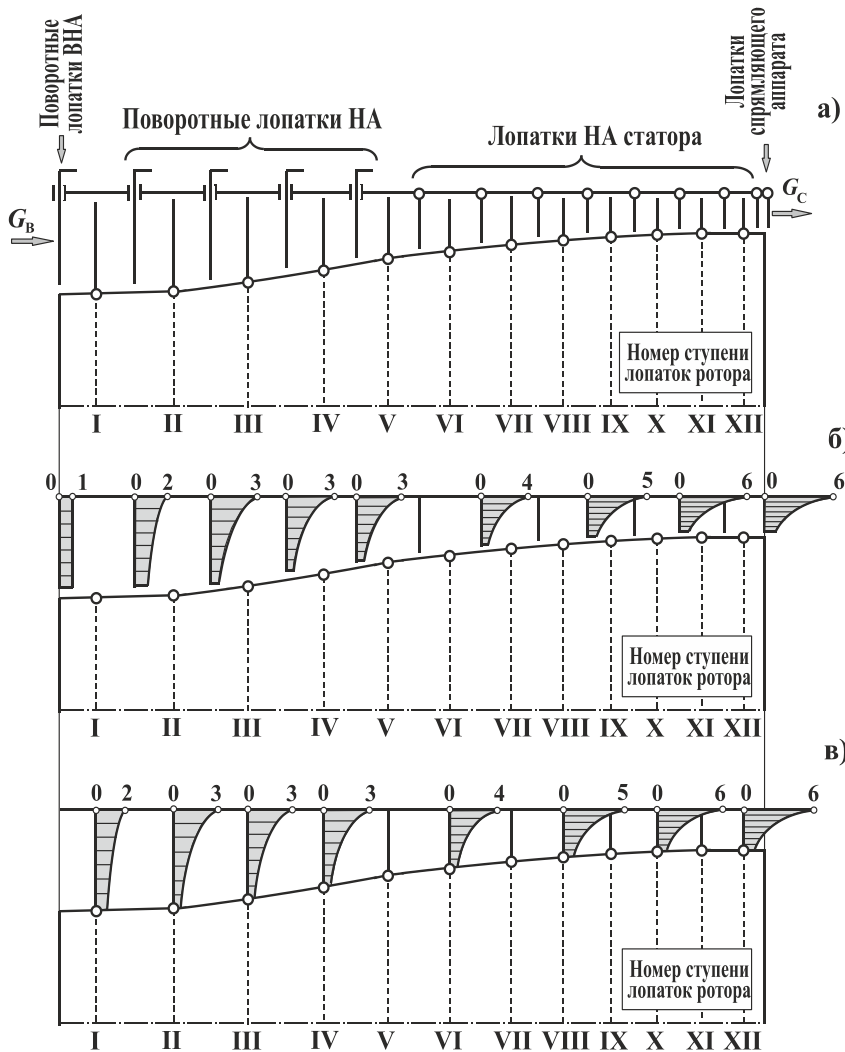


Рисунок 2.13. Структурная схема компоновки лопаток в компрессоре ГТД и эпюры концентрации частиц пыли в единице объема среды потока его проточной части в условиях ее сепарирования к периферии:

а – структурная схема компрессора, б – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ВНА, НА и спрямляющего аппарата статора, в – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ротора (ступени: I, II, III, IV, VI, VIII, X, XII)

В осевом компрессоре турбовального двигателя наиболее значительно изнашиваются рабочие лопатки. На рисунке 2.13 представлена структурная схема компоновки лопаток в компрессоре ГТД и эпюры концентрации частиц пыли в единице объема среды потока его проточной части в условиях их сепарирования к периферии. Здесь показано: рисунок 10,а – структурная схема компрессора, рисунок. 2.13, б – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ВНА, НА и спрямляющего аппарата статора, рисунок 2.13, в – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ротора (ступени: I, II, III, IV, VI, VIII, X, XII).

Можно отметить, что эпюры концентрации частиц пыли представлены для зон поворотных лопаток

ВНА, поворотных лопаток НА статора, лопаток - трех ступеней НА статора, лопаток спрямляющего аппарата и восьми ступеней ротора (на рисунке 2.13 эпюры представлены для лопаток не всех ступеней). Анализ представленных эпюр показывает, что концентрация частиц пыли в единице объема среды может достигать до  $6 \text{ г/м}^3$  на последних ступенях компрессора по сравнению с первыми ступенями лопаток компрессора. Эти особенности усложняют процессы эрозионно-абразивного износа элементов пера лопаток по длине проточной части компрессора. Поэтому каждая лопатка определенной ступени имеет свои особенности эрозионно-абразивного износа.

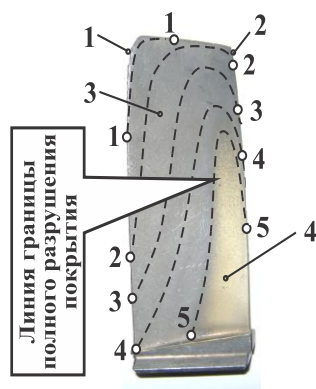


Рисунок 2.14. Схема неравномерного эрозионного разрушения (неравномерность 1-го ранга) пера лопатки компрессора ГТД

Можно отметить, что по функциональным элементам лопатки также действуют неравномерные эрозионно-абразивные воздействия. При этом они разрушаются неравномерно. Эти неравномерности можно отнести к неравномерностям 1-го ранга [91]. На рисунке 2.14 приведен общий вид рабочей лопатки ротора. Здесь, разрушения пера лопатки начинается с верхней части входной кромки 1 и распространяется к выходной кромке 2 по поверхности корыта пера 3. Последовательные разрушения пера лопатки показаны на рисунке 2.14 пунктирными линиями 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 и 5-5.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить следующее:

1. ГТД имеет сложную структуру и состоит из множества элементов (лопаток), узлов и подсистем. Эти элементы структурированы в ступени лопаток, группы ступеней и подсистемы.

2. 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). Неравномерность действия эксплуатационных воздействий на структурные элементы ГТД можно оценивать неравномерностями различных рангов. Например, в компрессоре ГТД модели ТВЗ-117 действуют неравномерности 3-х рангов [90, 91], вызванные особенностями конструкции компрессора и эрозионно-абразивным износом.

3. Существующие традиционные методы повышения ресурса ГТД не обеспечивают дальнейшее повышение его ресурса в условиях действия эксплуатационных неравномерностей 3-х рангов.

### **2.3. Анализ действующих неравномерностей эрозионного износа лопаток компрессора**

Анализ структурных составляющих осевого компрессора ГТД позволил установить, что его лопатки структурированы в пять групп (рисунок 2.15): поворотные лопатки (ПЛ) ВНА, поворотные лопатки НА, лопатки НА, лопатки (Л) выходного спрямляющего аппарата ВСА, рабочие лопатки ротора. На рисунке 2.15 показана гипотетическая схема состава групп лопаток компрессора ГТД модели ТВЗ-117.

При этом выполненные исследования особенностей эксплуатации этих групп лопаток позволили выявить, что каждая из этих групп лопаток имеют свои особенности эксплуатации и износа рабочих поверхностей пера. Это вызывает неодинаковый абразивно-эрозионный износ рабочих поверхностей лопаток различных групп. Неодинаковый износ лопаток компрессора приводит к неполному использованию потенциальных возможностей каждой лопатки, лопаток группы и групп лопаток всего компрессора.

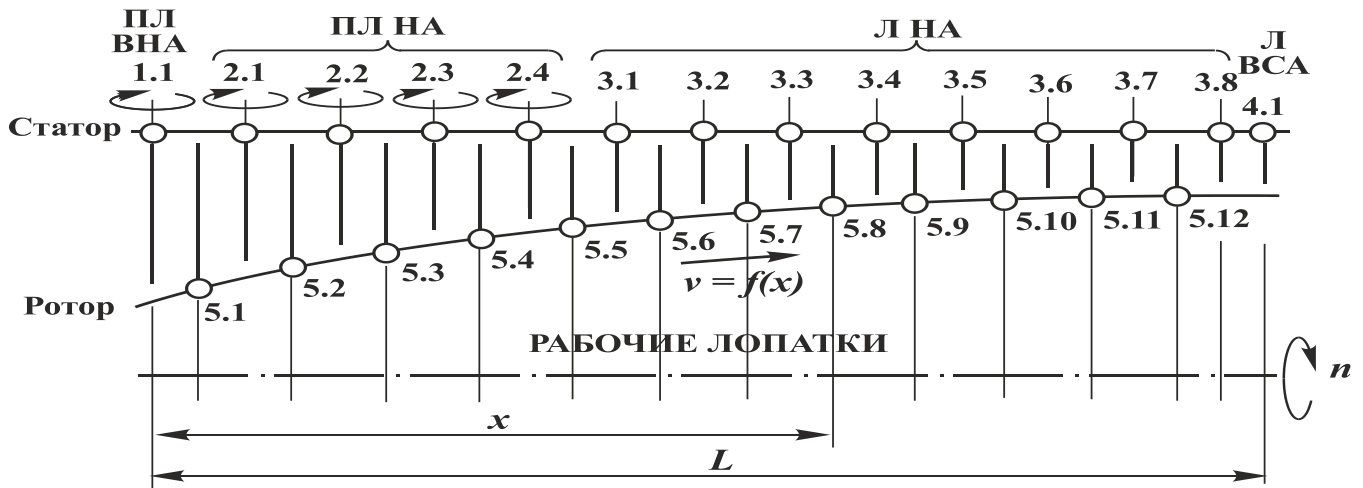


Рисунок 2.15. Гипотетическая схема состава групп лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117

Следует отметить, что неодинаковый износ лопаток компрессора имеет следующие характеристики:

- неравномерный износ поверхностей и элементов каждой лопатки любой группы;
- неодинаковый износ лопаток по длине проточной части компрессора каждой группы лопаток;
- неодинаковый износ групп лопаток компрессора относительно друг друга.

Выполним пояснения особенностей этих износов лопаток обусловленных действие неравномерностей их износов трех рангов.

*Износ лопаток 1-го ранга.* В этом случае, каждая лопатка группы имеет свои особенности износа, а именно поверхности пера каждой лопатки имеет неодинаковый износ. Это обусловлено целым комплексом особенностей структуры, геометрии компрессора, особенностями эксплуатации, пространственной формой и расположением лопатки, ее кинематикой, особенностями проточной части компрессора, движением пыли газовой воздушного потока и другими параметрами. Например, поворотные лопатки ВНА имеют одинаковый износ поверхностей лопатки, а рабочая поверхность корыта поверхности пера рабочей лопатки имеет большие неравномерности (рисунок 2.14). А также поверхности пера лопатки НА компрессора имеют свои особенности абразивно-эрозионного износа элементов (рисунок 2.16). На рисунке 2.16 представлены основные особенности износа



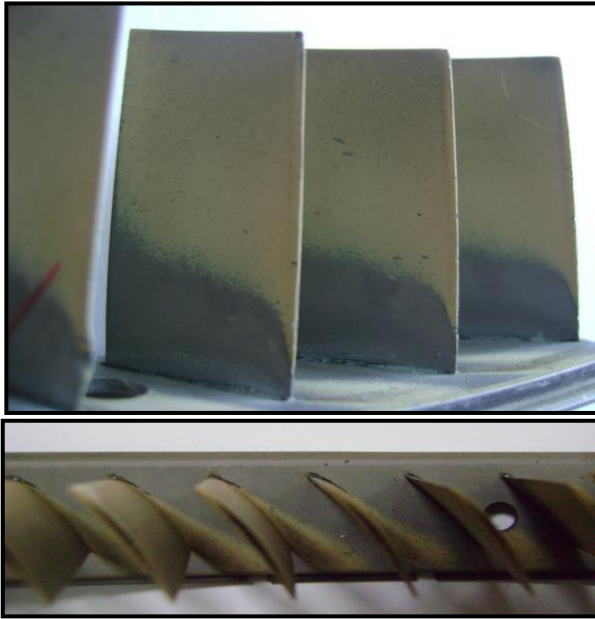


Рисунок 2.16. Особенности износа лопаток НА: а – со стороны корыта, б – вид с торца на бандаж

- а) лопаток НА. Здесь показано: на рисунке 2.16, а – со стороны корыта; на рисунке 2.16, б – вид с торца на бандаж. Абразивно-эрозионный износ рабочих лопаток ротора также имеет свои особенности для каждой конкретной лопатки. В качестве примера, на рисунке 2.17 представлены особенности износа пера рабочей лопатки ротора. При этом износ лопаток других групп также имеет свои особенности.
- б)

*Износ лопаток 2-го ранга.* Следует отметить, что по длине проточной части компрессора, лопатки каждой группы имеют также изменяющиеся особенности износа.

Это обусловлено изменяющимися особенностями действия абразивно-эрозионного износа, параметры которых приведены на рисунке 2.13. Изменяющиеся параметры износа лопаток по длине проточной части компрессора обусловлены изменяющимися параметрами концентрации пыли абразивного потока, скоростными параметрами потока, геометрическими параметрами движения лопаток и другими характеристиками.



Рисунок 2.17. Особенности износа пера рабочей лопатки ротора

*Износ лопаток 3-го ранга.* Эти особенности также обусловлены структурой групп лопаток компрессора, изменяющейся концентрацией воздушно абразивного

потока, скоростными параметрами потока, геометрическими параметрами движения лопаток и другими характеристиками.

*Износ лопаток 3-го ранга.* Эти особенности также обусловлены структурой групп лопаток компрессора, изменяющейся концентрацией воздушно абразивного



потока по длине его проточной части, особенностями формы и конструкции компрессора, параметрами движения потока и другими характеристиками.

На рисунке 2.18 представлена схема износа лопаток различных групп компрессора, а именно:

- поворотных лопаток входного направляющего аппарата (ПЛ ВНА), группа лопаток 1.1;
- поворотных лопаток направляющего аппарата (ПЛ НА), группа лопаток 2.1, 2.2, 2.3, 2.4;
- неподвижных лопаток направляющего аппарата (НЛ НА), группа лопаток 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7;
- неподвижных лопаток выходного спрямляющего аппарата (НЛ ВСА), группа лопаток 4.1;
- рабочих лопаток ротора, группа лопаток 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12.

Каждая из представленных групп лопаток имеет свои особенности абразивно-эрозионного износа и соответственно, в определенные периоды времени, свой пространственный контур границ (ПКГ) износа  $a_i - b_i$ , границы которого обусловлены равной величиной износа материала лопатки. Через равные промежутки времени образуются различные ПКГ, а именно:  $ПКГ_1, ПКГ_2, ПКГ_3, \dots, ПКГ_n$ .

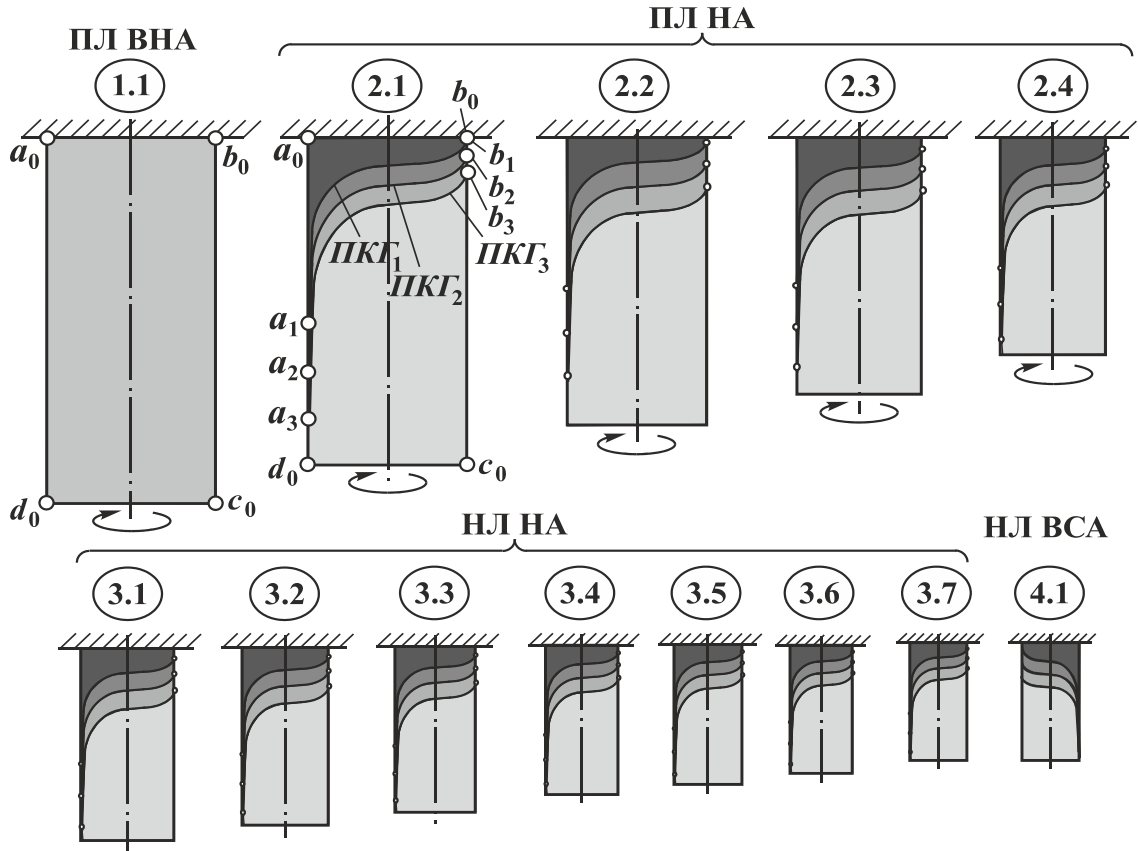
Эти особенности износа являются начальными данными для синтеза функционально-ориентированных покрытий (ФОП) лопаток компрессора, функционирующих из условия равенства ресурсов всех его групп.

Таким образом, выполненный анализ действующих неравномерностей эрозионного износа лопаток компрессора позволил установить следующее:

1. Выполненный анализ особенностей абразивно-эрозионного износа лопаток компрессора позволил установить следующее:

- каждая лопатка компрессора имеет свои определенные особенности износа, причем этот износ действует неравномерно по функциональным элементам лопатки;

ЛОПАТКИ СТАТОРА



РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ РОТОРА

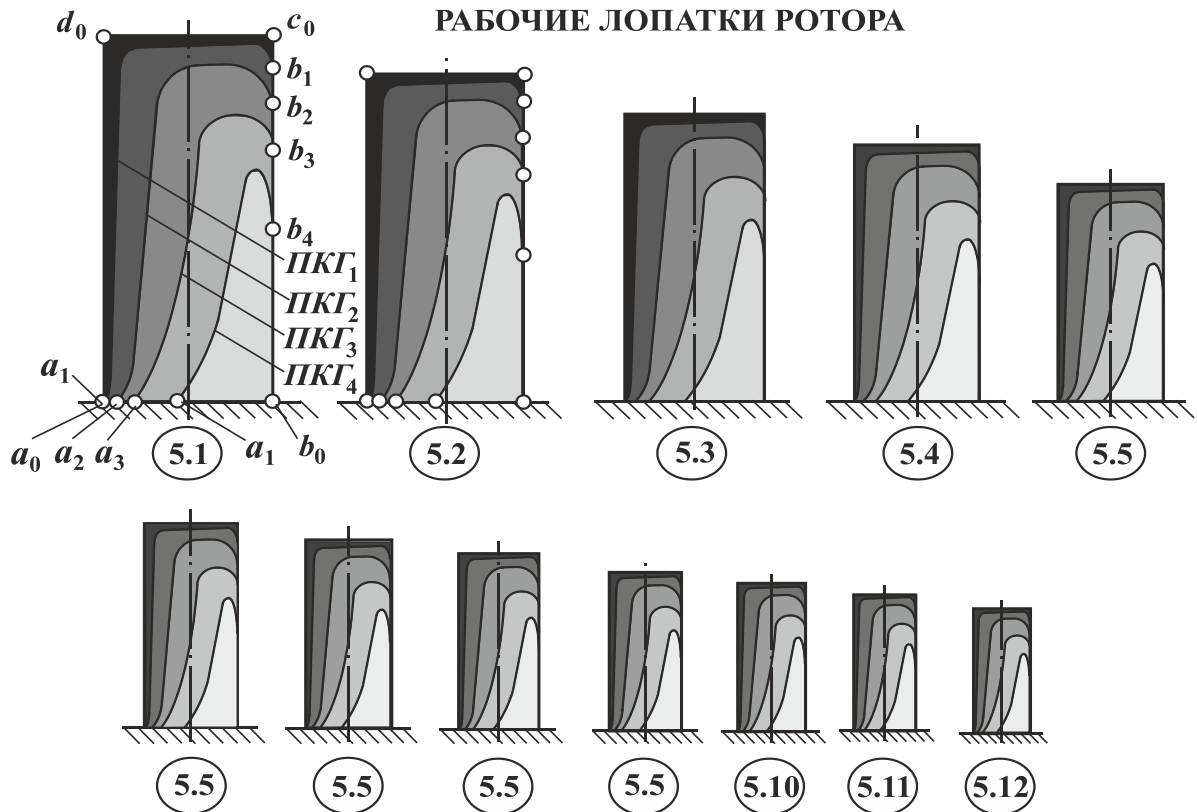


Рисунок 2.18. Схема износа лопаток различных групп компрессора

- лопатки каждой группы (по ступеням) изнашиваются не одинаково, а именно в зависимости от их расположения по длине проточной части компрессора, выполняемым функциям и другим особенностям;

- группы лопаток изнашиваются не одинаково относительно друг друга.

2. Анализ износа лопаток компрессора позволил установить, что износ лопаток характеризуется неравномерностями трех рангов:

- неравномерность износа лопаток 1-го ранга – неодинаковый износ поверхности любой лопатки компрессора;

- неравномерность износа лопаток 2-го ранга – неодинаковый износ лопаток в каждой группе относительно друг друга (изменяющийся от ступени к ступени группы);

- неравномерность износа лопаток 3-го ранга – неодинаковый износ лопаток групп относительно друг друга в компрессоре.

3. Действующие неравномерности износа лопаток не позволяют технологам создавать единые универсальные технологии в обеспечении свойств лопаток компрессора и повышать ресурс работы компрессора ГТД.

4. Возникающие неравномерности износа лопаток, особенно неравномерность износа лопаток 1-го ранга, приводит к преждевременному износу лопатки (входные и периферийные кромки получают предельные износы) без возможности ее восстановления.

5. Неравномерность износа лопаток 2-го ранга не позволяет обеспечивать заданные свойства лопаток с использованием одинаковых структур технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки.

6. Неравномерность износа лопаток 3-го ранга не позволяет обеспечивать равные свойства групп лопаток всего компрессора и повышать ресурс всех лопаток в целом.

7. Действующие неравномерности трех рангов не позволяют существующими технологическими процессами вести повышение ресурса лопаток компрессора на базе принципа равенства ресурсов всех его лопаток.

8. Для повышения ресурса лопаток компрессора в условиях действия на них неравномерностей износа трех рангов необходимо применение функционально-ориентированных свойств на базе многосвязных технологических процессов, обеспечивающих возможность повышения ресурса и реализации его равенства для всех лопаток компрессора.

#### **2.4. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств каждой лопатке, лопаткам в группе и группам лопаток на основе единых специальных принципов**

На рисунке 2.19 представлен общий вид лопаток компрессора ГТД модели ТВЗ-117. Здесь показаны: рисунок 2.19,а – поворотные лопатки компрессора; рисунок 2.19,б – лопатки НА статора на бандажах; рисунок 2.19,в – лопатки ротора. Можно отметить, что поворотные лопатки компрессора (рисунок 2.19,а) монтируются в компрессоре с возможностью поворота вокруг оси. На первых ступенях эти лопатки имеют две опоры (ВНА и четыре ступени НА), а на последних ступенях (две ступени) лопатки имеют одну опору установки. Лопатки статора (рисунок 2.19,б) запрессовываются на специальных бандажах и припаиваются специальным припоем. Лопатки ротора (рисунок 2.19,в) имеют 12-ть ступеней, устанавливаются на специальных дисках с помощью замков и жестко закрепляются. При эксплуатации турбовального двигателя ротор с лопатками вращается относительно неподвижных поворотных лопаток ВНА, поворотных лопаток НА, лопаток НА и лопаток спрямляющего аппарата.

В процессе эксплуатации ГТД лопатки компрессора разрушаются из-за действия эрозионно-абразивного износа. При этом возникают неравномерный износ лопаток, который подразделяется на неравномерности трех рангов. На рисунке

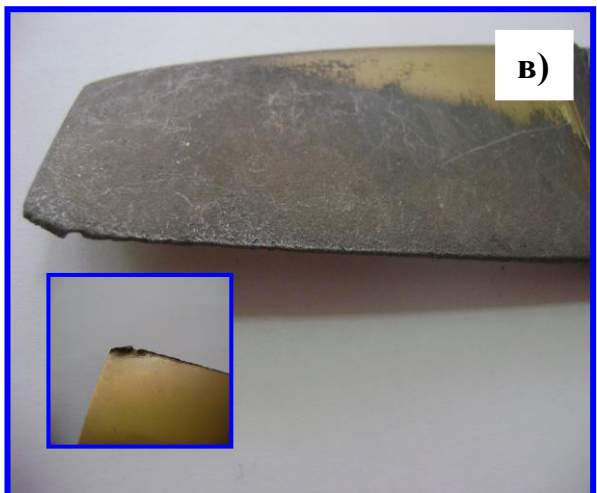
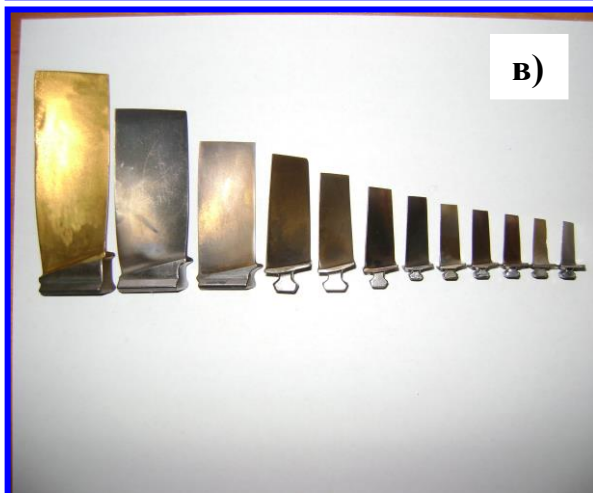
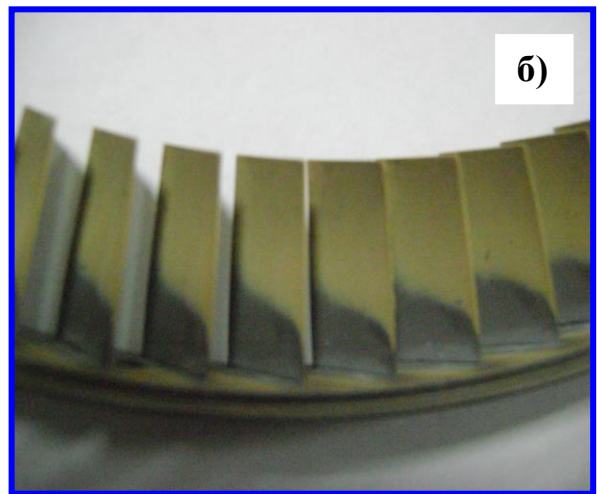
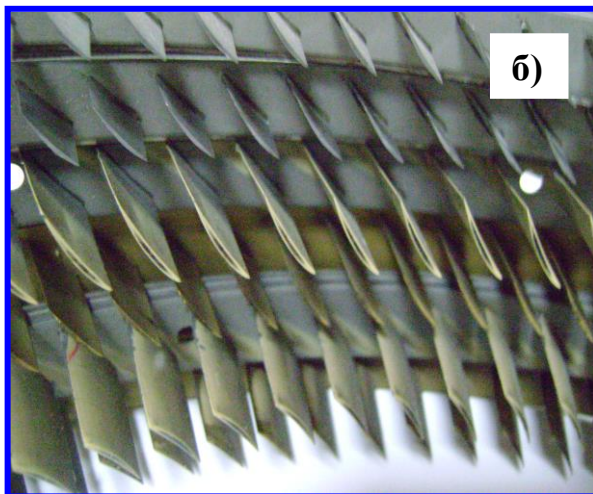


Рисунок 2.19. Общий вид лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117: а – поворотные лопатки компрессора; б – лопатки НА статора; в – лопатки ротора

Рисунок 2.20. Общий вид эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117: а – поворотные лопатки НА статора; б – лопатки НА статора; в – лопатка ротора

2.20 представлен общий вид эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВЗ-117: на рисунке 2.20,а – поворотные лопатки НА статора; на рисунке 2.20,б – лопатки НА статора; на рисунке 2.20,в – лопатка ротора.

Анализ особенностей разрушения групп лопаток осевого компрессора (рисунок 2.20) показал, что каждая группа лопаток имеет свои особенности разрушений, которые определяются неравномерностью 3-го ранга. При этом в каждой группе лопатки имеют свои особенности разрушений, которые характеризуются неравномерностью 2-го ранга. Если рассматривать конкретную лопатку, то по элементам пера лопатки действуют неравномерности 1-го ранга.



Рисунок 2.21. Структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения при эксплуатации

Выполненные исследования этих особенностей разрушения позволили установить, что процесс разрушений групп лопаток, лопаток по ступеням и конкретно каждой лопатки имеют свои закономерности [41]. Эти закономерности можно представить в виде структурной схемы взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения при эксплуатации, которая показана на рисунке 2.21.

На рисунке 2.21 представлена структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения при эксплуатации. Лопатки осевого компрессора образуют пять различных групп лопаток, на них действуют эксплуатационные воздействия  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  каждое из которых характеризуется потоками материи, энергии и информации. Взаимосвязь между особенностями разрушений различных групп лопаток показана с помощью связей  $F_i^j$ .

Выполненные исследования особенностей разрушений лопаток компрессора турбовального двигателя вертолета позволили установить, что они имеют определенные особенности. Главной проблемной особенностью разрушения лопаток является то, что они разрушаются неравномерно. При этом в процессе неравномерного разрушения лопаток действует три ранга неравномерностей, которые снижают ресурс лопаток и авиационного двигателя в целом. Для исключения таких неравномерных разрушений лопаток необходимо обеспечивать специальные свойства лопаток компрессора. Однако традиционными технологическими методами решить эти проблемы не возможно. Здесь необходимы специальные подходы с применением функционально-ориентированных технологий [74].

На рисунке 2.22 представлена структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и обеспечения ФОС, исключаяющих неравномерности разрушения лопаток компрессора. Здесь показано, что возникающие неравномерности 1-го, 2-го и 3-го ранга разрушений лопаток компрессора (рисунок 2.21) следует компенсировать посредством функционально-ориентированных свойств (ФОС) [74]. ФОС позволяют исключать неравномерные разрушения лопаток компрессора.

Можно отметить, что возникающие неравномерности эрозионно-абразивного износа лопаток не позволяют эффективно применять традиционные методы снижения их износа. Например, при нанесении традиционных нитрид титановых покрытий на перо лопатки ротора повышает только незначительно ресурс лопаток. Это обусловлено тем, что предельные разрушения пера лопатки ротора происходят на передней кромке пера у его периферии. После разрушения покрытия происходит интенсивное разрушение тела пера при отсутствии разру-



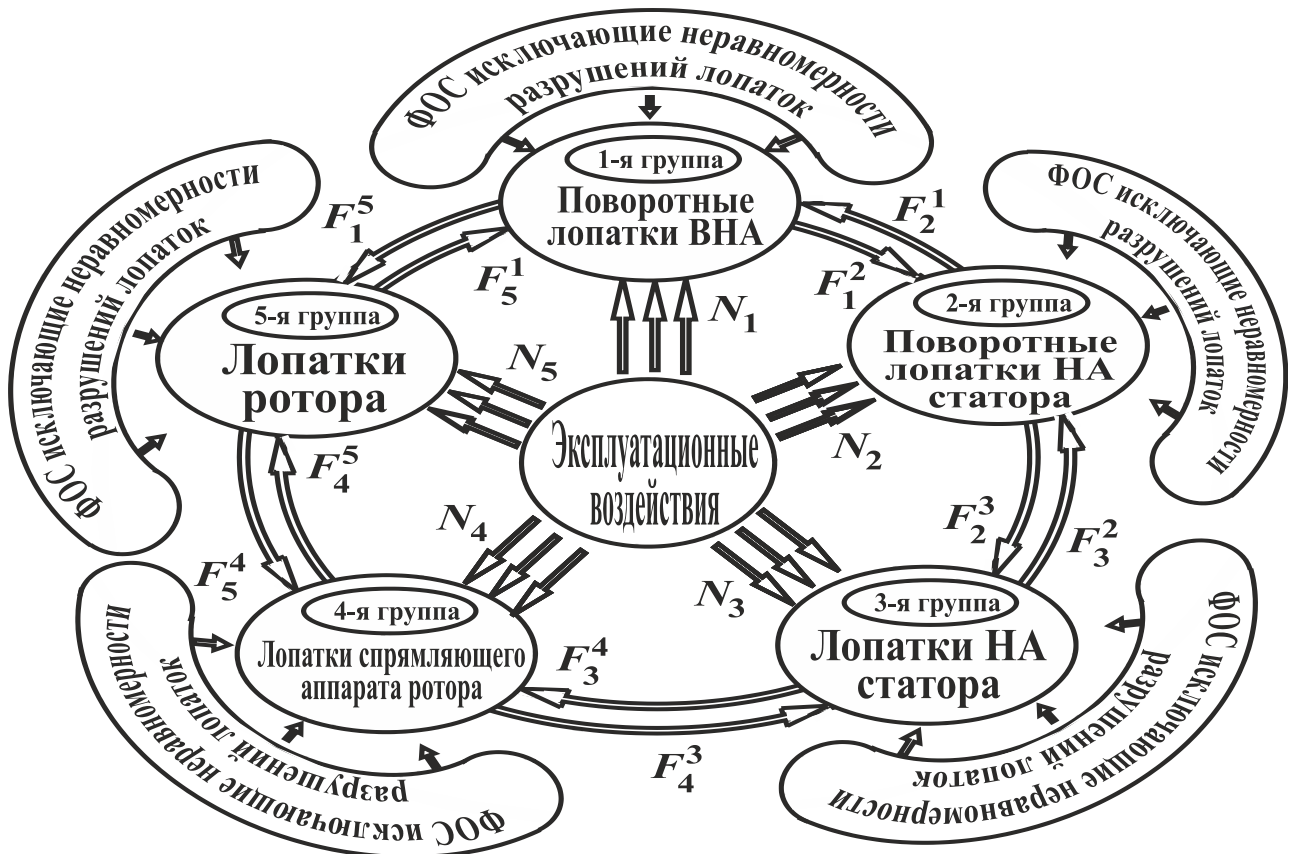


Рисунок 2.22. Структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и обеспечения ФОС, исключая неравномерности разрушения лопаток компрессора

шения поверхности корыта пера лопатки. Это снижает ресурс лопатки в целом, и не позволяет их восстанавливать, в том числе многократно [90].

При обеспечении функционально-ориентированных свойств пера лопатки можно существенно повысить ресурс лопаток, например, за счет возможности многократного восстановления работоспособности лопаток посредством применения специальных покрытий неравномерной толщины или с неравномерными физико-механическими свойствами, как это выполнено в работе [89, 90]. Однако в этой работе решена задача повышения ресурса лопаток только для рабочих лопаток ротора осевого компрессора. В этой работе планируется комплексно решать



вопросы повышения ресурса лопаток компрессора для различных их групп с учетом действия разрушений, характеризуемых неравномерностями 3-х рангов.

На рисунке 2.23 представлена гипотетическая схема обеспечения ФОС каждой лопатки, лопаткам группы и лопаткам между группами на базе единого принципа. Представленная схема является общим подходом в повышении ресурса всех

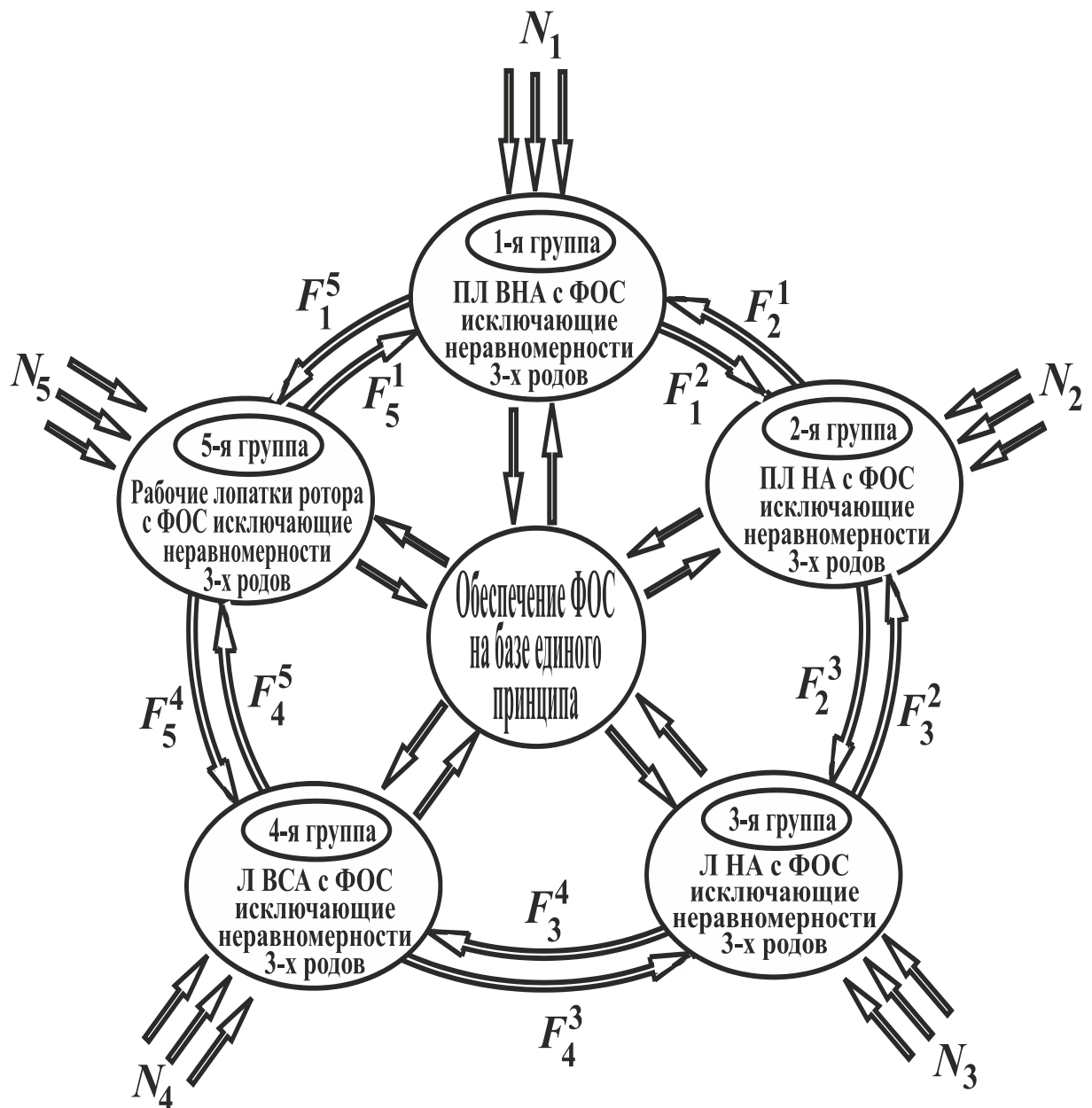


Рисунок 2.23. Гипотетическая схема обеспечения ФОС каждой лопатки, лопаткам группы и лопаткам между группами на базе единого принципа

групп лопаток на основе единого принципа.

Можно отметить, что на базе общего подхода выполняется обеспечение ФОС каждой лопатке, группе лопаток и всем группам лопаток компрессора ГТД. В этом случае, эти свойства лопаток выполняются на основе прямых и обратных связей  $F_i^j$ , представленных на рисунке 2.23. С помощью этих связей обеспечивается возможность управления свойствами каждой лопатки, лопатки в группе и лопаток различных групп. При этом ФОС лопаток должны обеспечиваться на базе единого принципа. К единым принципам обеспечения свойств лопаток и их групп можно отнести следующие:

1. Равного ресурса лопаток:

- а) одинакового износа функциональных элементов лопатки,
- б) равного ресурса лопаток в группе,
- в) равного ресурса всех групп лопаток,
- г) одинакового износа функциональных элементов лопатки и равного ресурса лопаток в группе,
- д) одинакового износа функциональных элементов лопатки и равного ресурса лопаток в группе, а также равного ресурса всех групп лопаток.

2. Кратного ресурса лопаток:

- а) износа функциональных элементов лопатки по заданному закону кратности,
- б) кратного ресурса лопаток в группе,
- в) кратного ресурса всех групп лопаток,
- г) износа функциональных элементов лопатки по заданному закону кратности и кратного ресурса лопаток в группе,
- д) износа функциональных элементов лопатки по заданному закону кратности и кратного ресурса лопаток в группе, а также кратного ресурса всех групп лопаток.

3. Заданного ресурса лопаток (по приведенным выше принципам 1 и 2).

4. Предельного ресурса лопаток (по приведенным выше принципам 1, 2 и 3).

5. Гарантированного ресурса лопаток (по приведенным выше принципам 1, 2, 3 и 4).

6. Другие виды единых принципов обеспечения свойств.

Следует отметить, что данная работа, при обеспечении ФОС лопаток компрессора, базируется на принципе равного ресурса. В этом случае, ФОС лопаток компрессора будут реализовываться с помощью ФОП, выполняемых с помощью вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Таким образом, в данном параграфе работы представлен общий подход в обеспечении ФОС лопаток компрессора на базе единого принципа, который позволяет выполнять равный, кратный, заданный, предельный, гарантированный или другой вид ресурса. Это обеспечивает повышение ресурса лопаток компрессора в целом и увеличение их эксплуатационного потенциала, а также повышает ремонтопригодность за счет обеспечения многократного восстановления лопаток.

## **2.5. Особенности синтеза технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора на основе комплексных связанных технологических процессов реализации функционально-ориентированных свойств**

Выполненные исследования особенностей эксплуатации ГТД показывают, что структурные элементы двигателя разрушаются неравномерно, при этом действуют неравномерности нескольких рангов [89, 90, 91]. Это обусловлено тем, что структура ГТД состоит из групп элементов (лопаток), которые составляют другие группы (ступени), входящие в свою очередь в следующие группы подсистем (турбокомпрессор, газогенератор, свободная турбина и тому подобное). Поэтому из-за сложной, и по сути дела, многомерной структуры элементов ГТД возникают многомерные неравномерные разрушения лопаток нескольких рангов [89]. Эти

неравномерности разрушений лопаток не позволяют традиционными методами обеспечивать заданные их свойства и вести повышение ресурса ГТД в целом.

В условиях действия неравномерных многомерных разрушений элементов ГТД целесообразно обеспечивать для них ФОС на базе ФОТ [74]. Эти технологии обеспечивают реализацию следующих вариантов свойств [74]:

1. ФОС в соответствии с группой особых принципов ФОТ.

2. ФОС изменяющиеся в пространстве (например, поверхности или объема детали) функционального элемента (лопатки), функциональных элементов ступени и группы ступеней лопаток. Изменяющиеся свойства могут выполняться за счет изменяющихся физико-механических свойств, за счет изменяющейся толщины покрытия и других параметров.

3. ФОС изменяющиеся во времени по функциональному элементу, функциональным элементам ступени и группам ступеней лопаток. Эти свойства можно реализовывать за счет специальных, градиентных, модульных, функционально-ориентированных покрытий.

4. ФОС изменяющиеся в зависимости от особенностей эксплуатации структурных элементов, узлов, групп и подсистем ГТД.

5. ФОС в соответствии с другими особенностями эксплуатации ГТД.

ФОС структурных элементов ГТД позволяет в условиях неравномерных эксплуатационных воздействий реализовывать следующие особенности [74]:

- равномерное разрушение всех структурных элементов ГТД (например, поверхностей, поверхностных слоев, объемных элементов, геометрических размеров и формы), что позволяет решать вопросы регулировки, восстановления и повышения их ресурса в ГТД;

- обеспечивается возможность полного единовременного исчерпания ресурса каждого элемента ГТД по всему комплексу параметров разрушений, например, эрозионному износу, пределу выносливости по изгибным, растягивающим, касательным и другим напряжениям; это позволяет выработать весь потенциал ресурса всех деталей ГТД до их полного разрушения по всем видам разрушений, что в целом повышает технико-экономические параметры эксплуатации ГТД;

- обеспечивается возможность реализации кратного ресурса по одним видам разрушений элементов ГТД (например, по эрозионному износу) относительно других видов разрушений (например, по выносливости); это позволяет вести работы по многократному восстановлению ресурса элементов ГТД сначала в зависимости от одного вида разрушений, потом по другому виду разрушений и так далее, и в целом повысить общий потенциал ресурса ГТД;

- единовременное полное разрушение покрытий, наносимых на структурные элементы ГТД при не разрушении (износе) основного материала, например, тела пера лопатки; это позволяет увеличить число возможных восстановлений элементов ГТД и упростить процесс восстановления лопаток;

- единовременное полное разрушение сразу всех структурных элементов ГТД, что обеспечивает полную выработку ресурса всех структурных элементов ГТД в целом и повышение технико-экономических параметров эксплуатации авиационных двигателей;

- обеспечивать кратный ресурс одних элементов относительно других структурных элементов ГТД и другие особенности; это обеспечивает возможность в повышении общего эксплуатационного потенциала ГТД за счет рационального или оптимального использования запасных частей.

Все это позволяет повысить общий ресурс ГТД за счет увеличения его межремонтного ресурса и количества восстановлений его структурных элементов. При этом обеспечение ФОС на базе ФОТ обеспечивает дополнительно следующее [74, 87, 89]:

1. Обеспечивается возможность в повышении ресурса ГТД за счет комплексного увеличения его межремонтного ресурса и количества восстановлений элементной базы.

2. Повышается общий эксплуатационный потенциал всех структурных элементов ГТД.

3. Создаются условия к реализации полной адаптации структурных элементов ГТД при изготовлении к особенностям их эксплуатации в двигателе.

4. Обеспечивается возможность реализации заданного ресурса элементов, подсистем и всего ГТД в целом.

5. Обеспечивается возможность управления свойствами элементов ГТД при их изготовлении для обеспечения требуемых свойств двигателя в условиях эксплуатации, что в ряде случаев диктуется конъюнктурой рынка или производителя ГТД.

6. Обеспечивается качественно новая совокупность свойств ГТД.

На рисунке 2.24. представлена гипотетическая схема общего подхода в обеспечении ФОС лопаток ГТД с взаимосвязями  $\varphi_i^j$  объектов системы: эксплуатационные функции  $F$ , технологические воздействия  $TB$  и свойства  $C$ . На базе этих связей реализуются функционально-ориентированные свойства [89]. Здесь можно отметить, что структура связей между элементами модели имеет замкнутую форму, которая позволяет определять параметры технологических воздействий и свойств детали в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на элементы детали. Петли модели  $\varphi_i^i$  обозначают внутренние процессы в  $i$ -м объекте системы. Все эти параметры определяются на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий [74]:

1. Функционального соответствия особенностей действия эксплуатационных функций, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств.

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зоны реализации технологических воздействий на деталь и геометрических параметров зонного обеспечения необходимых свойств.

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 детали.

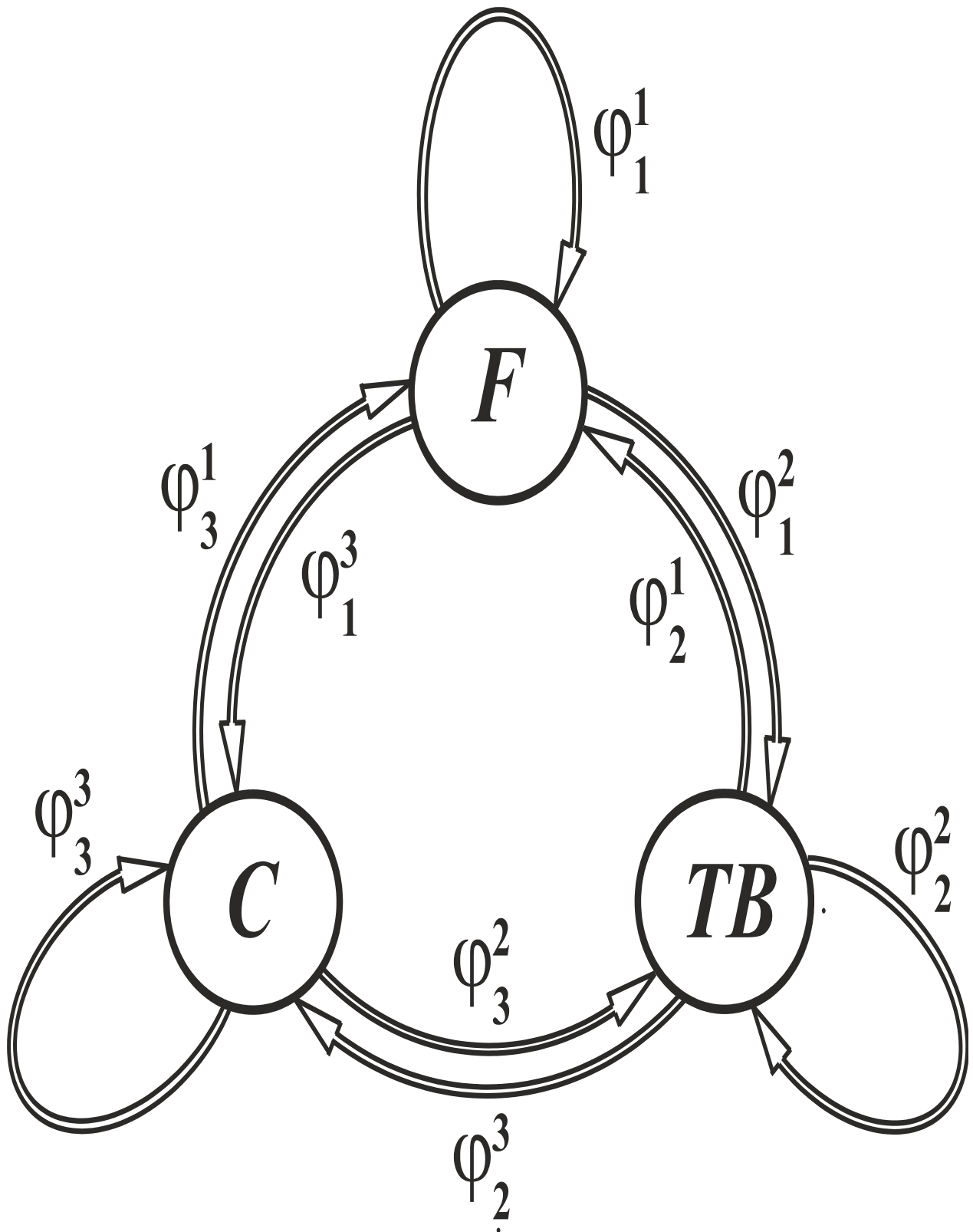


Рисунок 2.24. Гипотетическая схема общего подхода в обеспечении ФОС лопаток ГТД с взаимосвязями  $\varphi_i^j$  объектов системы: эксплуатационные функции  $F$ , технологические воздействия  $TB$  и свойства  $C$

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента детали.

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе детали.

6. Структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах детали из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всей детали.

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

В общем подходе функционально-ориентированные свойства элементов ГТД формируются на базе этой группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств деталей в зависимости от особенности их эксплуатации в авиационном двигателе.

На рисунке 2.25 представлены основные характеристики общего подхода в повышении ресурса ГТД на основе обеспечения ФОС. Здесь показано, что основные характеристики применения общего подхода в обеспечении ФОС структурируются на следующих параметрах:

- условия применения,
- основные признаки применения ФОС,
- основные варианты реализации ФОС,
- особенности применения.





Рисунок 2.25. Основные характеристики общего подхода в повышении ресурса лопаток компрессора ГТД на основе обеспечения ФОС

Можно отметить, что целесообразно применять общий подход необходимо в следующих случаях:

- наличие неравномерного действия эксплуатационных функций по деталям, узлам и подсистемам ГТД (неравномерности трех рангов);
- наличие неодинакового ресурса деталей, узлов и подсистем при эксплуатации ГТД;
- возможность многократного восстановления работоспособности деталей, узлов и подсистем на базе ФОС;

Следует заметить, что применение ФОС определяется следующими признаками [74]:

- применение функционально-ориентированных технологий (ФОТ);
- технологические воздействия и свойства реализуются на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств.
- технологические воздействия и свойства реализуются в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций.

Функционально-ориентированный подход [74] базируется на применении группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств изделий. Поэтому этот процесс многовариантен и имеет свои особенности применения.

Можно отметить, что технологические процессы (ТП) отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) лопаток компрессора базируются на связанных процессах. Что это значит? Связный технологический процесс представляет собой комплексный технологический процесс содержащий множество технологических процессов, каждый из которых предназначен для ОУО конкретной лопатки, но связанные между собой единой целью – обеспечения заданного равного ресурса лопаток компрессора всех групп (рисунок 2.26).

На рисунке 2.26 представлена структурная схема синтеза связанных технологических процессов ОУО обеспечения ФОС отдельным группам лопаток компрессора ГТД на базе принципа заданного равного их ресурса. Здесь показано, что технологические процессы возможных 5-ти групп лопаток с ФОС связаны

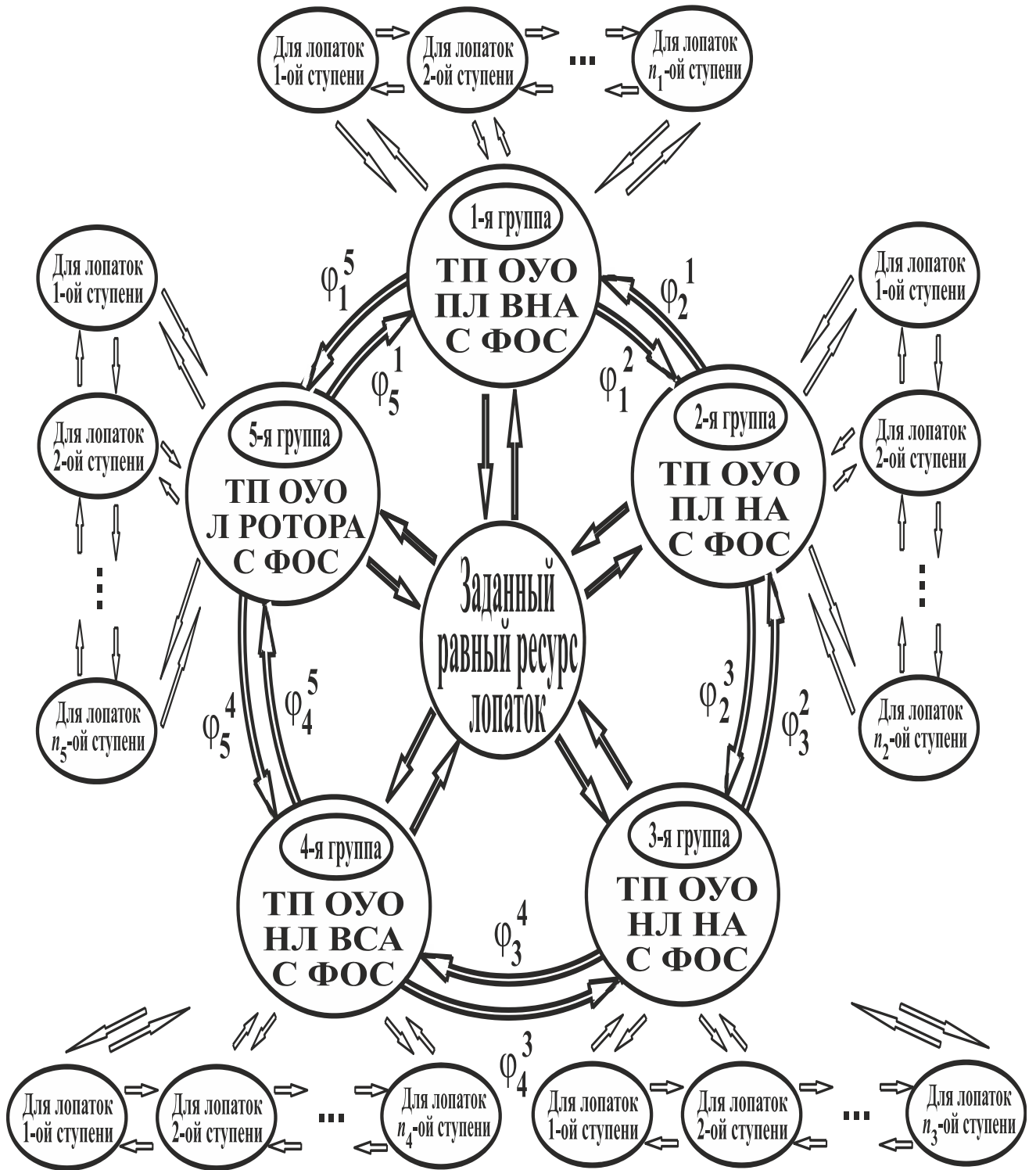


Рисунок 2.26. Структурная схема синтеза связанных технологических процессов ОУО обеспечения ФОС отдельным группам лопаток компрессора ГТД на базе принципа заданного равного их ресурса

между собой прямыми  $\varphi_i^j$  и обратными связями  $\varphi_j^i$ . Это значит, что выходные данные процесса обработки предыдущей лопатки являются входными параметрами процесса обработки для последующей лопатки следующей ступени компрессора.

В данной диссертационной работе ФОС реализуются за счет специальных многослойных ФОП [99, 100]. Поэтому, технологические процессы ОУО включает напыление многослойного ФОП.

Следует отметить, что для каждой группы лопаток, имеющей  $n_s$  ступеней, составляется группа связанных технологических процессов ОУО лопаток с ФОС. Это обусловлено тем, что на каждую лопатку группы действует свое эксплуатационное воздействие, вызывающее свой абразивно-эрозионный износ, что требует своего конкретного технологического процесса реализации ОУО лопаток с нанесением ФОП. А также это вызвано действие неравномерностей износа лопаток компрессора 3-х рангов [89]. Благодаря наличию связей между технологическими процессами ОУО лопаток с ФОП различных групп обеспечивается возможность обеспечения им свойств на базе общего принципа – заданного равного ресурса всех лопаток.

В процессе ОУО лопаток различных групп компрессора, реализуются ФОП. На рисунке 2.27 показаны особенности синтеза ФОП лопатки со специальной структурой и конфигурацией, сформированное в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций, а именно неравномерностей абразивно-эрозионного износа 3-х рангов.

В этом случае, для каждой лопатки компрессора реализуется свое многослойное ФОП (рисунок 2.27). При этом каждый слой покрытия напыляется также на базе связанного технологического процесса, который формируется из условия того, что выход предыдущего процесса напыления данного слоя покрытия является входом напыления последующего покрытия.

Следует отметить, что для напыления каждого слоя ФОП [99, 100] необходимы следующие данные:

- геометрические параметры ПКГ каждого слоя покрытия;

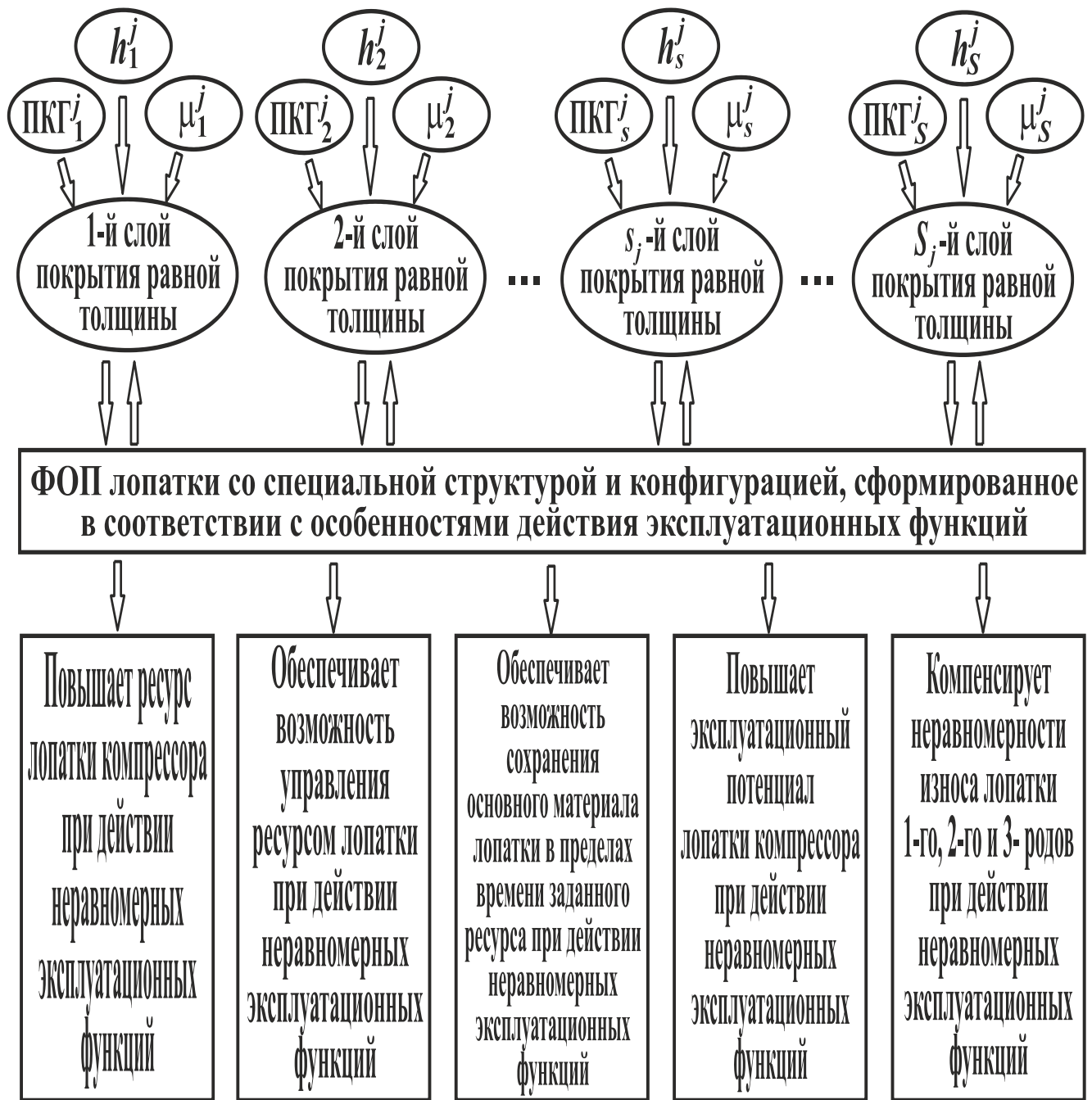


Рисунок 2.27. Особенности синтеза ФОП лопатки со специальной структурой и конфигурацией, сформированное в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций

- толщина каждого слоя покрытия;
- количество слоев покрытий;
- физико-механические свойства и интенсивность износа каждого слоя покрытия.

ФОП лопатки со специальной структурой и конфигурацией, сформированное в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций, обеспечивает следующее [91, 100]:

- повышает ресурс лопатки компрессора при действии неравномерных эксплуатационных функций;
- обеспечивает возможность управления ресурсом лопатки при действии неравномерных эксплуатационных функций;
- обеспечивает возможность сохранения основного материала лопатки в пределах времени заданного ресурса при действии неравномерных эксплуатационных функций, что позволяет решать вопросы многократного восстановления лопаток;
- повышает эксплуатационный потенциал лопатки компрессора при действии неравномерных эксплуатационных функций;
- компенсирует неравномерности износа лопатки 1-го, 2-го и 3-го рангов при действии неравномерных эксплуатационных функций.

Учитывая, что ресурсы всех лопаток с ФОП равны между собой, можно записать следующее выражение [91, 100]:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_k = \dots = R_K, \quad (2.1)$$

где  $R_k$  - ресурс  $k$  – ой лопатки компрессора;

$K$  – общее количество лопаток компрессора.

В выражении (2.1), каждый элемент определяется по следующей формуле:

$$R_k = \sum_{s=1}^S R_{ks} = \sum_{s=1}^S \frac{h_{ks}}{\mu_{ks}}, \quad (2.2)$$

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.

На основании выражений (2.1) и (2.2) 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 (2.2) будет иметь следующий вид [91]

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

Таким образом, проведенные исследования особенностей синтеза технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора на основе комплексных связанных технологических процессов реализации функционально-ориентированных свойств, позволили установить следующее :

- выполнен анализ особенностей действия неравномерностей износа и синтеза ФОП лопаток компрессора;

- предложена гипотетическая схема общего подхода в обеспечения ФОС лопаток ГТД с применением ФОП, обеспечивающих защиту основного материала лопатки от абразивно-эрозионного износа с неравномерностями 3-х рангов;

- в работе представлены основные характеристики общего подхода в повышении ресурса лопаток компрессора ГТД на основе обеспечения ФОС;

- представлена структурная схема синтеза связанных технологических процессов ОУО обеспечения ФОС отдельным группам лопаток компрессора ГТД на базе принципа заданного равного их ресурса;

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

## 2.6. Анализ эксплуатационных особенностей групп лопаток компрессора с функционально-ориентированными свойствами

Разработанный общий подход в повышении ресурса ГТД на базе функционально-ориентированного подхода позволяет обеспечивать для лопаток компрессора выполнение следующего [91]:

1. Повышение общего ресурса лопаток ГТД, за счет увеличения межремонтного ресурса и количества их восстановлений.
2. Обеспечение выполнения реализации полного, ограниченного или заданного эксплуатационного потенциала всех элементов ГТД или всего ГТД в целом, в том числе и лопаток компрессора.
3. Обеспечивается возможность управления ресурсом работы ГТД в зависимости от условий заказчика.

В случае восстановления работоспособности любой детали при ремонте ГТД технологическими методами можно отметить следующее. Для любой  $i$  – ой детали ГТД с ФОС полный эксплуатационный потенциал по ресурсу, в случае многократного ее восстановления по разрушениям различного характера, определяется по следующей зависимости [91]:

$$R_0^i = \sum_{k_m=1}^{S_m} \cdots \sum_{k_2=1}^{S_2} \sum_{k_1=1}^{S_1} R_{k_1 k_2 \cdots k_m}^i ; \quad (2.3)$$

где  $R_0^i$  - полный эксплуатационный потенциал по ресурсу для  $i$  – ой детали ГТД с ФОС;

$R_{k_1 k_2 \cdots k_m}^i$  - ресурс  $i$  – ой детали по  $k_s$  – му виду разрушений;



$S_1, S_2, \dots, S_m$  - количества восстановлений  $i$  – ой детали ГТД по 1-му, 2-му, ...,  $m$ -му виду разрушений (например, по износу, по выносливости по изгибным напряжениям и тому подобному);

$m$  – общее количество видов разрушений детали.

Следует отметить, что в процессе эксплуатации  $i$  – ой детали ГТД необходимо предусматривать выполнение многократных восстановлений детали с количеством  $S_1$  по 1-му виду разрушений, имеющему самый короткий ресурс (например, по эрозионному разрушению), затем выполнение многократных восстановлений детали с количеством  $S_2$  по 2-му виду разрушений, имеющему более длинный ресурс, чем в предыдущем случае (например, по выносливости по изгибным напряжениям), и так далее, пока не будет полностью исчерпан полный ресурс детали. Далее, данная деталь, уже не восстанавливаемая ни по каким либо видам разрушений, и ее можно только утилизировать.

Для системы, состоящей из  $n$  деталей с ФОС, можно записать условие выработки полного эксплуатационного потенциала по ресурсу для всех деталей ГТД, разрушаемых одновременно в целом [91]:

$$R_0^1 = R_0^2 = \dots = R_0^i = \dots = R_0^n ; \quad (2.4)$$

$n$  – количество деталей ГТД.

Для выражений (1) и (2), решаемых совместно, можно записать следующие условия эксплуатации деталей ГТД [91]:

- если  $R_0^i \Rightarrow \max$  - обеспечивается предельный эксплуатационный потенциал ГТД;

- если  $R_0^i = X$  - обеспечивается заданный ресурс ГТД,  $X$  – назначенный ресурс, который меньше, чем максимальный;

- если  $R_0^i = \frac{X}{p}$  - обеспечивается кратный к заданному ресурсу ГТД,  $p$  – ко-

эффициент кратности ресурса ГТД.

При восстановлении работоспособности любой  $i$  – ой детали ГТД путем установки в двигатель запасных частей с ФОС с номенклатурой  $T_i$  деталей можно записать следующее выражение [91]:

$$\sum_{t_1=1}^{T_1} R_0^{1t_1} = \sum_{t_2=1}^{T_2} R_0^{2t_2} = \dots = \sum_{t_i=1}^{T_i} R_0^{it_i} = \dots = \sum_{t_n=1}^{T_n} R_0^{nt_i} ; \quad (2.5)$$

где  $R_0^{it_i}$  - ресурс  $t_i$  – ой запасной детали с ФОС в  $i$  – ой номенклатуре запасных деталей;

$T_i$  – общее количество запасных деталей в  $i$  – ой номенклатуре запасных деталей;

Для выражения (3) можно записать следующие условия эксплуатации деталей ГТД при использовании запасных частей [91]:

- если  $\sum_{t_i=1}^{T_i} R_0^{it_i} \Rightarrow \max$  - обеспечивается предельный эксплуатационный потенциал ГТД при использовании запасных частей;

тенциал ГТД при использовании запасных частей;

- если  $\sum_{t_i=1}^{T_i} R_0^{it_i} = Y$  - обеспечивается заданный ресурс ГТД при использовании запасных частей,  $Y$  – назначенный ресурс, который меньше, чем максимальный;

назначенный ресурс, который меньше, чем максимальный;

- если  $\sum_{t_i=1}^{T_i} R_0^{it_i} = \frac{Y}{b}$  - обеспечивается кратный к заданному ресурсу ГТД при использовании запасных частей,  $b$  – коэффициент кратности ресурса ГТД при восстановлении работоспособности посредством запасных деталей.

использовании запасных частей,  $b$  – коэффициент кратности ресурса ГТД при восстановлении работоспособности посредством запасных деталей.

Выполненный анализ работоспособности ГТД с ФОС элементной базы показывает [3], что ФОС деталей обеспечивают повышение общего 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 ресурс ГТД. Все это обеспечивает следующее [91]:

- значительное увеличение общего ресурса ГТД и лопаток компрессора;
- полную адаптацию свойств деталей, узлов и подсистем при изготовлении к особенностям их эксплуатации в ГТД;
- выполнение заданного или предельного эксплуатационного потенциала ГТД, в соответствии с условиями заказчика или конъюнктурой рынка.

## **2.7. Структурная схема диссертационной работы**

Выполняемая диссертационная работа направлена на совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных ГТД на основе связанных технологий. Проведенный анализ особенностей эксплуатации компрессора ГТД и технологий повышения ресурса его лопаток позволил сделать ряд выводов, а именно.

Лопатки компрессора ГТД сгруппированы в несколько групп, выполняющих заданные технические функции. При этом на каждую лопатку, группу лопаток и группы лопаток действуют изменяющиеся абразивно-эрозионные эксплуатационные воздействия, которые характеризуются возникновением неравномерностей износа лопаток трех рангов. Причем возникающие неравномерности износа лопаток компрессора приводят к неодинаковому износу различных лопаток в компрессоре, неполному их использованию в компрессоре, снижению эксплуатационного потенциала лопаток и технико-экономических показателей ГТД. Это значительно снижает ресурс лопаток компрессора [90].

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. Для повышения ресурса лопаток компрессора ГТД целесообразно обеспечение лопаткам ФОС. При этом установлено, что 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 неоднородных износов лопаток трех рангов [90].

Данные выводы позволили сформулировать цель данной работы и определить ее структурную схему, представленную на рисунке 2.28.

На рисунке 2.28 представлена структурная схема исследований диссертационной работы. В этой структурной схеме представлен комплекс основных этапов и элементов исследований, которые связаны между собой и направлены на повышение ресурса лопаток компрессора ГТД, работающих в сложных эксплуатационных условиях.

На основании предложенной цели (рисунок 2.28), в работе разработан общий подход в повышении ресурса лопаток компрессора, который базируется на принципе обеспечения равного ресурса лопаткам всех групп лопаток, а также на возможности повышения ресурса лопаток на основе ФОП. Этот общий подход позволяет решать следующее [90]:

- обеспечивать одинаковый износ поверхности лопаток компрессора;
- обеспечивать равный ресурс лопаток группы;
- обеспечивать равный ресурс групп лопаток.

Эти вопросы можно решать на базе применения ФОП лопаток компрессора. Эти покрытия обеспечивают следующее [90]:

- специальные изменяющиеся свойства по перу лопатки, формируемые в соответствии с особенностями действия неравномерных эксплуатационных функций;
- изменяющиеся свойства по лопаткам в группе;



Рисунок 2.28. Структурная схема исследований диссертационной работы

- изменяющиеся свойства лопаток по группам.

Для решения этих вопросов в работе предлагается общий технологический подход синтеза связанных процессов ОУО реализации ФОР. Этот подход включает следующее:

- синтез связанного технологического процесса формирования ФОР лопатки;
- синтез связанного технологического процесса формирования ФОР лопаток в группе;
- синтез связанного технологического процесса формирования ФОР лопаток между группами.

Предлагаемый общий подход позволяет выполнять синтез комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОР. Для решения этого вопроса необходимо выполнить целый ряд исследований, основные этапы которых представлены на рисунке 2.28.

Заключаящим результатом исследований данной диссертационной работы является разработка рекомендаций по повышению ресурса лопаток компрессора на основе обеспечения качественно новых их свойств.

Разработанная структурная схема диссертационной работы (рисунок 2.28) позволяет определять и видеть взаимосвязи между отдельными этапами диссертации, решать вопросы комплексного обеспечения ФОР лопаток компрессора и синтеза связанных технологических процессов их ОУО на базе ФОР. В целом, представленная структурная схема диссертационной работы позволяет вести анализ вопросов совершенствования структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных ГТД на основе связанных технологий, и обеспечить достижение поставленной цели.

## 2.8. Выводы

Таким образом, в представленном разделе диссертационной работы приведены следующие результаты:

1. ГТД имеет сложную структуру и состоит из множества элементов (лопаток), узлов и подсистем. Эти элементы структурированы в ступени лопаток, группы ступеней и подсистемы.

2. 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). Неравномерность действия эксплуатационных воздействий на структурные элементы ГТД можно оценивать неравномерностями 3-х рангов.

3. Существующие традиционные методы повышения ресурса ГТД не обеспечивают дальнейшее повышение его ресурса в условиях действия эксплуатационных неравномерностей 3-х рангов.

4. Для повышения ресурса лопаток компрессора в условиях действия на них неравномерностей износа трех рангов необходимо применение функционально-ориентированных свойств на базе многосвязных технологических процессов, обеспечивающих возможность повышения ресурса и реализации его равенства для всех лопаток компрессора.

5. В работе разработан подход в обеспечении функционально-ориентированные свойства лопаток компрессора на базе единого принципа, который позволяет выполнять равный, кратный, заданный, предельный, гарантированный или другой вид ресурса. Это обеспечивает повышение ресурса лопаток компрессора в целом и увеличение их эксплуатационного потенциала, а также повышает ремонтпригодность за счет обеспечения многократного восстановления лопаток.

6. 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 обеспечения функционально-ориентированные свойства лопаток ГТД с применением ФОП, обеспечивающих защиту основного материала лопатки от абразивно-эрозионного износа с неравномерностями 3-х рангов;

- установить основные характеристики общего подхода в повышении ресурса лопаток компрессора ГТД на основе обеспечения функционально-ориентированные свойства;

- представить структурную схему синтеза связанных технологических процессов ОУО обеспечения функционально-ориентированные свойства отдельным группам лопаток компрессора ГТД на базе принципа заданного равного их ресурса;

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

7. Выполненный анализ работоспособности газотурбинного двигателя с функционально-ориентированные свойства элементной базы показывает, что функционально-ориентированные свойства деталей обеспечивают повышение общего 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 ресурс газотурбинного двигателя.

8. Разработанная структурная схема диссертационной работы позволяет определять и видеть взаимосвязи между отдельными этапами диссертации, решать вопросы комплексного обеспечения функционально-ориентированные свой-



ства лопаток компрессора и синтеза связанных технологических процессов их ОУО на базе ФОП. В целом, представленная структурная схема диссертационной работы позволяет вести анализ вопросов совершенствования структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных ГТД на основе связанных технологий, и обеспечить достижение поставленной цели.

### РАЗДЕЛ 3

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНОГО МНОГОСВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ГРУПП ЛОПАТОК

### 3.1. Особенности синтеза комплексных процессов на базе принципа равенства ресурса групп лопаток

Можно отметить, что комплексный многосвязный технологический процесс ОУО групп лопаток компрессора представляет собой совокупность отдельных технологических процессов ОУО обработки отдельных ступеней лопатки каждой группы. При этом эти отдельные технологические процессы ОУО лопаток каждой группы связаны между собой. Причем структура и параметры технологии реализуются из условия равенства ресурса лопаток с ФОС.

На рисунке 3.1 показаны особенности формирования структуры комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Можно отметить, что здесь на базе этой схемы, комплексный многосвязный технологический процесс ОУО лопаток компрессора выполняется с использованием ФОП. Основные этапы реализации этого процесса следующие (рисунок 3.1):

- 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

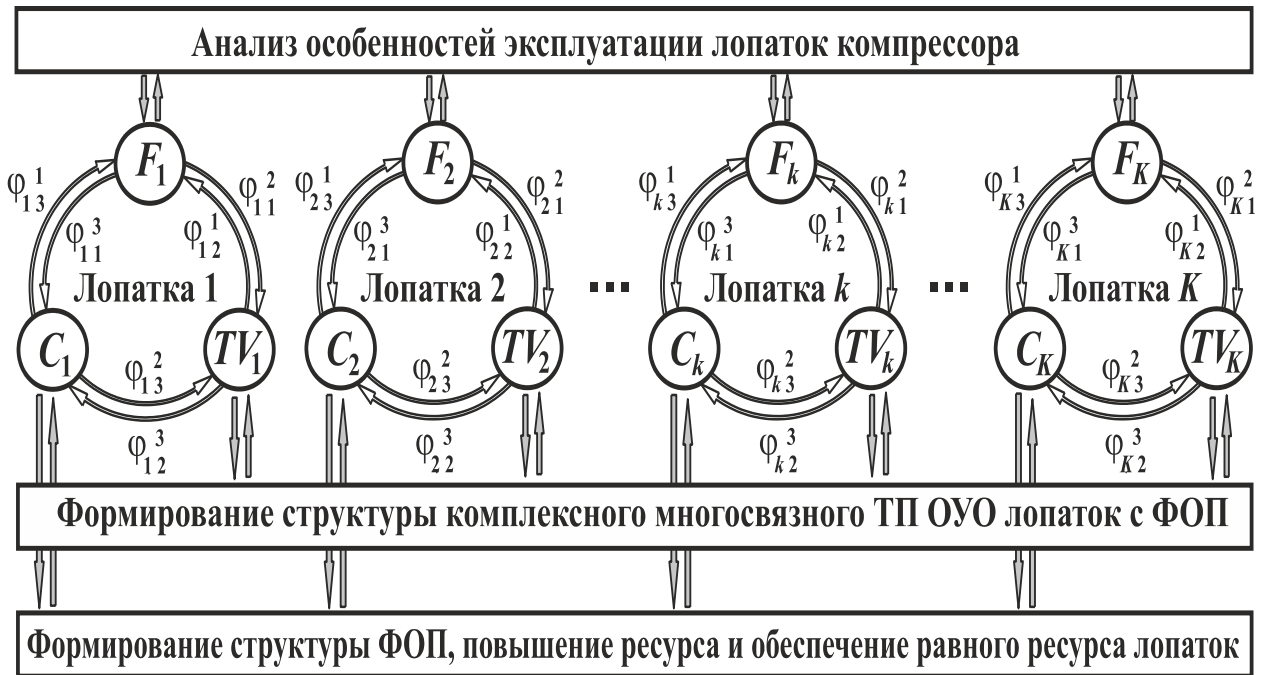


Рисунок 3.1. Особенности формирования структуры комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП

ОУО лопаток компрессора с ФОП.

Также следует отметить, что структура технологического процесса для каждой лопатки группы определяется на базе следующих параметров (рисунок 3.1):

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

Между элементами формирования структуры (рисунок 3.1) каждого технологического процесса ОУО лопаток компрессора действуют прямые  $\varphi_{ki}^j$  и обратные  $\varphi_{kj}^i$  связи. В целом, эта схема реализуется с использованием итерационно-рекуррентного подхода через анализ или формирования структуры.

Для решения вопросов синтеза комплексного связного технологического процесса ОУО необходимы схемы их синтеза для групп лопаток. На рисунке 3.2.

показана схема синтеза комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Эта схема формируется с использованием следующих этапов комплексного многосвязного технологического процесса:

- для всего комплексного многосвязного технологического процесса;
- для структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора лю-

**КОМПЛЕКСНЫЙ МНОГОСВЯЗНЫЙ ТП ОУО ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА С ФОП**

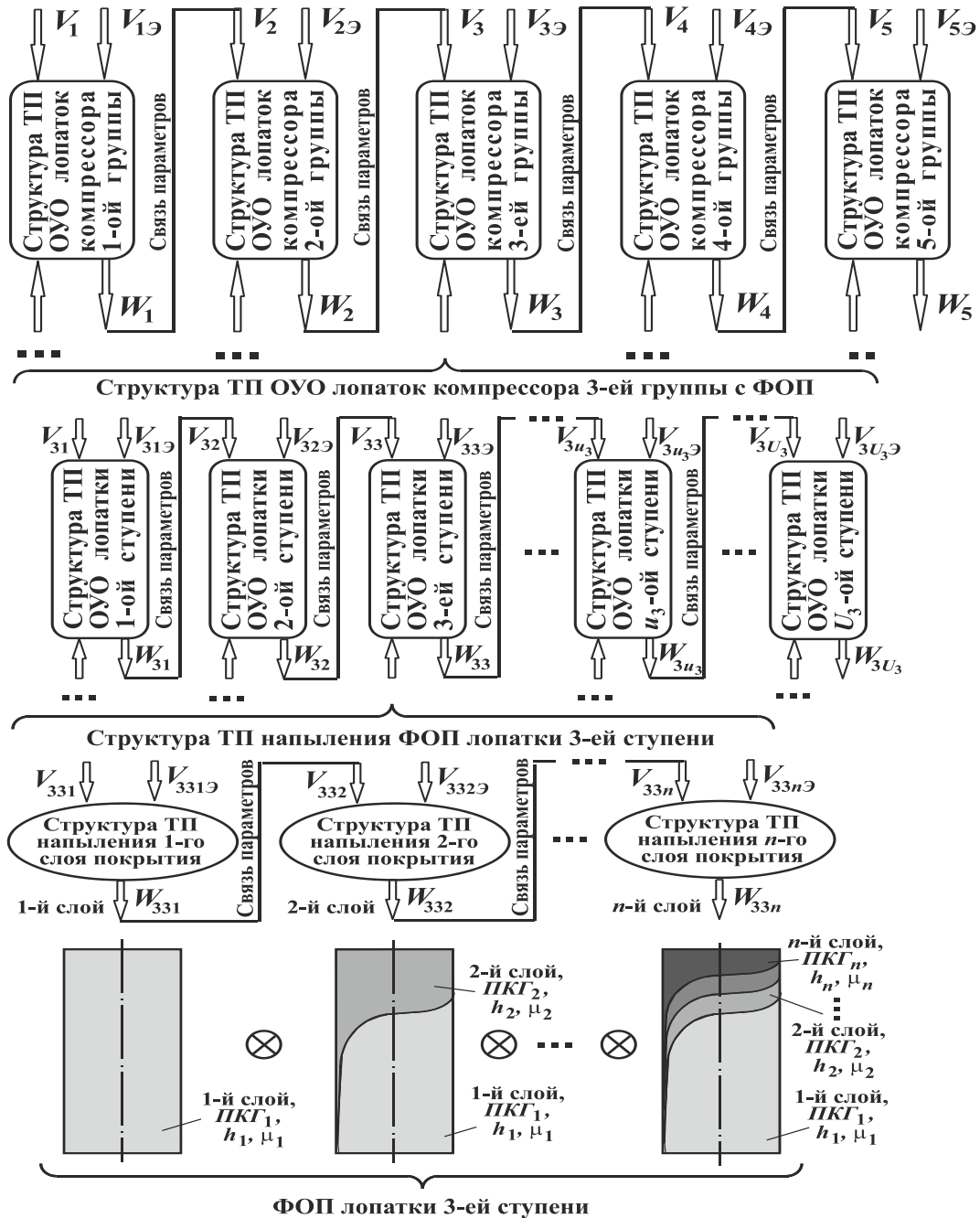


Рисунок 3.2. Схема синтеза комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП

бой группы (на рисунке 3.2 представлено для 3-ей группы) с ФОП:

- для структуры технологического процесса напыления ФОП лопатки любой ступени (на рисунке 3.2 приведено для лопаток 3-ей ступени).

Можно отметить, что для всех групп лопаток этих уровней на рисунке 3.2 показано, что в процессе синтеза процессов должны реализовываться связи параметров на всех трех уровнях, которые позволяют управлять процессом реализации ФОП, компенсирующих неоднородности эксплуатационных воздействий трех рангов, а именно: 1-го ранга, 2-го ранга и 3-го ранга.

На схеме рисунка 3.2 комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП показано:  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  – начальные входные параметры для синтеза технологических процессов ОУО лопаток, соответственно для 5-ти групп;  $V_{1э}, V_{2э}, V_{3э}, V_{4э}, V_{5э}$  – эксплуатационные входные параметры для синтеза технологических процессов ОУО лопаток (пространственный контур границ слоев ФОП, интенсивность износа данного вида покрытия, количество слоев ФОП), соответственно для 5-ти групп;  $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5$  – выходные параметры результатов синтеза структуры технологических процессов ОУО лопаток, соответственно для 5-ти групп.

Можно отметить, что структура технологического процесса ОУО лопаток компрессора на рисунке 3.2 представлена для 3-ей группы с ФОП. Здесь показано следующее: структуры ТП ОУО лопатки различных ступеней 3-ей группы; между структурными вариантами технологических процессов показаны связи;  $V_{31}, V_{32}, V_{33}, \dots, V_{3и3}, \dots, V_{3U3}$  – начальные входные параметры для синтеза технологических процессов ОУО лопаток, соответственно для  $U_3$  ступеней;  $V_{31э}, V_{32э}, V_{33э}, \dots, V_{3и3э}, \dots, V_{3U3э}$  – эксплуатационные входные параметры для синтеза технологических процессов ОУО лопаток (пространственный контур границ слоев ФОП, интенсивность износа данного вида покрытия, количество слоев ФОП), соответственно для  $U_3$  ступеней;  $W_{31}, W_{32}, W_{33}, \dots, W_{3и3}, \dots, W_{3U3}$  – выходные параметры результатов синтеза структуры технологических процессов ОУО лопаток, соответственно для  $U_3$  ступеней для  $U_3$  ступеней.

При реализации технологического процесса формирования ФОП, например, для лопаток 3-ей ступени, выполняется последовательное напыление  $n$  покрытий составляющих данное покрытие, реализуется  $n$  операций. В этом случае, структура технологического процесса напыления ФОП лопатки 3-ей ступени формируется в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3.2. Здесь показано:  $V_{331}$ ,  $V_{332}$ , ...,  $V_{3n}$  – начальные входные параметры напыления слоев ФОП, соответственно для  $n$  слоев покрытия;  $V_{331 \text{ э}}$ ,  $V_{332 \text{ э}}$ , ...,  $V_{3n \text{ э}}$  – эксплуатационные входные параметры для напыления слоев ФОП, соответственно для  $n$  слоев покрытия;  $W_{331}$ ,  $W_{332}$ , ...,  $W_{3n}$  – выходные параметры напыления слоев ФОП, соответственно для  $n$  слоев покрытия.

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

В нижней части рисунка 3.2 показан процесс последовательной композиции ФОП, например для лопатки 3-ей ступени. Для лопаток других ступеней компрессора процесс синтеза структуры технологического процесса реализации ФОП строится аналогично.

Таким образом, в этом подразделе работы представлены особенности синтеза комплексного многосвязного 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. На базе этой схемы обеспечивается возможность построения комплексного многосвязного процесса с учетом связей параметров реализации ФОП.

Приведенные данные являются исходными данными для синтеза структурных вариантов таких процессов, и дают технологам возможность видеть взаимосвязи между отдельными составляющими комплексного многосвязного технологического процесса реализации ФОП, формируемых из условия равного ресурса

групп лопаток компрессора, работающих в условиях действия неравномерностей эксплуатационных воздействий 3-х рангов.

### **3.2. Установление связей параметров функционально-ориентированных покрытий для групп лопаток компрессора**

Компрессор ГТД состоит из множества лопаток, которые выполняют в нем необходимые эксплуатационные функции. В целом структуру лопаток компрессора можно представить следующим выражением [75, 92]:

$$Str_{JK} = \{X, A\}, \quad (3.1)$$

$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_K\}$  - множество лопаток компрессора, здесь  $K$  – мощность множества  $X$ ;

$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_k, \dots, a_K\}$  - множество отношений, связей между лопатками или параметрами лопаток.

Можно отметить, что компрессор ГТД структурирован из групп лопаток, к которым относятся следующие группы лопаток [90, 91]:

- поворотные лопатки ВНА (статор);
- поворотные лопатки НА (статор);
- лопатки НА (статор);
- лопатки ВСА (статор);
- рабочие лопатки ротора.

Учитывая эти особенности, структуру групп лопаток компрессора можно представить с помощью следующего выражения:

$$Str_{JK} = Str_{III\ BHA} \cup Str_{III\ HA} \cup Str_{L\ HA} \cup Str_{L\ BSA} \cup Str_{LP}; \quad (3.2)$$

где  $Str_{III\ BHA}$  - структура группы поворотных лопаток входного направляющего аппарата;

$Str_{III\ HA}$  - структура группы поворотных лопаток направляющего аппарата;

$Str_{L\ HA}$  - структура группы лопаток направляющего аппарата;

$Str_{L\ BSA}$  - структура группы лопаток входного спрямляющего аппарата;

$Str_{LP}$  - структура группы рабочих лопаток ротора.

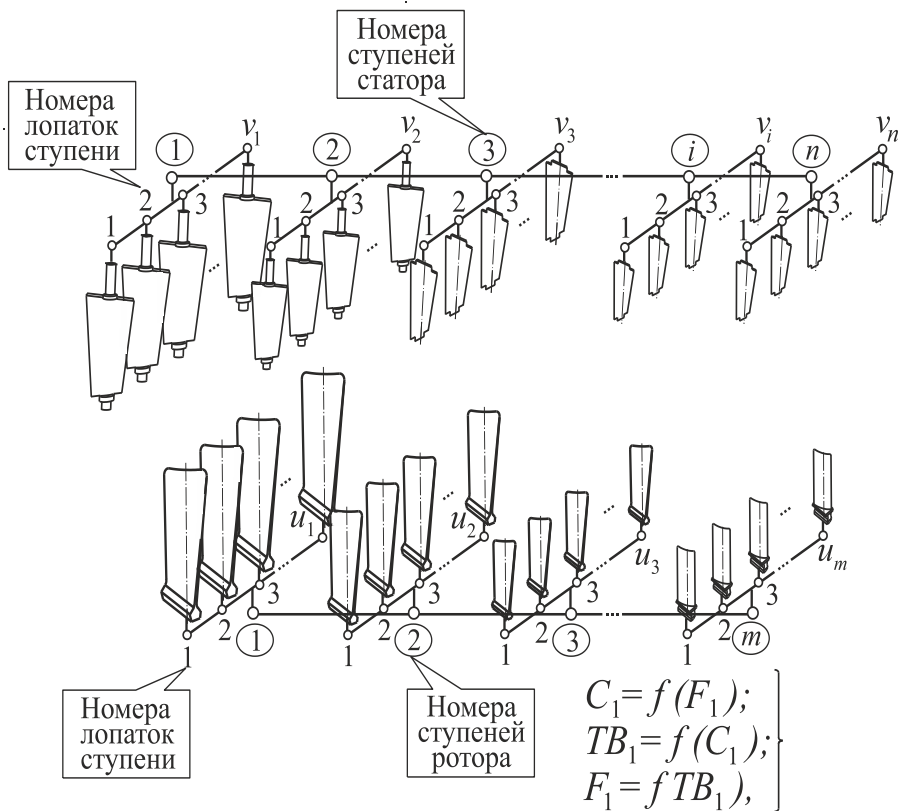


Рисунок 3.3. Структурная схема лопаток компрессора ГТД

На рисунке 3.3 приведена структурная схема лопаток компрессора ГТД. На этой схеме условно показаны структурные группы лопаток компрессора.

Можно отметить, что в диссертационной работе выполняются исследования по обеспечению равного ресурса лопаток с помощью ФОП. Учитывая выражение (2.1) и (2.2) выражение для определе-

ния связей параметров покрытий лопаток можно записать следующим образом:

$$\sum_{s_1=1}^{S_1} \frac{h_{1s_1}}{\mu_{1s_1}} = \sum_{s_2=1}^{S_2} \frac{h_{2s_2}}{\mu_{2s_2}} = \sum_{s_3=1}^{S_3} \frac{h_{3s_3}}{\mu_{3s_3}} = \dots = \sum_{s_k=1}^{S_k} \frac{h_{ks_k}}{\mu_{ks_k}} = \dots = \sum_{s_K=1}^{S_K} \frac{h_{Ks_K}}{\mu_{Ks_K}}; \quad (3.3)$$



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

$\mu_{ks_k}$  - интенсивность абразивно-эрозионного износа  $s_k$ -го слоя ФОП  $k$ -й лопатки компрессора;

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

$K$  - общее количество лопаток компрессора.

При нанесении ФОП толщина и интенсивность износа каждого слоя покрытия лопаток компрессора выполняется обычно одинаковой, в этом случае, можно записать:

- для толщин слоев покрытий лопаток

$$\left. \begin{aligned} h_{11} = h_{12} = \dots = h_{1s_1} = \dots = h_{1S_1} = h_1 ; \\ h_{21} = h_{22} = \dots = h_{2s_1} = \dots = h_{2S_1} = h_2 ; \\ \dots\dots\dots ; \\ h_{k1} = h_{k2} = \dots = h_{ks_1} = \dots = h_{kS_1} = h_k ; \\ \dots\dots\dots ; \\ h_{K1} = h_{K2} = \dots = h_{KS_1} = \dots = h_{KS_1} = h_K , \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

- для интенсивности износа слоев покрытий

$$\left. \begin{aligned} \mu_{11} = \mu_{12} = \dots = \mu_{1s_1} = \dots = \mu_{1S_1} = \mu_1 ; \\ \mu_{21} = \mu_{22} = \dots = \mu_{2s_1} = \dots = \mu_{2S_1} = \mu_2 ; \\ \dots\dots\dots ; \\ \mu_{k1} = \mu_{k2} = \dots = \mu_{ks_1} = \dots = \mu_{kS_1} = \mu_k ; \\ \dots\dots\dots ; \\ \mu_{K1} = \mu_{K2} = \dots = \mu_{KS_1} = \dots = \mu_{KS_1} = \mu_K , \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

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

Учитывая условия (3.4) и (3.5) выражение (3.3) можно представить следующим образом

$$\frac{S_1 h_1}{\mu_1} = \frac{S_2 h_2}{\mu_2} = \frac{S_3 h_3}{\mu_3} = \dots = \frac{S_k h_k}{\mu_k} = \dots = \frac{S_K h_K}{\mu_K}. \quad (3.6)$$

На основании выражения (3.6) устанавливаются связи между основными параметрами соседних лопаток групп или всех лопаток компрессора. В этом случае, закономерности связей параметров ФОП определяются на основании следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{T_o \mu_1}{S_1}; \\ h_2 &= \frac{S_1 h_1 \mu_2}{S_2 \mu_1}; \\ h_3 &= \frac{S_2 h_2 \mu_2}{S_3 \mu_1}; \\ &\dots\dots\dots; \\ h_k &= \frac{S_{(k-1)} h_{(k-1)} \mu_k}{S_k \mu_{(k-1)}}; \\ &\dots\dots\dots; \\ h_K &= \frac{S_{(K-1)} h_{(K-1)} \mu_K}{S_K \mu_{(K-1)}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

С помощью выражения (3.7) 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).

На рисунке 3.4 представлено поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из 6-ти слоев постоянной

толщины [100]. Здесь показано, что ФОП для лопатки формируется из слоев

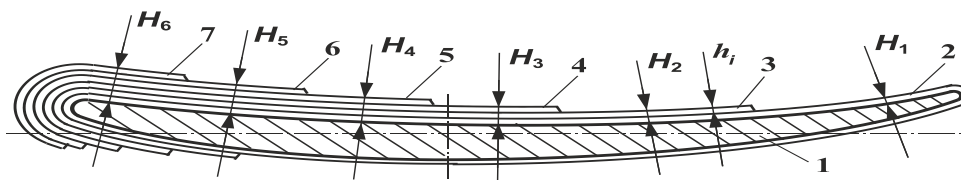


Рисунок 3.4. Поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из 6-ти слоев постоянной толщины

одинаковой толщины  $h_i$ . В этом случае, за счет слоев имеющих ПКГ формируется ФОП переменной толщины  $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ , ко-

торое реализуется в зависимости от особенностей действия абразивно-эрозионного износа. Для формирования ФОП необходим специальный технологический процесс, на способ реализации которого получен патент на изобретение [100], который будет представлен в следующем разделе данной работы. На рисунке 3.4 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.

Таким образом, представленные выражения (3.7) являются связями между параметрами ФОП и обеспечивают возможность последовательной реализации ФОП для лопаток компрессора из условия равенства ресурсов всех ступеней и групп лопаток компрессора. Эти выражения, по сути дела, связывают отдельные технологические процессы реализации ФОП лопаток, являются начальными параметрами выполнения технологического процесса напыления покрытия, и в целом образуют комплексный многосвязный технологический процесс последовательного напыления покрытий на лопатки компрессора. Установленные связи, выражение (3.7), позволяют технологам реализовывать комплексные технологические процессы напыления ФОП лопаток компрессора.

### **3.3. Методика синтеза комплексного отделочно-упрочняющего связного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств групп лопаток**

Можно отметить, что в данной работе рассматривается только процесс ОУО для лопаток компрессора уже изготовленных. Сам процесс изготовления лопаток компрессора уже достаточно изучен и в этой работе не рассматривается. При этом в работе предлагается процесс напыления покрытий на основе вакуумных ионно-плазменных покрытий и все необходимые отделочные операции сопутствующие процессу напыления покрытий. Кроме того, в работе выполняется синтез много-связных технологических процессов с использованием связей между параметрами операций, которые определяются в соответствии с системой (3.7). А также этот технологический процесс реализует многослойные ФОП

Методика синтеза комплексного отделочно-упрочняющего связного технологического процесса обеспечения ФОС групп лопаток имеет следующую последовательность:

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

2. Устанавливается структура лопаток в компрессоре ГТД, определяются виды лопаток компрессора, формируются группы лопаток. Например, в ГТД модели ТВ3-117 лопатки образуют пять групп различных по виду лопаток, а именно: поворотные лопатки ВНА, поворотные лопатки НА, лопатки НА, лопатки ВСА, рабочие лопатки ротора.

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

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

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

Данный анализ последовательно реализовывается для всех групп лопаток компрессора.

4. В соответствии с выражениями (3.6) и (3.7), которые являются связями параметров покрытий лопаток группы, назначаются конкретные параметры покрытий лопаток для всей группы лопаток. Затем, назначаются данные для следующей группы лопаток, потом для другой группы, и так далее, для лопаток последующих групп. Этот процесс реализуется до тех пор, пока все группы лопаток будут охвачены и определены все параметры связей между покрытиями.

5. В соответствии с рисунком 3.5 формируется структура комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Этот многосвязный технологический процесс состоит из следующих структур:

- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 1-ой группы;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 2-ой группы;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 3-ей группы;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 4-ой группы;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 5-ой группы.

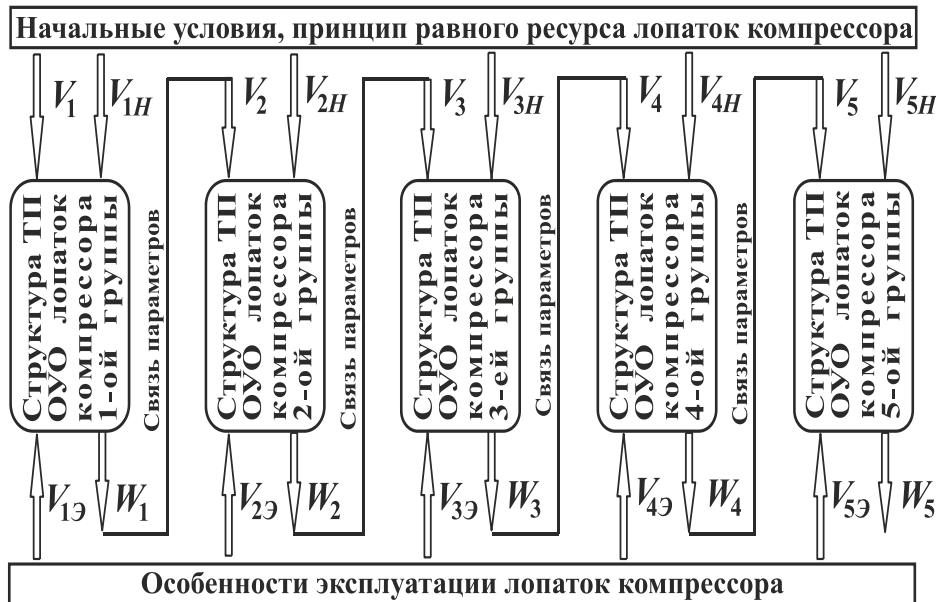
Можно отметить, что представленные структуры (рисунок 3.5) технологических процессов базируются на следующих особенностях:

- на связях параметров технологических процессов (3.7);

- на введении начальных условий технологических процессов и принципе равного ресурса лопаток компрессора;

- на наличии данных об особенностях эксплуатации лопаток компрессора.

На рисунке 3.5 имеются следующие обозначения:  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  – входные параметры технологических процессов групп лопаток компрессора;  $V_{1H}, V_{2H}, V_{3H},$



$V_{4H}, V_{5H}$  – входные начальные параметры процессов групп;  $V_{1Э}, V_{2Э}, V_{3Э}, V_{4Э}, V_{5Э}$  – входные данные по особенностям эксплуатации лопаток компрессора;  $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5$  – выходные параметры технологических процессов групп лопаток компрессора.

Рисунок 3.5. Структура комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП

6. Далее, в соответствии с рисунком 3.6 формируется структура многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП для  $s$ -ой группы, то есть для любой группы. Данный многосвязный технологический процесс  $s$ -ой группы состоит из следующих структур:

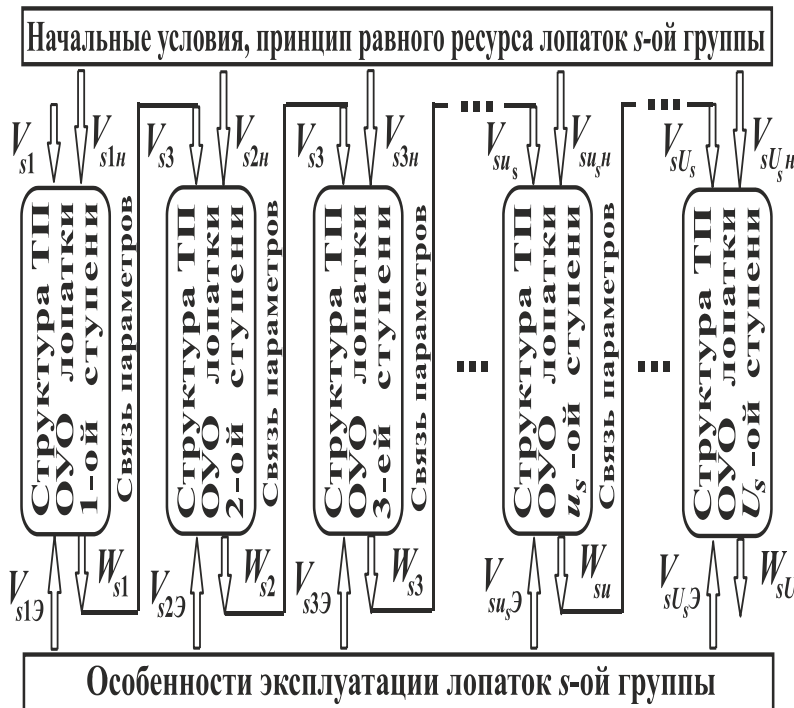
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 1-ой степени;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 2-ой степени;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора 3-ей степени;
- .....

- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора  $u_s$ -ой ступени;
- .....;
- структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора  $U_s$ -ой ступени.

Можно отметить, что представленные структуры (рисунок 3.6) технологических процессов  $s$ -ой группы базируются на следующих особенностях:

- на связях параметров технологических процессов (3.7);
- на введении начальных условий технологических процессов и принципе равного ресурса лопаток компрессора;
- на наличии данных об особенностях эксплуатации лопаток  $s$ -ой группы.

На рисунке 3.6 имеются следующие обозначения:  $V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}, \dots, V_{sus}, \dots, V_{sUs}$  – входные параметры технологических процессов лопаток ступеней компрессора;  $V_{s1H}, V_{s2H}, V_{s3H}, \dots, V_{sUH}, \dots, V_{sUH}$  – входные начальные параметры процессов



лопаток ступеней компрессора;  $V_{s1Э}, V_{s2Э}, V_{s3Э}, \dots, V_{susЭ}, \dots, V_{sUsЭ}$  – входные данные по особенностям эксплуатации лопаток ступеней компрессора;  $W_{s1}, W_{s2}, W_{s3}, \dots, W_{su}, \dots, W_{sU}$  – выходные параметры технологических процессов лопаток ступеней компрессора.

Рисунок 3.6. Структура многосвязного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП для  $s$ -ой группы

7. Затем, в соответствии с рисунком 3.7 формируется структура многосвязного технологического процесса

напыления ФОП  $u_s$ -ой ступени  $s$ -ой группы лопаток компрессора. Данный многосвязный технологический

процесс  $u_s$  –ой ступени  $s$ -ой группы лопаток компрессора состоит из следующих структур:

- структуры технологического процесса напыления 1-го слоя покрытия;
- структуры технологического процесса напыления 2-го слоя покрытия;
- .....;
- структуры технологического процесса напыления  $n$ -го слоя покрытия.

Можно отметить, что в этом случае представленные структуры (рисунок 3.7) технологических процессов напыления ФОП  $u_s$  –ой ступени  $s$ -ой группы лопаток компрессора базируются на следующих особенностях:

- на связях параметров технологических процессов (3.7);
- на введении начальных условий технологических процессов и принципе равного ресурса лопаток компрессора;
- на наличии данных об особенностях эксплуатации лопаток  $u_s$  –ой ступени  $s$ -ой группы.

На рисунке 3.7 имеются следующие обозначения:  $V_{u1}, V_{u2}, \dots, V_{un}$  – входные параметры технологических процессов напыления слоев покрытий лопатки;  $V_{u1н}, V_{u2н}, \dots, V_{unн}$  – входные начальные параметры процессов напыления слоев покрытий лопатки;

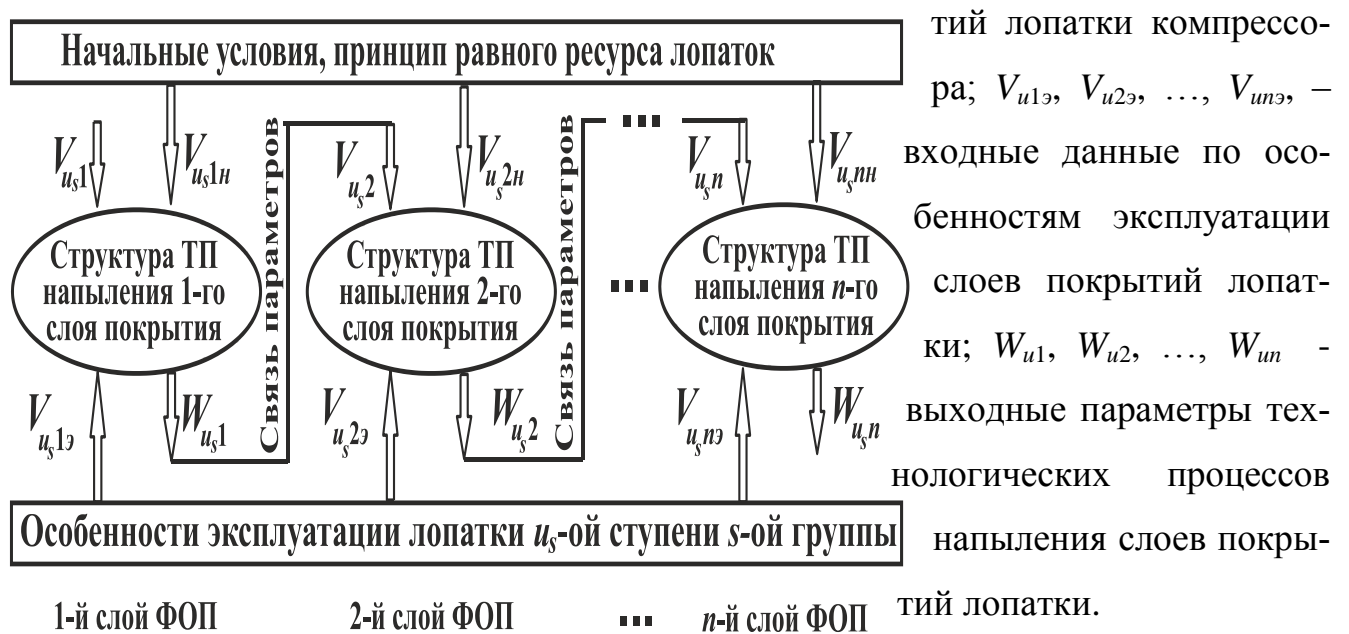


Рисунок 3.7. Структура многосвязного технологического процесса напыления ФОП  $u_s$  –ой ступени  $s$ -ой группы лопаток компрессора

Таким образом, представленная методика синтеза комплексного



отделочно-упрочняющего связного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств групп лопаток позволяет вести разработку комплексного технологического процесса напыления ФОП для лопаток всех ступеней и групп. При этом с помощью этой методики выполняется последовательный синтез многослойного ФОП с необходимыми ПКГ каждого слоя покрытия.

#### **3.4. Синтез развернутой структуры многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора**

В этом подразделе приводятся данные по синтезу развернутой структуры многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора для ГТД. Можно отметить, что структура технологического процесса это совокупность отдельных операций, которые связаны между собой определенными закономерностями и предназначены для обеспечения заданных параметров качества, ФОС, эффективности и других параметров процесса. Также следует иметь в виду, что для обеспечения ФОС лопаток в работе выполняется на базе многослойных ФОП, которые формируются их слоев, каждый из которых имеет определенные параметры, а именно: ПКГ, физико-механические свойства, толщину, количество слоев. Все эти параметры определяются особенностями абразивно-эрозионного износа покрытия при эксплуатации на базе функционально-ориентированного подхода [74] и разработанного нового способа реализации ФОП [100], на который получен патент на изобретение. В этом случае, для реализации каждого слоя ФОП строится свой конкретный технологический процесс, при этом для  $n$  слоев ФОП строится  $n$  отдельные технологические процессы (рисунок 3.8 и рисунок 3.9), связанные между собой следующими закономерностями

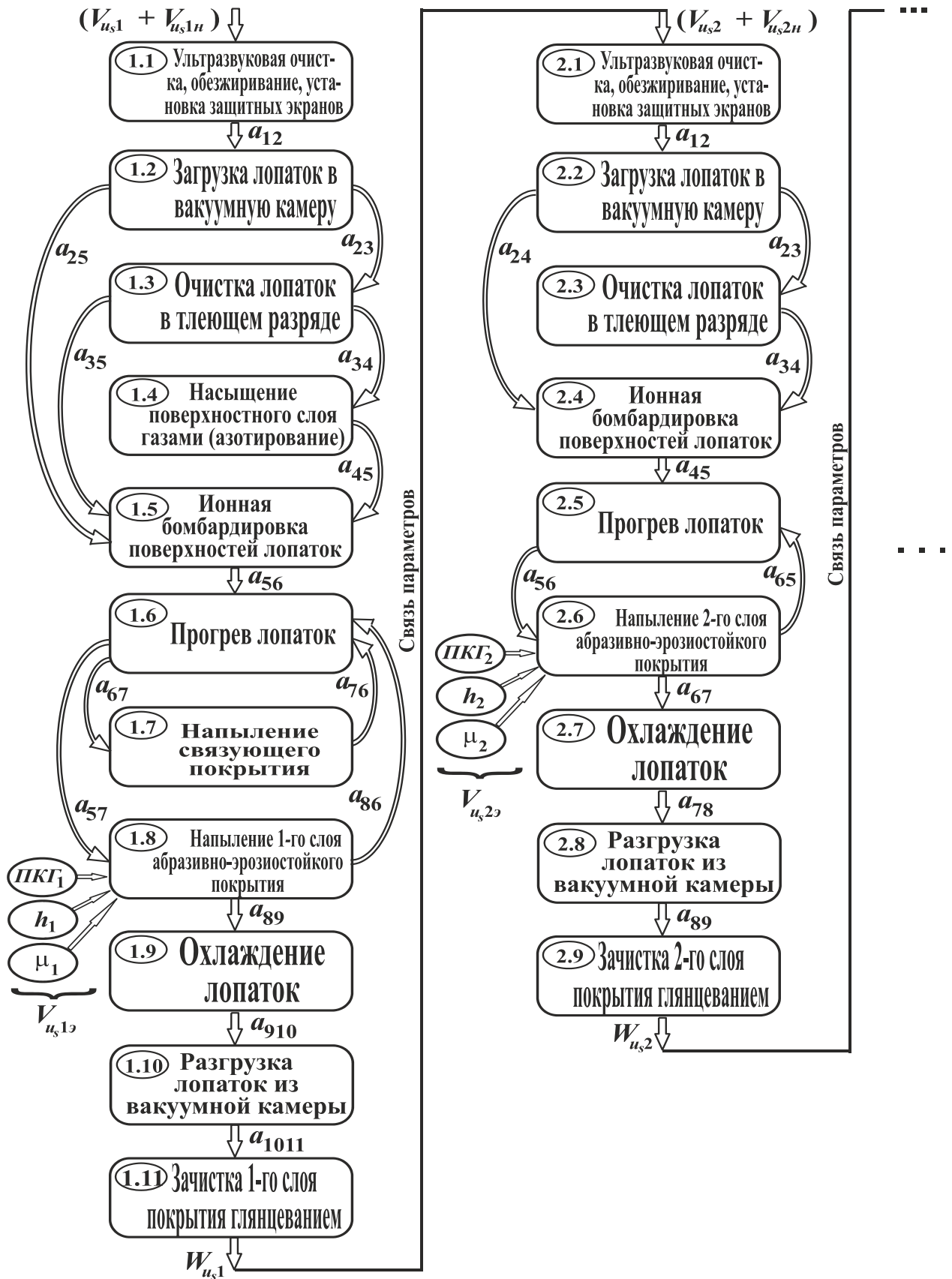


Рисунок 3.8. Развернутая структура многосвязного технологического процесса нанесения ФОП лопаток компрессора  $u_s$ -ой ступени  $s$ -ой группы лопаток компрессора

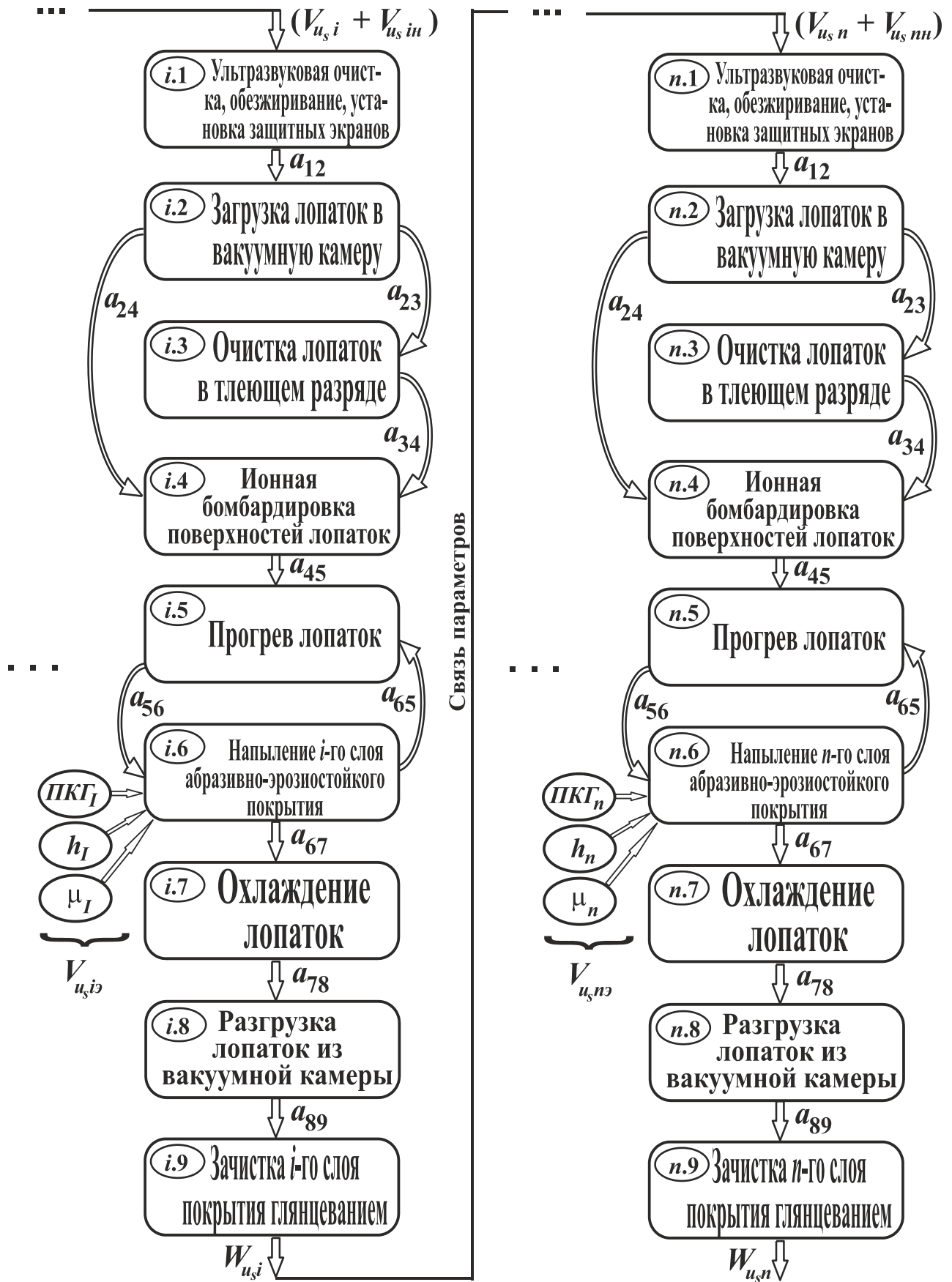


Рисунок 3.9. Продолжение рисунка 3.8

(3.7). На основании этого, технологические процессы реализации ФОП в работе называются – связными.

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

Также следует отметить, что структура технологического процесса это совокупность операций и отношений (связей) между ними. В данной структуре технологического процесса связи для реализации слоев ФОП лопаток компрессора определяются на базе выражений системы (3.7).

На рисунке 3.8 и рисунке 3.9 представлена развернутая структура многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора  $u_s$  –ой ступени  $s$ -ой группы лопаток компрессора. Можно отметить, что структура этого многосвязного технологического процесса формируется  $n$  технологических процессов реализации слоев ФОП.

На рисунке 3.8 и рисунке 3.9 введены следующие обозначения:  $(V_{u_s i} + V_{u_i n})$  - входные параметры  $i$ -го процесса напыления  $i$ -го слоя ФОП, здесь,  $V_{u_s i}$  - входные эксплуатационные параметры,  $V_{u_i n}$  - входные начальные параметры процесса;  $W_{u_s i}$  - выходные параметры  $i$ -го процесса напыления  $i$ -го слоя ФОП;  $a_{km}$  – направление перехода от операции  $k$  к операции  $m$ ;  $ПКГ_i$  – пространственный контур границ  $i$ -го слоя ФОП;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя ФОП;  $\mu_i$  – интенсивность износа  $i$ -го слоя ФОП;  $n$  – количество структур технологических процессов напыления  $n$  слоев ФОП.

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

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

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

1.3. Очитка лопаток компрессора в тлеющем разряде.

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

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

1.6. Прогрев лопаток.

1.7. Напыление связующего покрытия. Связующее покрытие наносится перед напылением нитрид титанового покрытия.

1.8. Напыление 1-го слоя абразивно-эрозионного ФОП. В этом случае, выполняется напыление различных вариантов покрытия. В данной работе выполняется напыление следующих покрытий:  $TiN$ ,  $TiN_2$ ,  $(Ti, Al)N$ ,  $(Ti, Zr)N$  другие варианты покрытий. Здесь следует отметить, что данный слой покрытия имеет следующие параметры:

-  $ПКГ_1$  – пространственный контур границ 1-го слоя покрытия, задается защитным экраном;

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

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

1.9. Охлаждение лопаток в вакуумной камере установки ННВ 6,6 – И1, длительность охлаждения составляет 30 – 45 минут и зависит от степени концентрации лопаток в установке.

1.10. Разгрузка лопаток из вакуумной камеры.

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

Структура последующих технологических процессов имеет следующий алгоритм:

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

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

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

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

*i.5.* Прогрев лопаток.

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

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

-  $h_i$  – толщина *i*-го слоя покрытия, задается временем напыления в вакуумной камере установки;

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

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

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

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

Следует отметить, что в отличие от 1-го технологического процесса напыления 1-го слоя ФОП в последующих процессах отсутствуют следующие операции:

- насыщение поверхностного слоя газами (азотирование);
- напыление связующего покрытия.

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

Можно отметить, что для *n* слоев формируется *n* технологических процессов. Между технологическими процессами установлены связи на основании выражений системы (3.7).

Если напыляемые слоя покрытий имеют одинаковую толщину, то общее количество слоев покрытия находится в функциональной зависимости от интенсивности износа лопатки в группе и номера ступени лопатки, и определяется по следующей формуле:

$$n_i = \frac{T_o \mu_i}{h_1}, \quad (3.8)$$

где  $n_i$  – количество слоев покрытий на *i*-ой лопатке;

$\mu_i$  – интенсивность износа покрытия на *i*-ой лопатке;

$h_1$  – толщина любого слоя покрытия, в этом случае принимается одинаковая толщина слоя покрытия;

$T_o$  – назначенный ресурс ГТД.

Также следует отметить, что в соответствии с выражением (3.7) можно определять параметры толщин покрытий и их количества для различных групп и ступеней лопаток компрессора.

Таким образом, в данном подразделе 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:

- пространственного контура границ  $i$ -го слоя покрытия;
- толщины  $i$ -го слоя покрытия;
- интенсивности износа  $i$ -го слоя ФОП;
- количества слоев покрытий.

Приведенный алгоритм формирования многослойного покрытия позволяет обеспечивать ФОП для любой ступени группы лопаток компрессора ГТД.

### 3.5. Выводы

В представленном разделе работы выполнен структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки групп лопаток компрессора ГТД. В процессе решения этого вопроса получены следующие результаты:

1. В работе выполнен анализ особенности синтеза комплексного многосвязного 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. На базе этой схемы обеспечивается возможность построения комплексного многосвязного процесса с учетом связей параметров реализации функционально-ориентированного покрытия.



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

3. В работе установлены связи 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.

4. На базе установленных связей обеспечивается возможность формирования комплексного многосвязного технологического процесса реализации функционально-ориентированного покрытия для всех ступеней и групп лопаток компрессора.

5. Предложенная методика синтеза комплексного отделочно-упрочняющего связного 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 выполняется последовательный синтез многослойного ФОП с необходимыми параметрами каждого слоя покрытия.

6. Для создания конкретных вариантов технологических процессов проведен синтез развернутой структуры многосвязного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора. Этот технологический процесс позволяет решать вопросы напыления многослойного ФОП в зависимости от следующих параметров:

- пространственного контура границ  $i$ -го слоя покрытия;
- толщины  $i$ -го слоя покрытия;

- интенсивности износа  $i$ -го слоя ФОП;
- количества слоев покрытий.

Приведенный алгоритм формирования многослойного покрытия позволяет обеспечивать ФОП для любой ступени группы лопаток компрессора ГТД.

## РАЗДЕЛ 4

# СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ГРУПП ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

### 4.1. Общее положение

Многослойное ФОП лопатки компрессора это специальное покрытие, которое обеспечивает равномерный единовременный износ всего покрытия в период гарантированного ресурса ГТД в условиях действия неравномерного абразивно-эрозионного износа по поверхностям лопатки, по лопаткам группы и между лопатками группы. С помощью ФОП можно выравнивать износ покрытия поверхности лопатки за счет обеспечения единовременного износа покрытия в период гарантированного ресурса ГТД, можно выравнивать износ ФОП ступеней лопаток в группе, а также обеспечить равный ресурс групп лопаток относительно друг друга в условия действия неравномерностей износа лопаток трех рангов.

В этом параграфе решаются вопросы синтеза технологического обеспечения по реализации функционально-ориентированных покрытий для групп лопаток компрессора. При этом планируется рассмотреть следующие вопросы:

- 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;
- разработать методику определения геометрических параметров пространственного контура границ покрытия групп лопаток компрессора;

- рассмотреть особенности повышения ресурса лопаток компрессора на базе ФОП и принципа равенства ресурса групп лопаток;
- составить матрицу интенсивности износа покрытия групп лопаток компрессора (Приложение П 1).

#### **4.2. Способ напыления многослойного функционально-ориентированного покрытия лопаток компрессора в структуре связанного технологического процесса обработки групп лопаток**

Технологический процесс напыления ФОП лопаток компрессора (рисунок 3.8 и рисунок 3.9) выполняется путем последовательной нанесения отдельных слоев покрытия (рисунок 3.4), 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 [100].

На рисунке 4.1 показаны особенности абразивно-эрозионного износа покрытия рабочих лопаток компрессора [100], координируемых пространственным контуром границ (ПКГ) износа. Здесь, показано следующее: рисунок 4.1, а – износ

координируется 3-мя ПКГ; рисунок 4.1, б – износ координируется 5-ю ПКГ. На базе представленных особенностей формируется ПКГ износа покрытия рабочих лопаток компрессора. На рисунке 4.1 буквами показаны ПКГ износа покрытия, например:  $f_{11}, f_{12}, f_{13}$  – 1-й ПКГ износа покрытия лопатки компрессора и так далее (рисунок 4.1, а). Цифры обозначают следующее: 1 – рабочая лопатка компрессора, 2, 3, 4, 5, 6 – ПКГ износа лопаток.

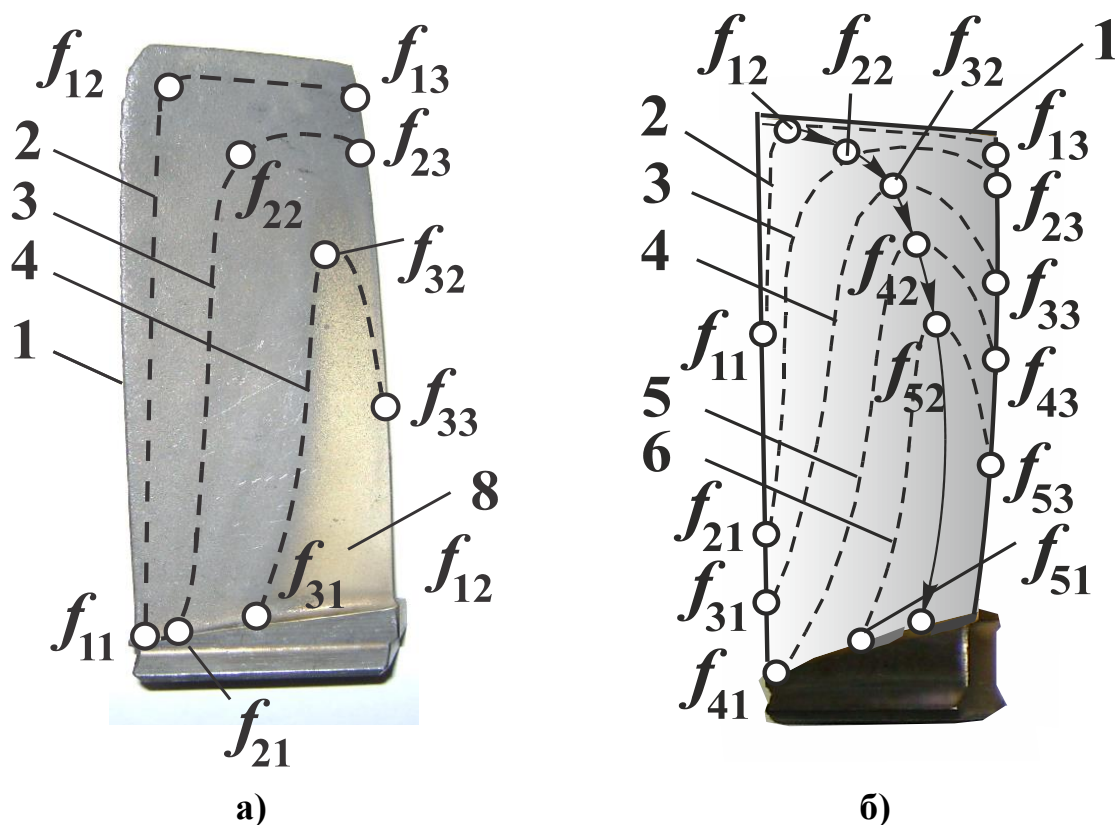


Рисунок 4.1. Особенности абразивно-эрозионного износа покрытия рабочих лопаток компрессора, координируемых пространственным контуром границ (ПКГ) износа: а – износ координируется 3-мя ПКГ; б – износ координируется 5-ю ПКГ

Следует отметить, что для других групп лопаток компрессора ГТД абразивно-эрозионный износ лопаток имеет свои отличительные особенности. На рисунке 4.2 представлен пространственный контур границ (ПКГ) износа покрытия лопатки НА статора компрессора

Можно отметить, что для реализации ФОП разработан способ напыления многослойного ФОП лопаток компрессора, на который получено положительное

решение на изобретение [100]. Далее, рассмотрим предлагаемый способ напыления многослойного ФОРП лопаток компрессора.

Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя (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)) [100], работающей в условиях действия неравномерного абразивно-эрозионного износа, включающий процесс нанесения покрытия постоянной толщины (рисунок 3.4) на перо лопатки при помощи зонального защитного экрана, отличающийся тем, что покрытие формируется многослойным переменной толщины из слоев постоянной толщины с различными топографическими параметрами пространственного контура границ каждого слоя, которые наносятся с использованием нескольких зональных защитных экранов, про-



Рисунок 4.2. ПКГ износа покрытия лопатки НА статора компрессора

странственный 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 пространственного контура границ 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 пространственные контуры границ за весь период ресурса опытного покрытия, причем в процессе нанесения каждого слоя покрытия зональные защитные экраны с отображенными пространственными контурами границ устанавливаются на лопатку в обратной последовательности относительно последовательности изме-

рений топографических параметров отображений пространственного контура границ 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 способом, толщина любого наносимого слоя многослойного покрытия (рисунок 3.4) может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения длительности промежутка времени между измерениями топографических параметров отображений пространственного контура границ износа опытного покрытия на зональные защитные экраны.

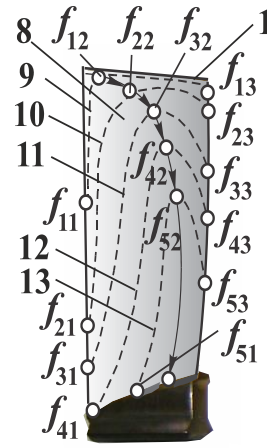
При этом толщина любого наносимого слоя многослойного покрытия (рисунок 4.3) может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения параметров его стойкости [100].

Кроме того в процессе нанесения многослойного покрытия (рисунок 4.3), зональные защитные экраны устанавливаются на лопатку в соответствии с последовательностью измерений топографических параметров отображений пространственного контура границ износа опытного покрытия, в этом случае последний слой покрытия наносится без зонального защитного экрана [100].

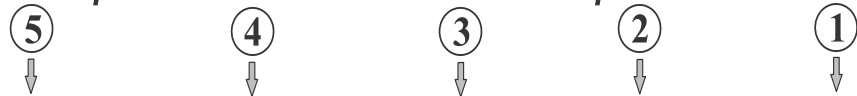
Процесс нанесения функционально-ориентированного покрытия выполняется в три этапа [100].

Сначала, на первом этапе (рисунок 4.3), предварительно производится испытание в условиях эксплуатации газотурбинного двигателя опытного однослойного покрытия 8 постоянной толщины на пера лопатки 1 [100], имеющего физико-механические свойства и свою толщину  $h_i$ , одинаковые с наносимым функционально-ориентированным покрытием каждого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7. При этом выполняются замеры топографических параметров (рисунок 4.1) пространственного контура границ 9, 10, 11, 12, 13 не износившейся части опытного покрытия на поверхности пера лопатки, которые показаны на рисунке 4.3 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 [100].

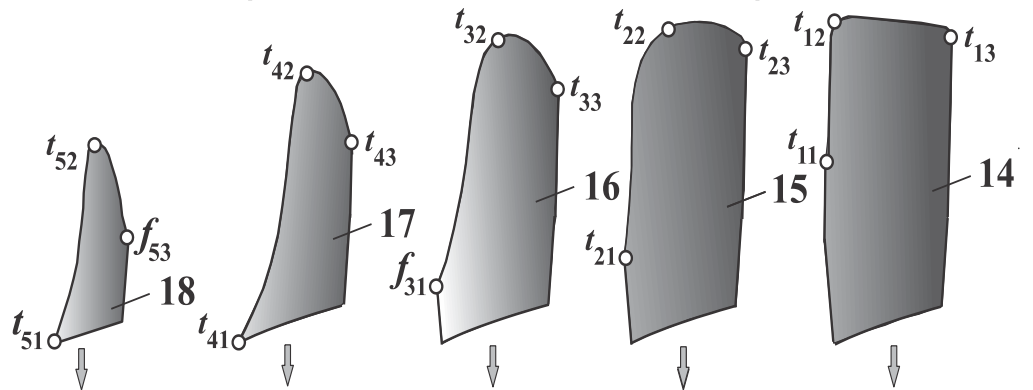
**I этап:** получение параметров ПКГ износа однослойного опытного покрытия в условиях эксплуатации



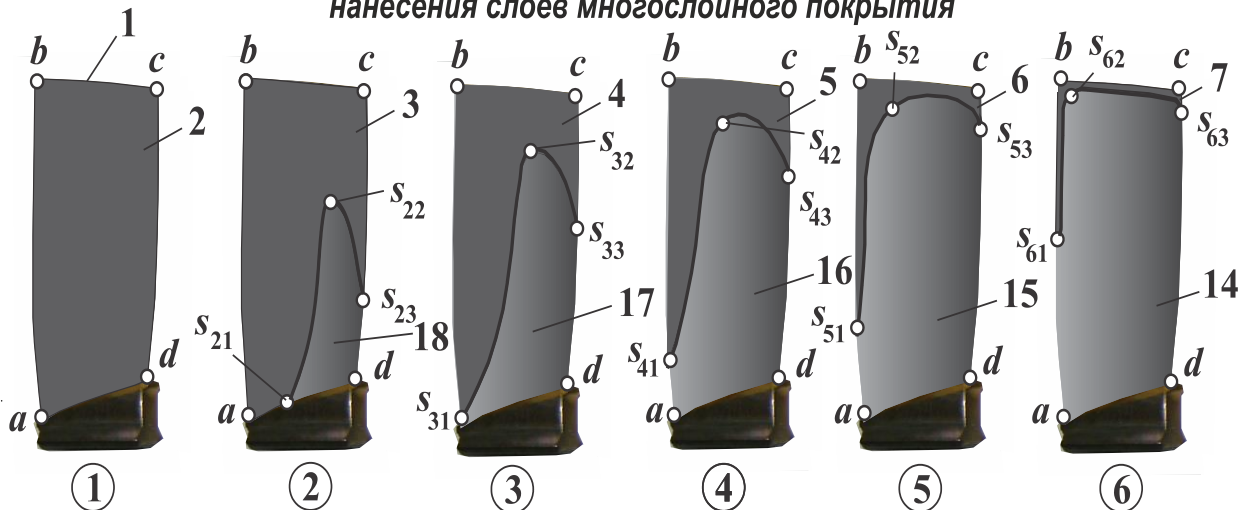
**Номера последовательности измерений ПКГ износа**



**II этап:** отображение ПКГ износа опытного покрытия на зональные защитные экраны



**III этап:** последовательная установка на лопатку экрана и нанесения слоев многослойного покрытия



**Номера слоев нанесения покрытий**

Рисунок 4.3. Основные этапы выполнения способа реализации многослойного ФОП рабочих лопаток компрессора



Затем, на втором этапе (рисунок 4.3), выполняется отображение топографических параметров [100] пространственного контура границ 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 пространственные контуры границ  $t_{11} t_{12} t_{13}$ ,  $t_{21} t_{22} t_{23}$ ,  $t_{31} t_{32} t_{33}$ ,  $t_{41} t_{42} t_{43}$ ,  $t_{51} t_{52} t_{53}$ , за весь период ресурса опытного покрытия 8 [100].

Далее, на третьем этапе (рисунок 4.3), выполняется последовательный процесс нанесения каждого слоя покрытий [100]. При этом первое покрытие 19 на пере лопатки наносится без зонального защитного экрана, а покрытия 20, 21, 22, 23, 24 выполняются с зональными защитными экранами, на которых отображены пространственные контуры границ. В этом случае, зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18, устанавливаются на лопатку 1 в обратной последовательности относительно последовательности измерений топографических параметров отображений пространственного контура границ 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 [100]. Поэтому на пере лопатки 1 получают многослойное функционально-ориентированное покрытие переменной толщины из слоев постоянной толщины 2, 3, 4, 5, 6, 7 (рисунок 3.4) с различными топографическими параметрами пространственного контура границ 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 газотурбинном двигателе [100].

В процессе нанесения покрытия, толщина  $h_i$  (рисунок 3.4) 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 пространственного контура границ износа опытного покрытия 8 на зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18 [100].

А также, толщина  $h_i$  (рисунок 3.4) 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 [100].

Кроме того, в процессе нанесения многослойного покрытия, зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18 (рисунок 4.3) устанавливаются на лопатку 1 в соответствии с последовательностью измерений топографических параметров отображений пространственного контура границ износа опытного покрытия 8, в этом случае последний слой покрытия наносится без зонального защитного экрана [100].

Функционально-ориентированное износостойкое многослойное покрытие лопатки газотурбинного двигателя, 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 [100]. Кроме того, функционально-ориентированное покрытие лопатки имеет способность полностью разрушаться в заданный период времени, что исключает процесс его удаления в процессе ремонта лопатки с последующим нанесением нового покрытия [100].

Можно отметить, что в процессе реализации многослойного ФОП возможны и другие методы обеспечения ПКГ каждого слоя, например в соответствии с разработанным способом нанесения нитрид титанового рельефного покрытия на поверхность лопатки, на который получен патент на изобретение [99]. Эти материалы будут представлены в следующем параграфе данной работы.

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать способ напыления многослойного ФОП лопаток компрессора в структуре связного технологического процесса обработки групп лопаток. Предлагаемый способ позволяет напылять ФОП, которое обеспечивает возможность повышения ресурса каждой лопатки, единовременного износа покрытия в период гарантированного ресурса

лопаток компрессора, выравнивания ресурса лопаток каждой группы и выравнивания ресурса групп лопаток относительно друг друга в компрессоре ГТД.

#### **4.3. Особенности формирования пространственного контура границ слоев многослойного функционально-ориентированного покрытия групп лопаток компрессора**

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

- за счет применения специальных экранов [100] (Патент России Заявка на изобретение № 2018107164/02(010972) РФ. МПК 8 С 23 С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя [Текст] / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов и [др.]; заявитель и патентообладатель УФ УГТУ; заявл. 26.02.2018; - 11 с.), особенности выполнения которых представлены в предыдущем параграфе данной работы;

- посредством использования специального способа нанесения рельефного покрытия, предложенного в работе [99], на который получен патент на изобретение (Патент Украины № 54100 А МПК 7 С23С 14/04. Спосіб нанесення нітридного декоративного рельєфного покриття на поверхню виробу / В. О. Михайлов. Заявка № 2002053915 от 14.05.2002, БИ 3003. – 6 с.).

В этом разделе рассматривается вопрос реализации ПКГ ФОП на основе разработанного второго способа нанесения рельефного покрытия, предложенного в работе [99].

Этот способ нанесения нитрид 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 нитрид 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 4.4) [99]:

- 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.

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

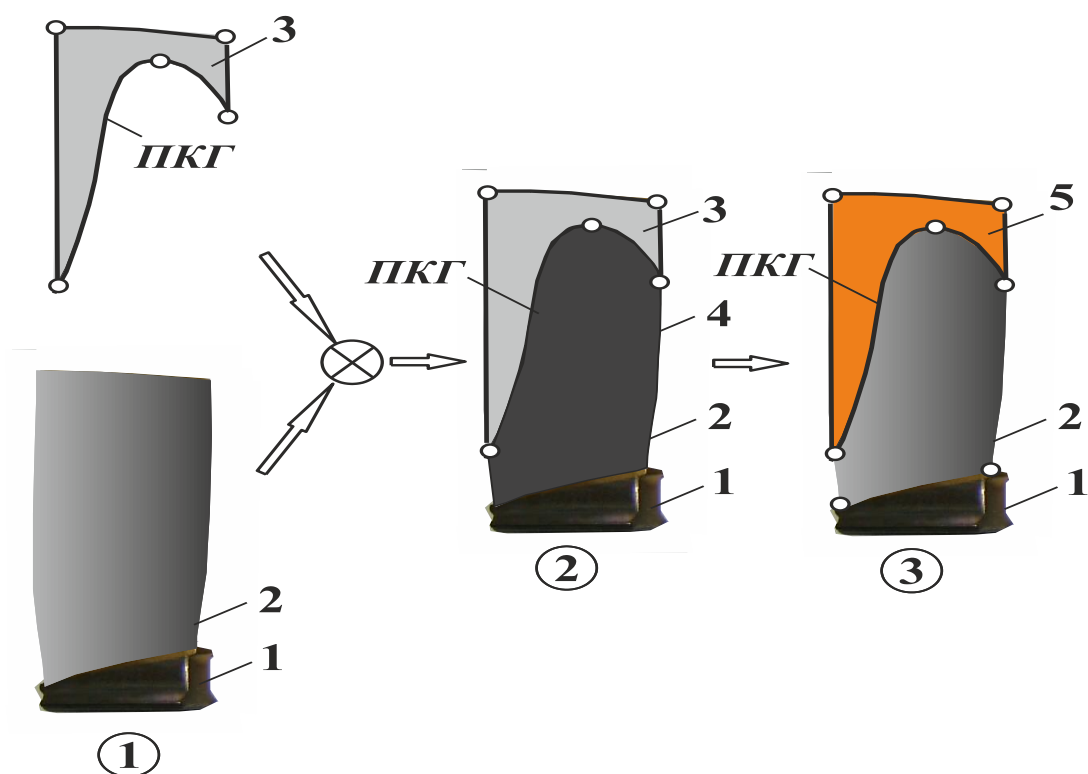


Рисунок 4.4. Схема формирования одного слоя ФОП с ПКГ

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 4.4 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, мето-

дом копчения с помощью масляной фитильной горелки. Для каждого слоя нитрид титанового покрытия изготавливается трафарет со своим специальным ПКГ (рисунок 4.4).

В этом случае, на первом этапе процесса (рисунок 4.4), 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 4.4). 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.

На рисунке 4.5 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.

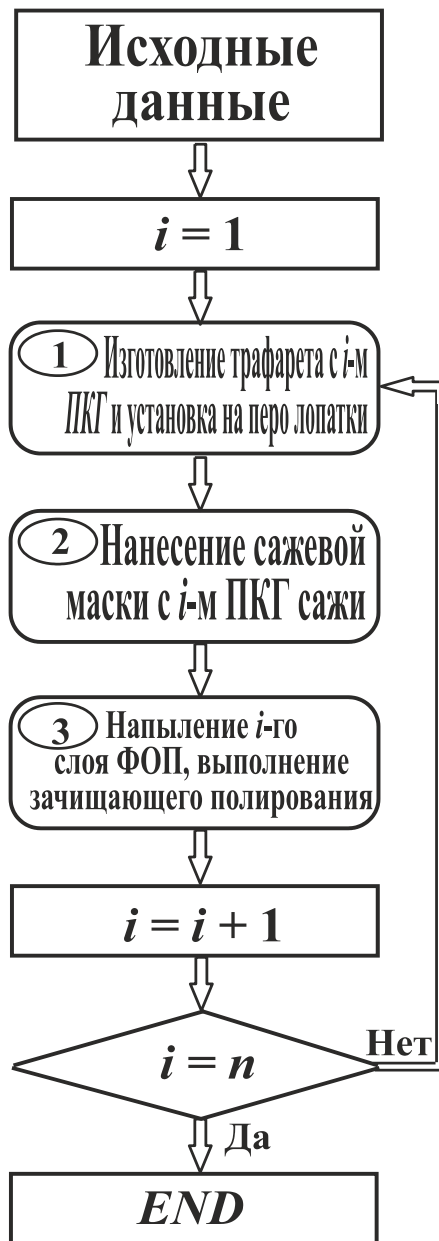


Рисунок 4.5. Алгоритм реализации технологического процесса формирования ФОП с ПКГ каждого слоя

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*.

По предлагаемому способу [99] 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 [99] 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.

#### **4.4. Методика определения геометрических параметров пространственного контура границ покрытия групп лопаток компрессора**

Для реализации предлагаемых способов формирования ФОП лопаток компрессора [99, 100] на первом этапе, при определении ПКГ, который изменяется в процессе эксплуатации лопаток с покрытием, необходимо определять геометрические параметры ПКГ для реализации специальных экранов [100] или трафаретов [99] 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 4.6 в качестве примера представлены лопатки компрессора со схемами ПКГ износа покрытия. Здесь показано: рисунок 4.6, а – общий вид рабочей лопатки с тремя ПКГ; рисунок 4.6, б – схема рабочей лопатки с пятью ПКГ; рисунок 4.6, в – общий вид лопатки НА статора с ПКГ.

Значение величины равных промежутков времени определяется на основании следующего выражения:

$$T_i = \frac{T_o}{n}, \quad (4.1)$$



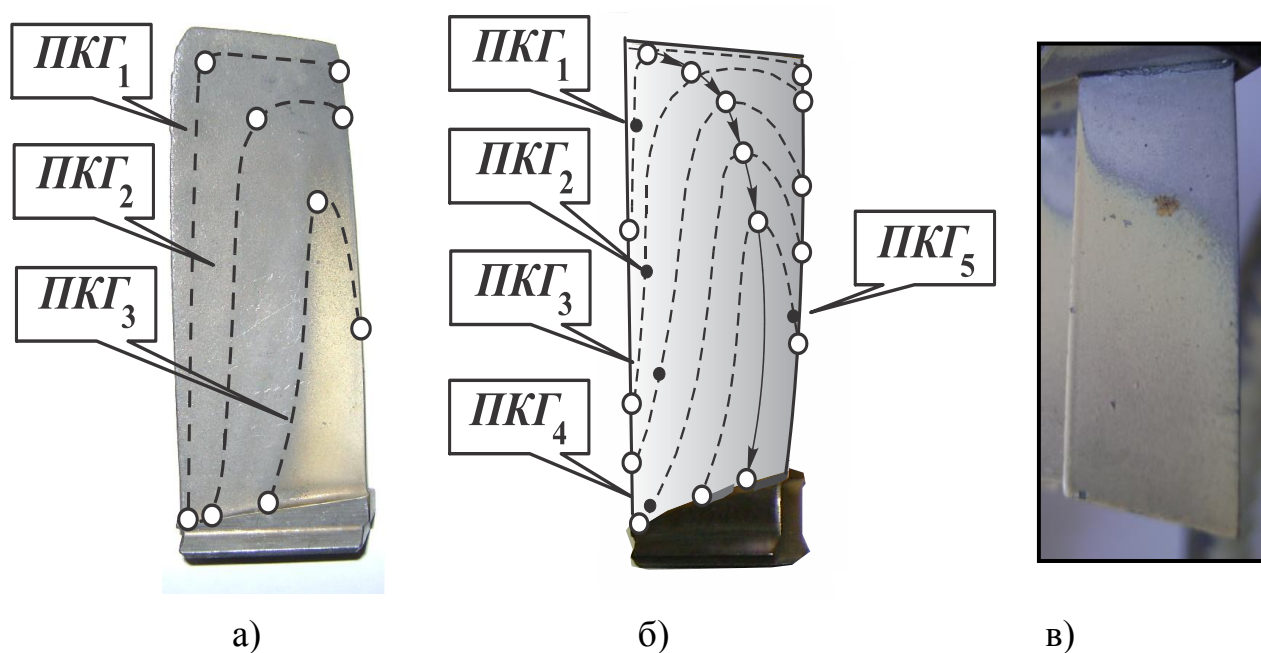


Рисунок 4.6. Лопатки компрессора со схемами ПКГ износа покрытия:  
 а – общий вид рабочей лопатки с тремя ПКГ (5-я группа лопаток); б – схема рабочей лопатки с пятью ПКГ (5-я группа лопаток); в – общий вид лопатки НА статора с ПКГ (3-я группа лопаток)

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 4.6 приведены примеры наложения ПКГ по износу покрытия на поверхности пера лопатки.

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

1. Через равные промежутки времени, определяемыми по выражению (4.1), 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 пере лопатки в программе CorelDraw Graphics Suite X6 строится усредненная кривая линия ПКГ (рисунок 4.7).

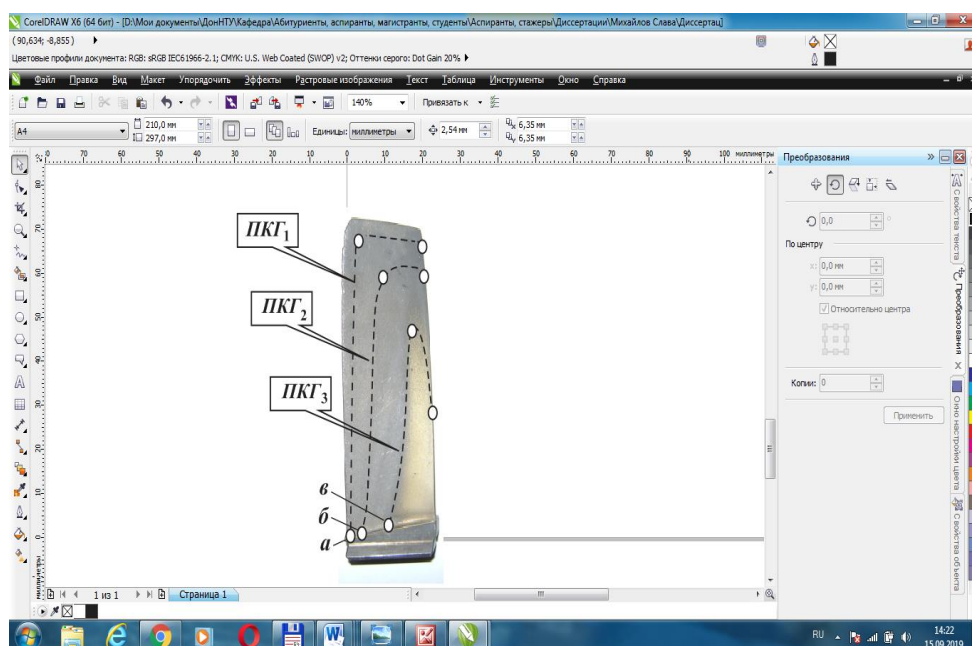


Рисунок 4.7. Общий вид рабочей лопатки компрессора с ПКГ износа покрытия в окне программы CorelDraw Graphics Suite X6 в процессе определения координат ПКГ

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 4.7). Полученные данные значений координат ПКГ записываются в таблицы.

6. Далее, продолжается эксплуатация ГТД, и через период, определяемый по формуле (4.1), 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:

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

1. Изготовления комплекта защитных экранов с ПКГ для реализации разработанного способа формирования многослойных ФОП [100] пера лопатки компрессора.

2. Изготовление трафаретов для реализации сажевых масок и формирования ФОП [99] пера лопатки компрессора.

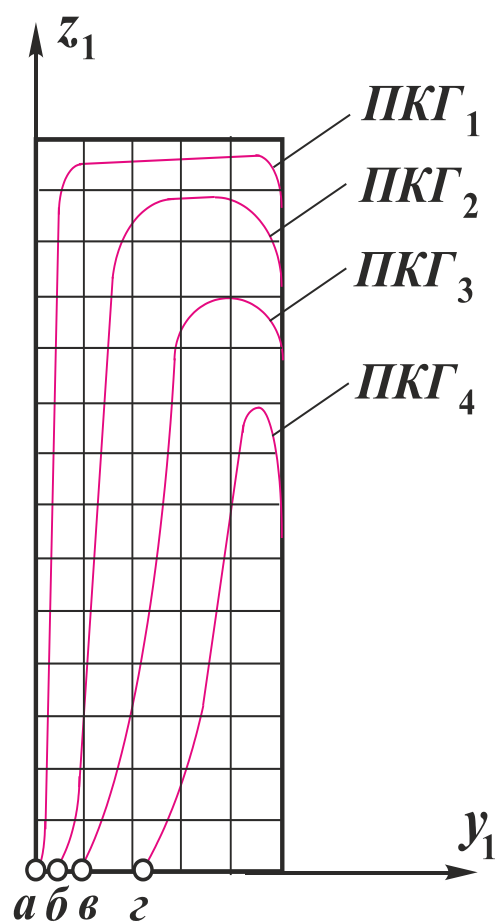


Рисунок 4.8. Пространственные контуры границ (ПКГ) абразивно-эрозионного износа пера рабочей лопатки компрессора ГТД

На рисунке 4.8 показаны пространственные контуры границ (ПКГ) абразивно-эрозионного износа пера рабочей лопатки компрессора ГТД модели ТВ3-117 рабочей лопатки 1-ой ступени. Здесь, схематически показаны 4-е замера ПКГ через равные промежутки времени. Значение времени замеров определялись на основании выражения (4.1). 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 4.8) лопатки компрессора, затем –  $ПКГ_2$  второго контура, и так далее, пока все контуры не будут скоординированы в соответствии с предлагаемой методикой. Результаты измерений координат ПКГ износа пера лопатки компрессора заносятся в таблицы.

В таблице 4.1 представлены геометрические параметры 1-го пространственного контура границ (ПКГ) рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти ФОП (определяются 4-е ПКГ) в системе координат  $y_1, O, z_1$ . Эти параметры определялись по лопаткам ОАО «Луганский авиаремонтный завод».

Таблица 4.1. Геометрические параметры 1-го пространственного контура границ (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	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  $ПКГ_1$  износа покрытия пера лопатки выполняется процесс определения координат 2-го  $ПКГ_2$ . Результаты замеров заносятся в таблицу 4.2.

В таблице 4.2 представлены геометрические параметры 2-го пространственного контура границ (ПКГ) рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти ФОП (определяются 4-е ПКГ) в системе координат  $y_1, O, z_1$ .

Таблица 4.2. Геометрические параметры 2-го пространственного контура границ (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	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 4.3.

В таблице 4.3 представлены геометрические параметры 3-го пространственного контура границ (ПКГ) рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти ФОП (определяются 4-е ПКГ) 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 4.4.

В таблице 4.4 представлены геометрические параметры 4-го пространственного контура границ (ПКГ) рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти ФОП (определяются 4-е ПКГ) в системе координат  $y_1, O, z_1$ .

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

Таблица 4.3. Геометрические параметры 3-го пространственного контура границ (ПКГ) рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти ФОР 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 4.4. Геометрические параметры 4-го пространственного контура границ (ПКГ) рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти ФОР 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, в этом параграфе разработана методика определения геометрических параметров пространственного контура границ покрытия групп лопаток компрессора. Эта методика позволяет определять координаты ПКГ для технологического обеспечения и реализовывать специальные экраны или трафареты для формирования многослойного ФОП.

#### **4.5. Особенности повышения ресурса лопаток компрессора на базе функционально-ориентированных покрытий и принципа равенства ресурса групп лопаток**

ГТД можно представить совокупность подсистем, связанных и взаимодействующих между собой, выполняющих целый комплекс эксплуатационных функций. При этом работа ГТД основывается на термогазодинамическом цикле Брайтона, который обеспечивает высокие эксплуатационные параметры его работы.

Одним из основных подсистем ГТД является компрессор, который обуславливает выполнение определенной части алгоритма цикла Брайтона. Компрессор ГТД также состоит из целого комплекса элементов и их групп. При этом к основным его элементам относятся лопатки. В компрессоре лопатки структурируются группами, а именно:

- поворотные лопатки ВНА,
- поворотные лопатки НА,
- лопатки НА,
- лопатки ВСА,
- рабочие лопатки ротора.

При работе ГТД эти группы лопаток имеют свои эксплуатационные особенности, а именно, для каждой лопатки, для группы лопаток и для всего компрессора. Это приводит к возникновению неравномерностей эксплуатационных воздействий на лопатки трех рангов:

- неодинакового воздействия по поверхности пера лопатки,
- неравномерных воздействий по лопаткам каждой группы,
- неравномерных воздействий между группами лопаток.

Указанные неравномерности приводят к неравномерному абразивно-эрозионному износу лопаток компрессора:

- по рабочей поверхности пера каждой лопатки (неравномерность износа 1-го ранга);
- по лопаткам ступеней каждой группы лопаток (неравномерность износа 2-го ранга);
- по группам лопаток компрессора (неравномерность износа 3-го ранга).

Для исключения действия этих неравномерностей износа лопаток в данной работе предлагается использовать многослойные ФОП лопаток. ФОП это специальные многослойные покрытия обеспечивающие возможность исключения действия этих неравномерностей износа и повышения ресурса лопаток.

Применение ФОП лопаток компрессора позволяет в период их гарантированного ресурса и действия неравномерного износа трех рангов решить следующие вопросы:

- 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:



$$h_i = h_{i1} + h_{i2} + h_{i3} + h_{i4} = \frac{\mu_i T_o}{n}; \quad (4.2)$$

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

Таким образом, используя ФОП лопаток компрессора, толщина которого определяется с использованием выражения (4.2) обеспечивается, в условиях действия неравномерностей износа трех рангов, следующая возможность лопаток компрессора:

- в период гарантированного ресурса лопаток исключается действие неравномерностей износа трех рангов;
- выполняется технологическая адаптация свойств лопаток к особенностям их эксплуатации в компрессоре;
- обеспечивается возможность управления свойствами лопаток компрессора в зависимости от действия эксплуатационных функций;

- повышается потенциальная возможность лопаток к увеличению их ресурса или управления ресурсом в зависимости от требований заказчика;
- обеспечивается возможность обеспечения ресурса лопаток компрессора близкого к предельному значению;
- обеспечивается возможность многократного восстановления свойств лопаток компрессора при ремонтах.

#### **4.6. Выводы**

Таким образом, представленные в данном разделе результаты направлены на решение вопросов синтеза технологического обеспечения по реализации ФОП для групп лопаток компрессора. Это позволило последовательно провести исследования по синтезу технологического обеспечения для реализации технологического процесса формирования ФОП лопаток компрессора, которые заключаются в следующем:

1. В работе разработан новый способ нанесения многослойного ФОП лопаток компрессора и реализация структуры связного технологического процесса групп лопаток на основе принципа равенства ресурсов, на который получен патент (положительное решение, см. Приложение ПЗ) на изобретение [100]. Предлагаемый способ позволяет напылять ФОП, которое обеспечивает возможность повышения ресурса каждой лопатки, единовременного износа покрытия в период гарантированного ресурса лопаток компрессора, выравнивания ресурса лопаток каждой группы и выравнивания ресурса групп лопаток относительно друг друга в компрессоре ГТД.

2. А также в данной работе исследованы основные особенности формирования пространственного контура границ слоев многослойного ФОП групп лопаток

компрессора. При этом разработан способ [99] реализации ПКГ каждого слоя для ФОП, который 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. В работе предложена схема формирования ФОП с ПКГ и алгоритм реализации технологического процесса формирования ФОП с ПКГ каждого слоя.

3. Разработана методика определения геометрических параметров пространственного контура границ покрытия групп лопаток компрессора. Эта методика позволяет определять координаты ПКГ для технологического обеспечения и реализовывать специальные экраны или трафареты для формирования многослойного ФОП. Разработанная методика базируется на решении вопросов определения параметров ПКГ в программе CorelDraw Graphics Suite X6.

4. Выполненные исследования позволили рассмотреть вопросы, связанные с определением особенностей повышения ресурса лопаток компрессора на базе ФОП и принципа равенства ресурса групп лопаток. При этом в работе показано, что применение ФОП лопаток компрессора позволяет в период их гарантированного ресурса и действия неравномерного износа трех рангов решить следующие вопросы:

- 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.

**РАЗДЕЛ 5**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОСВЯЗНОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ГРУПП  
ЛОПАТОК. РЕКОМЕНДАЦИИ И ВНЕДРЕНИЕ  
РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОИЗВОДСТВО**

**5.1. Общие положения**

Можно отметить, что в работах [90, 91, 93, 105] установлено, что ФОП позволяют существенно повысить ресурс лопаток ГТД и ГТУ. Об этом свидетельствуют проведенные экспериментальные исследования, представленные в работах [93, 105].

В этом разделе будут рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальной реализацией многосвязного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора ГТД. ФОП, за счет своих особенностей позволяют решать вопросы выравнивания ресурса групп лопаток компрессора в условиях действия эксплуатационных неравномерностей износа трех рангов. Именно эти покрытия обеспечивают повышение ресурса лопаток компрессора в целом, единовременный износ покрытия всех лопаток без износа основного материала лопаток в период их гарантированного ресурса и возможность восстановления работоспособности лопаток за счет ФОП. При этом здесь будет представлен многосвязный технологический процесс ОУО и формирования ФОП лопаток компрессора из условия реализации принципа равенства ресурса их эксплуатации в компрессоре. Это достигается в данной работе на базе матрицы установленной интенсивно-

сти износа покрытия групп лопаток компрессора, представленной в приложении П 1 данной работы.

Таким образом, в этом разделе, экспериментальные исследования будут выполняться по реализации технологического процесса и по выполнению ФОП групп лопаток компрессора с учетом связей и особенностей интенсивности износа покрытия лопаток в различных группах и ступенях компрессора. В целом в этом разделе работы будут выполнено следующее:

- представлена методика экспериментальной реализации связного процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса;
  - выполнена разработка методики проведения экспериментальных исследований и реализации ФОП лопаток на базе равенства их ресурса;
  - приведены общие рекомендации диссертационной работы;
  - даны особенности внедрения результатов работы в производство.
- Эти вопросы решаются в данном разделе диссертационной работы.

## **5.2. Методика экспериментальной реализации связного технологического процесса формирования функционально-ориентированного покрытия групп лопаток на базе принципа равенства ресурса**

На рисунке 5.1 представлены основные этапы методики экспериментальной реализации связного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса. Она содержит следующие этапы реализации:

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

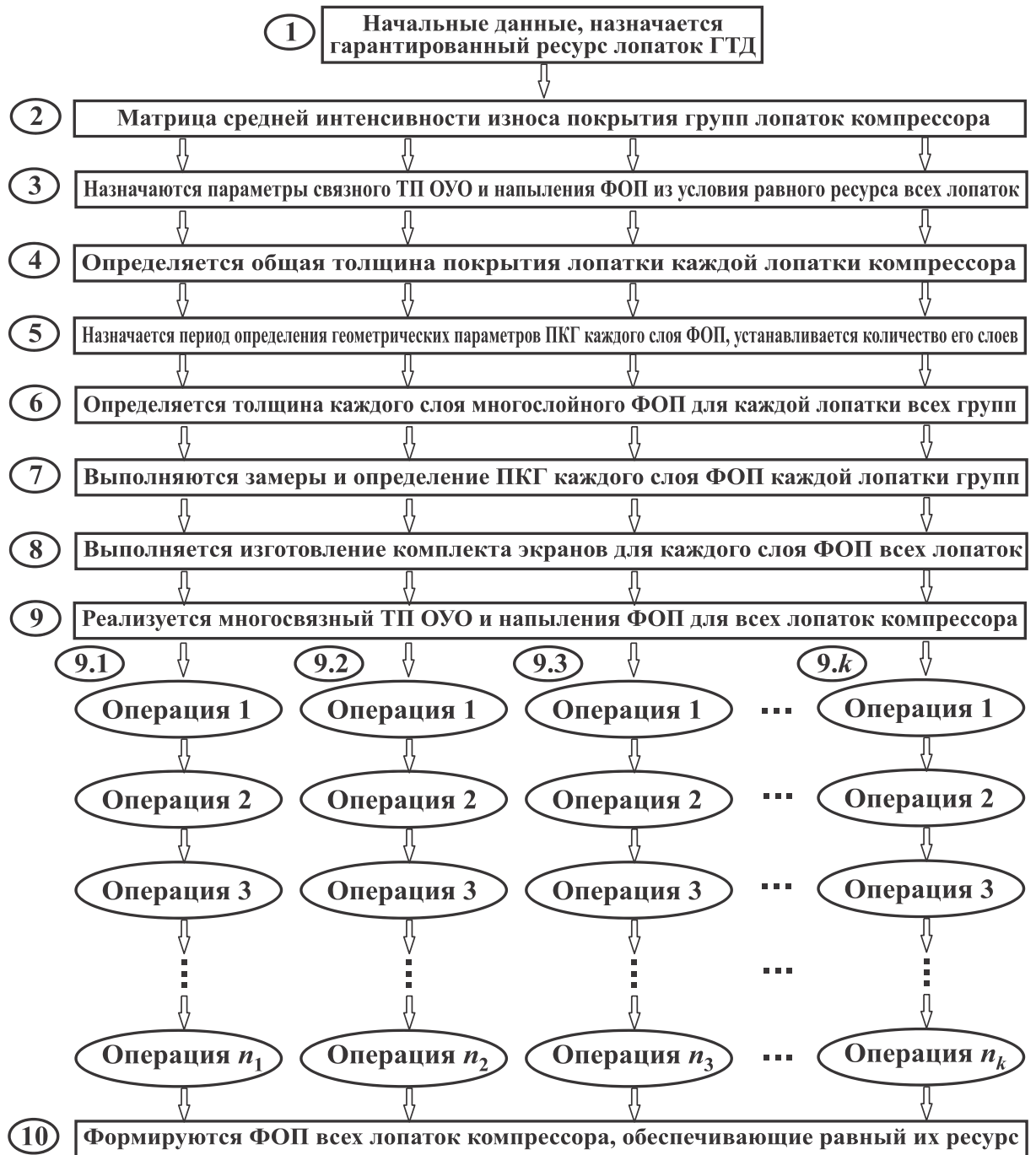


Рисунок 5.1. Основные этапы методики экспериментальной реализации связанного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса

2. Предварительно устанавливаются параметры средней интенсивности износа  $\mu_{Ri}$  покрытия групп лопаток компрессора ГТД. Результаты исследований записываются в таблицу П 1 и таблицу П 2 (Приложение П 1). Эти результаты представ-

лены для турбовальных двигателей модели ТВЗ-117 на основании износа лопаток для двадцати ГТД, ремонтируемых на ОАО «Луганский авиаремонтный завод».

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

- нитрид титановое покрытие,
- нитрид алюминий титановое покрытие.

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

$$H_i = \mu_{Ri} T_o, \quad (5.1)$$

где  $H_i$  - общая толщина покрытия лопаток.

Результаты расчетов общих толщин для нитрид титанового и нитрид алюминий титанового покрытия для лопаток различных групп компрессора ГТД модели ТВЗ-117 представлены в таблице 5.1 и таблице 5.2.

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

Данный период можно определить с учетом следующего условия:

$$T_o = \sum_{j=1}^n t_j, \quad (5.2)$$

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

$t_j$  –  $j$ -й период.

Если  $t_1 = t_2 = t_3 = \dots = t_n$ , то значение периода определения геометрических параметров ПКГ находим в соответствии со следующим выражением

$$t_j = \frac{T_o}{n}. \quad (5.3)$$

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

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

6. Определяется толщина каждого слоя многослойного ФОП. В случае, если толщины слоев каждого ФОП лопатки равны  $h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n$  толщина каждого слоя покрытия определяется на основании выражения (5.4):

Таблица 5.1. Значения общей толщины покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

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



Таблица 5.2. Значения общей толщины покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

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

Таблица 5.3. Значения толщины каждого слоя покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

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

Таблица 5.4. Значения толщины каждого слоя покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВЗ-117 (четырёхслойное покрытие)

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

$$h_j = \frac{H_i}{n}. \quad (5.4)$$

где  $h_j$  - толщина любого слоя многослойного ФОП.

Результаты определения толщин слоев покрытий заносятся в таблицу 5.3 и таблицу 5.4.

7. Выполняются замеры и определение ПКГ каждого слоя ФОП каждой лопатки групп для всего компрессора. Они производятся в соответствии с методикой подраздела 4.4.

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

9. Реализуется многосвязный технологический процесс ОУО и напыления ФОП для всех лопаток компрессора. В этом случае выполняются процессы 9.1; 9.2; 9.3; ...; 9.k, где k – общее количество технологических процессов или различных лопаток компрессора. На рисунке 5.1 структура отдельных технологиче-

ских процессов представлена гипотетически, при этом они связаны между собой параметрами толщин покрытий определяемых таблице 5.1 и таблице 5.2.

В этом случае данный комплексный многосвязный процесс выполняется на основе принципа равного ресурса всех лопаток компрессора. Это обеспечивается за счет ФОП с заданными параметрами толщин слоев покрытий определяемыми матрицами таблице П 1 и таблице П 2.

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

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

### **5.3. Экспериментальная реализация технологического процесса формирования функционально-ориентированного покрытия групп лопаток компрессора**

На рисунке 5.2 представлен алгоритм реализации ОУО лопаток компрессора всех групп с ФОП. Для реализации технологического процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора необходимо иметь исходные данные. Поэтому данный алгоритм начинается с заданием этих параметров.

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

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

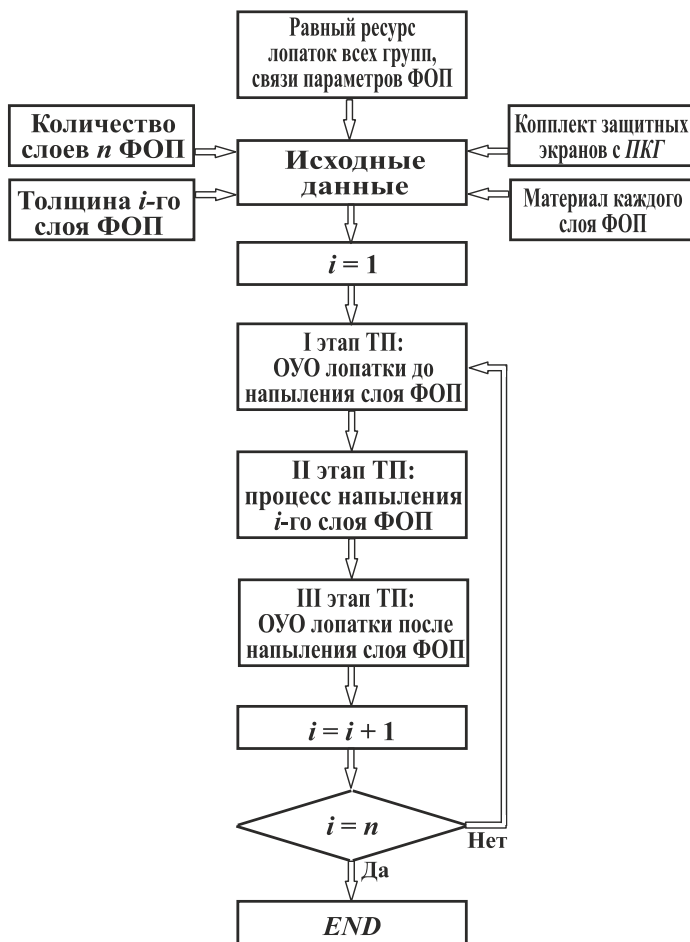


Рисунок 5.2. Алгоритм реализации ОУО лопаток компрессора всех групп с ФОП

ления  $i$ -го слоя ФОП.

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

6. Задается значение  $i = i + 1$ .

7. Если  $i = n$ , где  $n$  – общее количество слоев ФОП, процесс переходит следующему этапу и завершается. Если  $i \neq n$  процесс переходит к I этапу технологического процесса (ТП) и повторяются все этапы (рисунок 5.2) и так далее.

8. Выполняется операция *END*.

Можно отметить, что на I этапе технологического процесса выполняется очистка поверхностей лопаток компрессора, удаление пленок оксидов и нитридов с помощью ультразвуковой их обработки с использованием специальной жидко-

- равный ресурс лопаток всех групп (2.1), связи параметров ФОП, определяемые по выражениям (3.6) и (3.7);

- количество слоев  $n$  ФОП;

- толщина  $i$ -го слоя ФОП;

- комплект защитных экранов для формирования всех слоев ФОП;

- материал каждого слоя ФОП.

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

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

4. Затем реализуется II этап технологического процесса (ТП). Здесь, осуществляется процесс напы-

сти, приспособлений и ультразвукового генератора УЗГ 4-1. Это необходимо для обеспечения ювенильности поверхностей лопаток компрессора при последующего напыления ФОП.



Рисунок 5.3. Общий вид вакуумной установки ННВ 6,6 – И1 для напыления ФОП лопаток компрессора

В предлагаемом технологическом процессе (рисунок 5.2) наиболее важным является процесс напыления каждого слоя ФОП, который выполняется на II этапе. В данном случае, этот процесс выполняется с использованием вакуумной ионно-плазменной установки (вакуумной электродуговой установки) ННВ 6.6-И1, общий вид которой представлен на рисунке 5.3.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.1. Выполняется выключение испарителей.

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

4.3. Выполняется включение испарителей.



Рисунок 5.4. Общий вид подсистем вакуумной установки: а – натекатели газа регулируемые, б – вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-3

ионизационно-термопарного ВИТ-3 (рисунок 5.4, б)

4.5. Проводится установка тока дугового испарителя в пределах  $I_k = 40 \dots 150$  А. Ток дуговых испарителей устанавливается индивидуально в зависимости от материала катода и параметров оснастки с лопатками). Это выполняется с помощью систем управления, показанных на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5. Общий вид шкафов управления вакуумной ионно-плазменной установки ННВ 6,6 – И1

4.4. Осуществляется подача азота с помощью регулируемых натекателей (рисунок 5.4, а) и производится установка его рабочего давления  $P = 1,1 \cdot 10^{-1}$  Па. Контроль этого давления выполняется с помощью вакуумметра ионизационно-термопарного ВИТ-3

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

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



лопаток компрессора определяются в соответствии с данными, приведенными в таблице 5.5 и таблице 5.6.

#### 4.8. Производится выключение испарителей установки.



Рисунок 5.6.  
Лопатка ком-  
прессора с 1-  
м слоем ФОП



Рисунок 5.7.  
Лопатка  
компрессора  
со 2-м слоем  
ФОП



Рисунок 5.8.  
Лопатка ком-  
прессора с 3-  
м слоем ФОП



Рисунок 5.9.  
Лопатка  
компрессора  
с 4-м слоем  
ФОП

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

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

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

5.3. Осуществляется охлаждение лопаток компрессора до температуры  $T_n > 20$  °С.

5.4. Выполняется выгрузка оснастки с лопатками компрессора. При этом лопатки (рисунок 5.6) снимаются с оснастки, контролируется качество нанесения покрытия (визуальный контроль и с помощью специальных методов) и передаются на III этап технологического процесса. После реализации 1-го слоя ФОП с первым ПКГ<sub>1</sub> (рисунок 5.6), выполняется 2-й слой ФОП со вторым ПКГ<sub>2</sub> (рисунок 5.7), затем наносится 3-й слой ФОП с третьим ПКГ<sub>3</sub> (рисунок 5.8), и так далее, последним наносится покрытие для всей лопатки (рисунок 5.9). Можно отметить, что после напыления каждого слоя покрытия выполняется полировка поверхностей лопаток для обеспече-

ния адгезионной прочности слоев покрытий. Этот процесс реализуется на III этапе технологического процесса (рисунок 5.2).



Рисунок 5.10. Общий вид установки для полировки лопаток компрессора

На III этапе технологического процесса выполняется полировка поверхностей лопатки, включая покрытие, и передаются далее в соответствии с алгоритмом (рисунок 5.2) на I этап для реализации 2-го слоя ФОП и так далее. При этом полировка выполняется с использованием полировального станка, общий вид которого представлен на рисунке 5.10.

Таким образом, в этом параграфе представлены данные по конкретной экспериментальной реализации многосвязного технологического процесса формирования многослойного ФОП различных групп лопаток компрессора ГТД. ФОП и принцип 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.

#### **5.4. Общие рекомендации диссертационной работы**

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

В целом, разработанная структура комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОР формируется в соответствии со схемой рисунка 5.11.

На рисунке 5.11 приведена схема комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОР. Здесь показано, что процесс реализа-

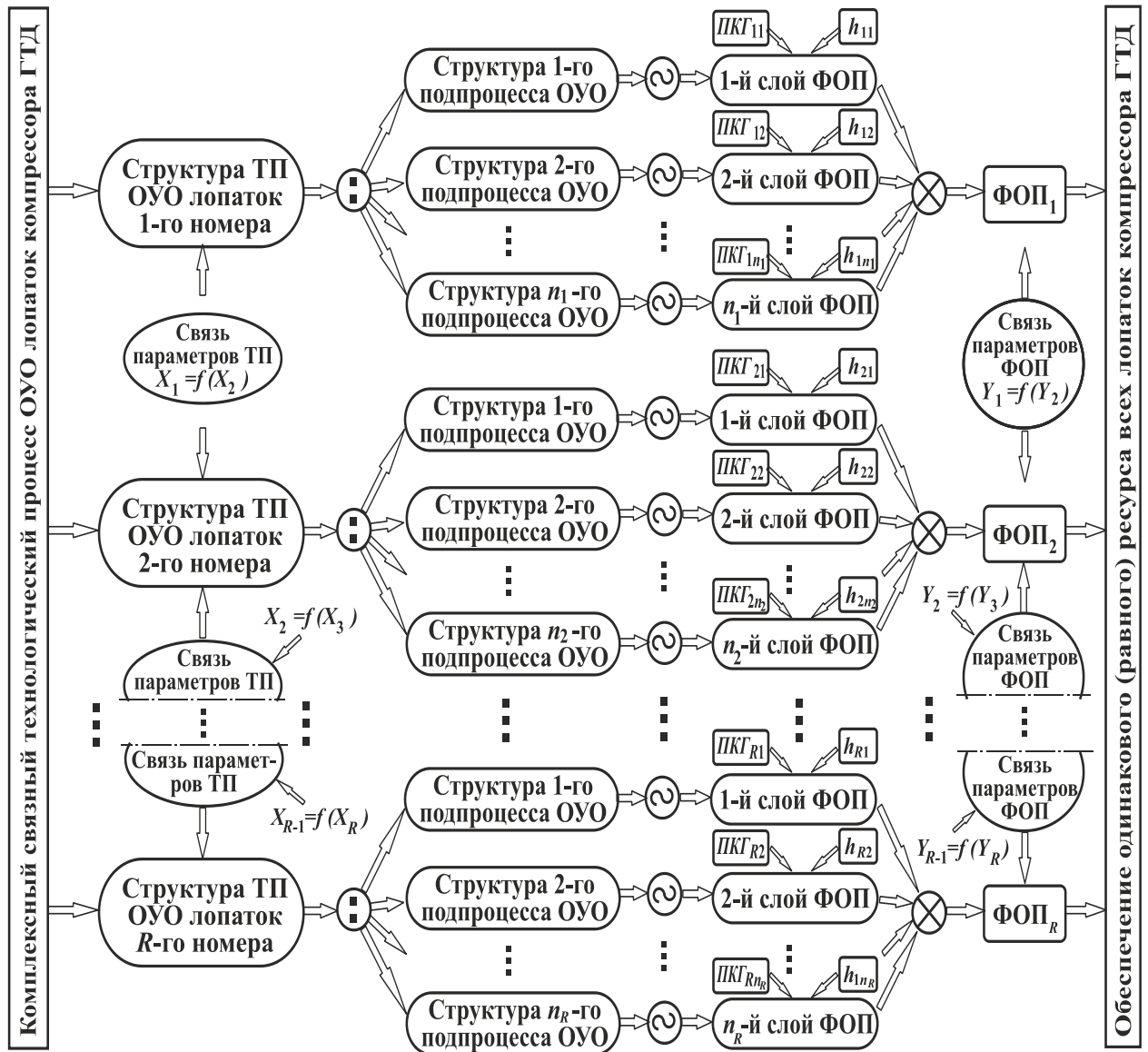


Рисунок 5.11. Схема синтеза комплексного связанного ОУО лопаток с ФОР на базе принципа равенства ресурса всех лопаток ГТД

ции технологического процесса выполняется на базе обеспечения одинакового (равного) ресурсам всех лопаток компрессора ГТД. При этом структура этого процесса формируется из R технологических процессов (ТП) напыления ФОР

для  $R$  различных лопаток всего компрессора. В этом случае, каждый технологический процесс состоит из  $n_i$  технологических подпроцессов, каждый из которых реализует  $n_i$  -й слой заданного ФОП $_{ni}$ . Можно отметить, что каждый слоя ФОП $_i$  формируется с ПКГ $_{ini}$ , который выполняется заданной толщины  $h_{ini}$ . На рисунке 5.11 приведены следующие обозначения:  $\oplus$  - знак декомпозиции,  $\odot$  - знак бинарного соответствия,  $\otimes$  - знак композиции.

Можно отметить, что между структурами технологических процессов ОУО лопаток соседних номеров ступеней компрессора (рисунок 5.11) действуют связи параметров:

$$X_{r-1} = f(X_r), \quad (5.5)$$

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

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

Между параметрами ФОП лопаток компрессора также действуют связи:

$$Y_{r-1} = f(Y_r), \quad (5.6)$$

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

$Y_r$  – множество параметров ФОП лопаток  $r$ -го номера.

Здесь, следует отметить, что выражение (5.5) связывают между собой параметры отдельных технологических процессов ОУО лопаток. Подобные связи имеют место между всеми технологическими процессами комплексного связанного технологического процесса ОУО всех лопаток компрессора ГТД (рисунок 5.11). Также следует отметить, что между параметрами ФОП лопаток компрессора соседних ступеней также действуют связи, определяемыми выражением (5.6). На основании наличия этих связей предлагаемый комплексный технологический процесс является связным по параметрам технологии и по параметрам ФОП. При этом на основании этих связей реализуется принцип равенства ресурса всех лопаток компрессора.

На основании выражений (5.5) и (5.6), а также схемы рисунка 5.11, к основным параметрам связи технологических процессов можно отнести следующие:

1. Обеспечение равного ресурса всех лопаток компрессора, работающих в условиях неравномерного износа, характеризуемого действия неравномерностей трех рангов. Параметры интенсивности износа покрытия лопаток определяются параметрами таблицы П 1.

2. Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора. Например, для лопаток компрессора ГТД модели ТВЗ-117 (четырёхслойное покрытие), длительность напыления слоев покрытий для различных номеров лопаток приведена в таблице 5.5 и таблице 5.6.

3. Количество слоев многослойного ФОП лопаток компрессора. Эти данные определяются на основании выражения (3.8).

4. Толщина  $i$ -го слоя многослойного ФОП лопаток компрессора. Эти параметры с учетом связей определяются в соответствии с системой выражений (3.7).

5. При нанесении слоев ФОП устанавливается ток дугового испарителя в пределах 80 ... 140 А. При этом ток дугового испарителя для комплекта лопаток первых ступеней, например рабочих лопаток компрессора двигателя модели ТВЗ-117, устанавливается  $I_k = 140$  А, а для комплекта лопаток последних ступеней – назначается  $I_k = 80$  А. Для промежуточных лопаток компрессора ток дугового испарителя имеет промежуточные значения.

6. Подача напряжения на лопатки компрессора регулируется в следующих пределах  $V_n = 40 \dots 350$  В. При этом величина этого напряжения для комплекта лопаток первых ступеней, например рабочих лопаток компрессора двигателя модели ТВЗ-117, устанавливается  $V_n = 350$  В, а для комплекта лопаток последних ступеней – назначается  $V_n = 350$  В. Для промежуточных лопаток компрессора подаваемое напряжение имеет промежуточные значения.

7. Установление ПКГ каждого защитного экрана для реализации многослойного ФОП лопаток. Параметры ПКГ определяются в соответствии с рекомендациями подразделов 4.3 и 4.4.

Таблица 5.5. Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВЗ-117 (четырёхслойное покрытие)

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

Таблица 5.6. Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВЗ-117 (четырёхслойное покрытие)

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

8. Обеспечивается формирование ФОП каждой лопатки на основе определенных связей.

Таким образом, приведенные 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, характеризуемых неравномерностями 3-х рангов.

### **5.5. Внедрение результатов работы в производство**

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 поставленной в работе цели в работе выполнен целый комплекс исследований и разработано следующее:

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 отделочно-упрочняющей обработки 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 отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора.

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

Проведенные исследования и разработанные рекомендации позволили выполнить внедрение полученных результатов работы в производство на следующих предприятиях: ООО «Горловский энергомеханический завод» (ДНР), ОАО «Ейский станкостроительный завод» (Россия), Филиале Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Россия), ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (ДНР).

Можно отметить, что ООО «Горловский энергомеханический завод» совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» выполнял научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Одним из направлений этой работы являлось комплексное повышение ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе функционально-ориентированного подхода. А также проектирование технологической оснастки для напыления функционально-ориентированных покрытий для лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя ТВ3-117 и ВК-2500.

Разработанная методика и рекомендации «Комплексное повышение ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе функционально-ориентированного подхода», приняты к использованию ООО «Горловский энергомеханический завод» для повышения качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Представленные рекомендации использованы для проектирования технологических процессов и технологического обеспечения для изготовления технологической оснастки для напыления функционально-



ориентированных покрытий для лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя ТВЗ-117 и ВК-2500.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики (Приложение П 2) составит 56000,00 рублей РФ.

Также следует отметить, что ОАО «Ейский станкостроительный завод» совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» выполняли научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Одним из направлений этой работы являлось комплексное повышение ресурса лопаток вентилятора, лопаточных машин и других деталей компрессоров нефтегазовой промышленности на базе функционально-ориентированного подхода.

Разработанная методика и рекомендации «Комплексное повышение ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе функционально-ориентированного подхода», приняты к использованию ОАО «Ейский станкостроительный завод» для повышения качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Представленные рекомендации использованы для проектирования технологических процессов и технологического обеспечения для изготовления технологической оснастки для напыления функционально-ориентированных покрытий для лопаток компрессора и лопаточных машин компрессора нефтегазовой промышленности.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики (Приложение П 2) составит 90000,00 рублей РФ.

Также следует отметить, что Усинский филиал Ухтинского государственного технического университета (Приложение П 2) совместно с кафедрой «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета выполнял научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности отделочно-упрочняющей обработки различных изделий машиностроения. Одним из направлений этой работы являлось комплексное повышение ресурса

групп лопаток осевого компрессора газотурбинных установок в нефтегазовом комплексе Республики Коми, Россия.

Полученные результаты и рекомендации по комплексному повышению ресурса групп лопаток осевого компрессора газотурбинных установок, используются в Усинском филиале Ухтинского государственного технического университета для чтения лекций и проведения практических занятий по курсам «Диагностика, техническая экспертиза, ремонт и модернизация насосного и компрессорного оборудования на предприятиях нефтегазового комплекса» и «Технологическое и структурное обеспечение для повышения качества изготовления деталей машин и систем нефтегазового комплекса».

Кафедрой «Технология машиностроения» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» выполняются научно-исследовательские работы по комплексному повышению работоспособности групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя (Приложение П 2). Одним из направлений этой работы является разработка общей методики направленного поиска рациональных структурных вариантов технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора с ФОС. А также проектирование технологий и технологической оснастки для реализации сверхпрочных функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора.

Разработанная методика «Совершенствование технологическое обеспечение комплексного повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя», внедрена в учебный процесс кафедры «Технология машиностроения» для дисциплины «Новые тенденции развития машиностроения» магистерской программы «Информационные технологии машиностроения» направления обучения 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Представленные в методике рекомендации дают возможность проектировать комплексные связанные технологические процессы нанесения ФОП лопаток компрессора вертолетного ГТД.

Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы в производство составит 146000,00 рублей РФ.

## 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, характеризуемые 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 связанные 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 обеспечения многократного восстановления лопаток. Этот подход базируется на комплексном связанном технологическом процессе реализации ФОС для лопаток компрессора.

3. В работе выполнен анализ особенности синтеза комплексного многосвязного 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 связного 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 связного 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 связного 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 «Донецкий национальный технический университет» (ДНР). Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы в производство составит 146000,00 рублей РФ (сто сорок шесть тысяч рублей РФ).

## Перечень сокращений

ГТД – газотурбинный двигатель;

ВНА – входной направляющий аппарат;

ВСА – выходной спрямляющий аппарат;

К – компрессор;

ЛК – лопатки компрессора;

НЛ – неподвижная лопатка;

ПЛ – поворотная лопатка;

ПКГ – пространственный контур границ;

МП – модуль покрытий;

НА – направляющий аппарат;

НП – напыление покрытий;

ОДК - Объединенная двигателестроительная компания;

ОУО – отделочно-упрочняющая обработка;

С – свойства;

СМП – связующий модуль покрытий;

ТВ (TV) – технологические воздействия;

Т – турбина;

ТК – турбокомпрессор;

ТМП - температуро-защитный жаростойкий модуль покрытий;

ТО – технологическое обеспечение;

ТП – технологический процесс;

ФОП – функционально-ориентированное покрытие;

ФОС – функционально-ориентированные свойства;

ФОТ – функционально-ориентированная технология;

Ф (F) – эксплуатационные воздействия;

R – ресурс лопаток.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авиадвигателестроение: Энциклопедия / Общ. ред. В. М. Чуйко. – М.: Изд. дом «Авиамир», 1999. – 300 с.
2. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. - Вып. № 7 (148). – 178 с.
3. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. - Вып. № 8 (149). – 204 с.
4. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2018. - Вып. № 8 (149). – 252 с.
5. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2018. - Вып. № 10 (175). – 170 с.
6. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2018. - Вып. № 11 (176). – 148 с.
7. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2018. - Вып. № 12 (177). – 164 с.
8. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2019. - Вып. № 1 (178). – 204 с.
9. Авіаційні матеріали та їх обробка: Підручник / За ред. Ю. М. Терещенка. – К.: Вища освіта, 2003. – 303 с.

10. Амитан, Г. Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с.

11. Анкуда, С. Н. Обеспечение качества изделий на основе статистических моделей планирования и управления технологическими процессами / С. Н. Анкуда, И. М. Хейфец // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 1. - С. 30-34.

12. Асатурян, В. И. Теория планирования эксперимента. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.

13. Ахметшина, Л. Г. Информационная технология повышения достоверности анализа снимков отпечатков поверхности покрытий на металлической подложке / Л. Г. Ахметшина, А. А. Егоров, И. М. Удовик // Les problèmes contemporains de la technosphère et de la formation des cadres d'ingénieurs // Recueil des exposés des participants de la VII Conférence internationale scientifique et méthodique à Sousse du 08 au 17 octobre 2013. – Donetsk: UNTD, 2013. – P. 86-89.

14. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии. / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов н/д: ДГТУ, 2008. - 694 с.

15. Бабичев, А. П. Технологические испытания имитационной модели транспортно-обрабатывающей технологической системы (ТОТС) виброударной обработкой длинномерных деталей / А. П. Бабичев и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2010. Т. 2. - С. 57-59.

16. Базров, Б. М. Проблема технологической классификации деталей. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 1. - С. 43-45.

17. Базров, Б. М. Расчет точности машин на ЭВМ. - М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.



18. Базров, Б. М. Типовая технология в условиях конкуренции / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 1 (47). - С. 29 - 33.

19. Байков, А. В. Прогнозирование производительности обработки при шлифовании инструментом на эластичных связках / А. В. Байков, А. Н. Михайлов, Е. Н. Новосельцева // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010 г. В 4-х томах. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. - Т. 2. - С. 65-68.

20. Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения. - М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.

21. Безъязычный, В. Ф. Электрохимические методы формирования поверхностей трения деталей машин / В. Ф. Безъязычный и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 17-22 сентября 2012 г. В 3-х томах. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. - Т. 1. - С. 75-81.

22. Берж, К. Теория графов и ее приложения. - М.: ИЛ, 1982. – 319 с.

23. Биркгоф, Г. Теория структур. - М.: ИЛ, 1952. – 407 с.

24. Богуслаев, В.А. Основы технологии машиностроения: Учебн. пособие для студентов машиностр. спец. вузов / В. А. Богуслаев, В. И. Цыпак, В. К. Яценко – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 336 с.

25. Богуслаев, В.А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.

26. Богуслаев, В.А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. – 335 с.

27. Богуслаев, В.А. Технологія виробництва деталей літальних апаратів. Підручник: У 2-х кн. Книга 2. Технологія складання літальних апаратів / За ред. Ю.М. Терещенка. – К.: НАУ, 2006. – 492 с.

28. Богуслаев, В.А. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. I. Основы технологии. / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, А.И. Долматов и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 518 с.

29. Богуслаев, В. А. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. II. Основы проектирования технологических процессов изготовления деталей авиационных двигателей и технологическая подготовка производства. / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, А. И. Долматов и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 557 с.

30. Богуслаев, В.А. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. III. Методы обработки деталей авиационных двигателей. / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. К. Яценко. и др.– Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2008. – 638 с.

31. Боровский, Г.В. Справочник инструментальщика / Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов; Под общ. ред. А.Р. Маслова. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с.

32. Бородавко, В. И. Изготовление пакета лопаток паровых турбин с применением электронно-лучевых технологий / В. И. Бородавко и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXIV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-17 сентября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 43-47.

33. Братан, С. М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08: защищена 24.03.2006: утв. 01.07.2006. – Одесса, 2006. - 321 с.

34. Бутенко, В. И. Структурная самоорганизация материала поверхностного слоя обрабатываемой детали. – Таганрог: ТРТУ, 2000. - 168 с.

35. Бутенко, В. И. Выбор рациональных условий отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин / В. И. Бутенко, Д. С. Дуров, Р. Г. Шаповалов // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 3 (49). - С. 44 - 48.

36. Виленский, М. А. Зарубежные вертолеты / М.А. Виленский, Ю.А. Струков // Итоги науки и техники. Авиастроение. ВИНТИ, 1982. – 116 с.
37. Внуков, Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю. Н. Внуков и [др.]. – К.: Техника, 1992. – 143 с.
38. Вологин, М. Ф. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М. Ф. Вологин, В. В. Калашников, М. С. Нерубай – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
39. Волчкевич, И. Л. Проблемы обеспечения производительности труда в отечественном машиностроении / И. Л. Волчкевич // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-19 сентября 2015 г. В 2-х т. – Донецк: МСМ, 2015. - Т. 1. - С. 53-56.
40. Галимов, Э. Р. Разработка технологии и оборудования для нанесения покрытий специального назначения на основе полимерных порошковых композиций / Э. Р. Галимов и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 1. - С. 129-132.
41. Ганзен, М. А. Конструкторско-технологическое обеспечение минимальных радиальных зазоров в лопаточных машинах на основных стадиях жизненного цикла ГТД: Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 - Рыбинск, 2012. - 16 с.
42. Горленко, А. О. Технологическое повышение износостойкости деталей с криволинейными поверхностями трения. Автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 - Брянск, 2003. - 31 с.
43. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
44. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
45. Гусакова, Л. В. Разработка конструкции шлифовального круга разной зернистости / Л. В. Гусакова // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник

трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. - Т. 1. - С. 222-224.

46. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.

47. Дальский, А. М. Технологическая наследственность в машиностроении / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев и [др.]. // Под ред. А. М. Дальского. - М.: МАИ, 2000. - 364 с.

48. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. - 223 с.

49. Девойно, О. Г. Порошок для напыления теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, частично стабилизированный оксидом церия / О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-20 сентября 2014 г. – Донецк: ДонНТУ, 2014. - С. 71-74.

50. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.

51. Долецкий, В. А. Увеличение ресурса машин технологическими методами. / В. А. Долецкий, В. Н. Бунтов, Ю. А. Легенкин и [др.]. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.

52. Дохотару, И. Д. Обработка шлифованием твердых покрытий / И. Д. Дохотару, Р. П. Сомник // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 1. - С. 218-220.

53. Дубовий, О. М. Технологія напильня покриттів: Підручник. / О. М. Дубовий, А. М. Степанчук – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.

54. Жорник, В. И. Повышение свойств материалов и покрытий триботехнического назначения модифицированием наноразмерными алмазно-графитными добавками / В. И. Жорник // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник

трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 17-22 сентября 2012 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2012. - Т. 1. - С. 252-255.

55. Емельянов, В. А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. / В. А. Емельянов, Ж. А. Мрочек, И. А. Иванов - Минск: Интеграл, 1998. – 286 с.

56. Иванов, И. А. Расчетный метод оценки скорости осаждения ионно – плазменных покрытий / И. А. Иванов, Е. П. Орлова // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. - Т. 2. - С. 14-15.

57. Ивашко, В. С. Электрохимическая технология нанесения защитных покрытий / В. С. Ивашко, И. Л. Куприянов, А. И. Шевцов – Минск: Навука і техника, 1996. – 375 с.

58. Иностраные авиационные двигатели. – М.: ЦИАМ, 1992. – 286 с.

59. Исрафилов, И. Х.. Применение импульсного плазменного генератора в машиностроении в качестве инструмента для поверхностного упрочнения материалов / И. Х. Исрафилов и [др.]. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. - Т. 2. - С. 23-27.

60. История конструкторской службы АО «Мотор Сич», - К.: Златограф, 2014. – 112 с.

61. Кардаполова, М. А. Влияние технологических параметров комбинированной обработки на физико-механические характеристики упрочненного слоя / М. А. Кардаполова и [др.]. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2010. - Т. 2. - С. 11-18.

62. Киселев, Е. С. Формирование заданного фазового состава поверхностного слоя деталей из титановых сплавов путем рационального использования возможностей комбинированной обработки. / Е. С. Киселев и [др.]. // Машинострое-

ние и техносфера XXI века. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 1. - С. 282-285.

63. Костржицкий, А.И. Многокомпонентные вакуумные покрытия. / А. И. Костржицкий, О. В. Лебединский – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

64. Лебедев, В. А. Энергетический подход к оценке адгезионной прочности покрытий сформированных на поверхности путём механохимического синтеза. / В. А. Лебедев и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-19 сентября 2015 г. В 2-х т. – Донецк: МСМ, 2015. - Т. 1. - С. 201-204.

65. Левитова, О. Н. Повышение эффективности очистки внутренних полостей систем ГТД путем интенсификации движения промывочных сред: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Рыбинск, 2013. - 16 с.

66. Макаров, В. Ф. Влияние режимов глубинного шлифования на устойчивость процесса и предел выносливости деталей из жаропрочных сплавов /В. Ф. Макаров, С. П. Никитин //Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 3(49). - С. 108-113.

67. Макаров, В. Ф. Эффективность работы новых шлифовальных установок для автоматизированного скругления и полирования острых кромок деталей ГТД полимерноабразивными щетками. / В. Ф. Макаров, А. В. Виноградов // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2010. - Т. 2. - С. 139-140.

68. Макаров, В. Ф. Управление качеством изготовления лопаток турбин на основе моделирования динамической системы станка и процесса глубинного шлифования. / В. Ф. Макаров, С. П. Никитин // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-19 сентября 2015 г. В 2-х т. – Донецк: МСМ, 2015. - Т. 1. - С. 213-217.

69. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.; Машиностроение, 1974. – 320 с.

70. Маталин, А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов. - Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

71. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. - 847 с.

72. Машиностроение. Энциклопедия. / Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. // Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III – 8. / Ю. В. Панфилов, Л. К. Ковалев, В. А. Блохин и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 744 с.

73. Методы поиска новых технических решений / Под ред. А. И. Половинкина. - Йошкар-Ола: Мар. кн. изд-во, 1976. - 192 с.

74. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

75. 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.

76. 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 междунауч. научно-техн. конф. «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» 17-19 октября 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – С. 43-47.

77. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения /А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Михайлова // Материалы Шестого научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». – Донецк: ДонНТУ, 2005. - С. 583-590.

78. 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 // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. - Вип. 29. - С. 132-147.

79. Михайлов, А. Н. Основы синтеза нового класса вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения /А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Михайлова // Conferinta Stiintifica Internationala Iasi-Chisinau: Tehnologii Moderne. Calitate. Restructurari. TMCR 2005. - Chisinau, 2005. - Vol. 2. - P. 327-331.

80. Михайлов, А. Н. Методика и основные принципы синтеза функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения /А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Михайлова // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение. - №7. 2005. - С. 3 – 9.

81. 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

82. Михайлов, А. Н. Функционально-ориентированные вакуумные ионно-плазменные покрытия изделий машиностроения /А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Михайлова // Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла: Материалы 5-й междунар. Науч.-техн. конф., г. Брянск, 19-21 окт. 2005 г. – Брянск: БГТУ, 2005. - С. 17-19.

83. Михайлов, А. Н. Особенности формообразования поверхностей изделий машиностроения при напылении вакуумных ионно-плазменных покрытий /А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Михайлова // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение. №11. 2005. - С. 37 – 45.

84. Михайлов, А. Н. Формирование вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения /А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Михайлова



//Материалы международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики» - Ташкент, 2006. - С. 474 – 488.

85. Михайлов, А. Н. Производительность технологических систем для напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние цилиндрические поверхности изделий /А. Н. Михайлов, Е. А. Михайлов, В. А. Михайлова и [др]. // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение. - №8. 2006. - С. 26 – 31.

86. 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.

87. Михайлов, В. А. Особенности синтеза функционально-ориентированных покрытий изделий машиностроения / Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. Трудов МШ международной научно-технической конференции: в 3-х т. Т. II / Под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика. – Новополюк: УО «ПГУ», 2007. - С. 214 – 217.

88. 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.

89. 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.

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

91. 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.

92. Михайлов, В. А. Повышение структурной надежности вертолетных газотурбинных двигателей / В. А. Михайлов [и др.] // Сб. научн. трудов XXV Междуна. 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.

93. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированного подхода. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. - Донецк, 2016. - 22 с.

94. Михайлов, Д.А. Некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток ГТД из титановых сплавов / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 3 (49). - С. 120 - 127.

95. 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: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. - Вип. 30. - С. 157-164.

96. 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. Сбор-

ник 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.

97. Носенко, С. В. Разработка плоского глубинного шлифования заготовок из титанового сплава с учётом многоэтапности процесса. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. - Т. 2. - С. 264-267.

98. Оковитый, В.А. Исследование технологических параметров высокоэнергетической обработки плазменных покрытий из материалов на основе оксидной керамики с неравновесной структурой. / В. А. Оковитый и [др.]. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. В 2-х т. – Донецк: МСМ, 2016. - Т. 2. - С. 52-55.

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

100. Заявка на изобретение № 2018107164/02(010972) РФ. МПК 8 С 23 С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя [Текст] / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов и [др.]; заявитель и патентообладатель УФ УГТУ; заявл. 26.02.2018; - 11 с.

101. Петрешин, Д.И. Измерение высотных параметров шероховатости поверхности деталей машин лазерным датчиком. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 2. - С. 231-234.

102. Пичко, А. П. К определению структурной надежности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности / А. П. Пичко, В. А. Михайлов, А. А. Колодяжный и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:

Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Вып. 2 (61). - С. 64 - 74.

103. 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.

104. Пичко, А.П. Особенности обеспечение свойств лопаток компрессора и турбины газотурбинной установки на базе функционально-ориентированных покрытий и равенства их ресурсов / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 1 (64). - С. 68 - 77.

105. Пичко, А. П. Синтез технологического обеспечения комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора газотурбинных установок нефтегазовой промышленности. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. - Донецк, 2019. - 23 с.

106. Полетаев, В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.

107. Политехнический словарь / Редкол.: А. Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с.

108. Попов, А. И. Применение технологии получения качественных поверхностей турбинных лопаток струйной фокусированной электролитно-плазменной обработкой. / А. И. Попов и [др.]. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. В 2-х т. – Донецк: МСМ, 2016. - Т. 2. - С. 108-111.

109. Проволоцкий, А. Е. Повышение производительности с высокопористыми шлифовальными кругами. / А. Е. Проволоцкий, М. Мохеб // Les problèmes contemporains du technosphère et de la formation des cadres d'ingénieurs // Recueil

d'ouvrages du IV Conférence international scientifique et méthodique à Hammamet du 28 octobre au 6<sup>er</sup> novembre 2010. – Donetsk: UNTD, 2010. – P. 258-261.

110. Рыжов, Э. В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко – Киев: Наукова думка, 1994. – 180 с.

111. Санін, Ф. П. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології. Підручник. / Ф. П. Санін, Л. Д. Кучма, Э. О. Джур – Дніпропетровськ: Дніпропетровський університет, 1999. – 320 с.

112. Ситникова, М. Н. Исследование процесса подготовки поверхностей деталей турбины авиационных двигателей под газотермическое напыление. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Рыбинск, 2013. - 16 с.

113. Скубачевский, Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели: Учебник для студентов авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.

114. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

115. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1986. - Т.1 - 656 с.; 1985. - Т.2. - 496 с.

116. Суслов, А. Г. Качество машин: Справочник. В 2-х т. Т.1 / А. Г. Суслов, Э. Д. Браун, Н. А. Виткевич и др. - М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.; - Т.2 / А. Г. Суслов, Ю. В. Гуляев, А. М. Дальский и др. - М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.

117. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

118. Тамарин, Ю. А. Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток ГТД. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.

119. Тамаркин, М. А. Исследования и разработка процесса виброабразивной ультразвуковой обработки деталей / М. А. Тамаркин и [др.]. // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 2 (48). - С. 121 - 130.

120. Термическая обработка в машиностроении: Справочник. / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

121. Технологія виробництва деталей літальних апаратів. Підручник: У 2-х кн. Книга 1. / За ред. Ю. М. Терещенка. – К.: Вища освіта, 2004. – 448 с.

122. Управление качеством продукции машиностроения: Учеб. пособие / Под общ ред. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.

123. Федонин, О. Н. Определение размеров заготовки при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием / О. Н. Федонин, С. В. Степошена // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. - Т. 3. - С. 145-148.

124. Фёдоров, В. П. Сравнительная характеристика методов повышения износостойкости поверхностей деталей нанесением мягких и твёрдых покрытий. / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин, В. В. Нагоркина // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 3. - С. 93-96.

125. Физико-технологические основы методов обработки / Под ред. А. П. Бабичева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с.

126. Хандожко, А.В. Проблемы алмазно-абразивной обработки заготовок из лейкосапфира / А.В. Хандожко, А.Е. Стешков, Н.А. Бизюкина // Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 3. - С. 97-99.

127. Хасуи, А. О. Наплавка и напыление. / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

128. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

129. Хикс, Ч. Основные принципы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1967. – 406 с.

130. Хромов, В. Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники упрочняющими покрытиями. / В. Н. Хромов и [др.]. // Машиностроение и технология XXI века. Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2010. - Т. 3. - С. 225-227.

131. Хроматов, В. Е. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния авиационных изделий при динамическом нагружении / В. Е. Хроматов и [др.]. // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 3 (49). - С. 211 - 215.

132. Хубка, В. Теория технических систем: Пер. с нем. - М.: Мир, 1987. - 208 с.

133. Худобин, Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабищев, Е. М. Бульжеев и др. / Под общ. ред. Л. В. Худобина – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

134. Цветков, В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. - Минск: Наука и техника, 1979. - 264 с.

135. Чугункин, А. В. Основные особенности эксплуатации комбинированных осевых лезвийных инструментов для обработки отверстий и методы повышения их стойкости / А. В. Чугункин, А. П. Пичко, В. А. и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. - Вып. 4 (59). - С. 82 - 92.

136. Шепунов, Г. С. Расчетно-экспериментальная оценка статической прочности лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04 / Г. С. Шепунов. - Пермь, 2016. - 21 с.

137. Ющенко, К. А. Інженерія поверхні. Підручник. / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов – К.: Наукова думка, 2007. – 558 с.

138. Ящерицын, П. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Борботько – Минск: Наука и техника, 1976. – 328 с.
139. Black, R. Design and manufacture. – Portsmouth: University of Portsmouth, 1996. – 328 p.
140. DeGarmo, E. P. Materials and Processes in Manufacturing. / E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Kohser - New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 1259 p.
141. [Dimitrie Negulescu](#) Aircraft gas turbine engine. US 8720208 B2 // [Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co Kg.](#), 2014. - <http://www.google.com/patents/US8720208>.
142. Groover Mikell, P. Fundamentals of modern manufacturing. – New York: JOHN WILEY & SONS, INC, 2002. - 1008 p.
143. [Wiedenhoefer, J.](#) Multi-slot inter-turbine duct assembly for use in a turbine engine US 20070089422 A1 / J. Widenhoefer, P. Graziosi, K. Kirtley/ 2007. - <http://www.google.com/patents/US20070089422>.
144. Jean-Pierre, C. Fabrication par usinage. 2-e edition. – Paris: Dunod, 2008. – 583 p.
145. [Lynch, H. L.](#) Gas turbine blade. US 3164367 A // [Gen Electric](#), 1965. - <http://www.google.com/patents/US3164367>.
146. [Suenaga, K.](#) Gas turbine blade US 6079946 // [Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.](#) 2000. - <http://www.google.com/patents/US6079946>.
147. [Cowers, L.](#) Turbojet engine with compressor bypass and aft fan. US 3348379 A / L. Cowers, C. J. Frederick, W. Geoffrey // [Rolls Royce](#), 1967. - <http://www.google.com/patents/US3348379>.
148. Mikhaylov, A. Bases of synthesis of special functionally - oriented vacuum covers of workpieces of mechanical engineering. / A. Mikhaylov, V. Mikhaylov, E. Mikhaylova // Jhe 31 Internationaly Attendeol Scientitic Conference of the Military Technical Academy “Modern Technologits in the 21<sup>th</sup> Century”. – Bucharest: MTA, 2005. - P.127-131.
149. Mikhaylov, A. Special functionally - oriented vacuum covers of workpieces of mechanical engineering. / A. Mikhaylov, V. Mikhaylov, E. Mikhaylova // Interna-



tional Conference Advanced Manufacturing Technologies. – Bucharest: Politehnica – University of Bucharest, 2005. - P. 166-170.

150. Mikhaylov, V. Aspects concerning the study of titanium nitride coated surfaces / V. Mikhaylov, N. Vodolazskaja, N/ Crupa, M. Coteata. // The 31<sup>st</sup> Internationally Attended Scientific Conference of the Military Technical Academy “Modern Technologies in the 21<sup>st</sup> Centure”. – Bucharest: MTA, 2005. - P. 41-44.

151. Non-traditional manufacturing processes. / L. Slatineanu, G. Nagit., O. Dodun. and other. – Chisinau: TEHNICA INFO, 2004. – 300 p.

152. Pruteanu, O.V. Tehnologia constructiei de nasini. Partea 1. Iasi: Junimea, 2005. – 436 p.

153. Radovanovic, M. Tehnologija masinogradnje. – Nis: Masinski fakultet Univerziteta u Nisu, 2002. - 328 p.

154. Schey John, A. Introduction to manufacturing processes. International Edition, 2000. – 962 p.

**Приложение П 1**

**Матрица средней интенсивности износа покрытия  
групп лопаток компрессора**

Таблица П.1. Зависимость средней интенсивности износа покрытия групп лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117

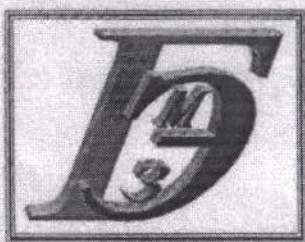
<b>Номера групп лопаток компрессора (статор)</b>												
<b>1</b>	<b>2</b>				<b>3</b>				<b>4</b>			
ВНА	ПЛ НА				НЛ НА				ВСА			
<b>Номера ступеней</b>												
1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1
<b>Средняя интенсивность износа покрытия, <math>\mu_{Ri} 10^{-3}</math> мкм/час</b>												
$\mu_{101}$	$\mu_{201}$	$\mu_{202}$	$\mu_{203}$	$\mu_{204}$	$\mu_{301}$	$\mu_{302}$	$\mu_{303}$	$\mu_{304}$	$\mu_{305}$	$\mu_{306}$	$\mu_{307}$	$\mu_{401}$
<b>Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)</b>												
0,66	0,81	0,79	0,77	0,71	0,68	0,66	0,72	0,83	0,91	0,95	0,96	1,05
<b>Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)</b>												
0,57	0,70	0,68	0,66	0,62	0,59	0,59	0,62	0,72	0,78	0,83	0,87	0,91

Таблица П.2. Зависимость средней интенсивности износа покрытия группы рабочих лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВ3-117

<b>Номер группы лопаток компрессора (ротор)</b>											
<b>5</b>											
<b>Номер ступени</b>											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Средняя интенсивность износа покрытия, <math>\mu_{Ri} 10^{-3}</math> мкм/час</b>											
$\mu_{501}$	$\mu_{502}$	$\mu_{503}$	$\mu_{504}$	$\mu_{505}$	$\mu_{506}$	$\mu_{507}$	$\mu_{508}$	$\mu_{509}$	$\mu_{510}$	$\mu_{511}$	$\mu_{512}$
<b>Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)</b>											
1,21	1,19	1,09	1,06	1,02	1,03	1,08	1,25	1,36	1,42	1,44	1,51
<b>Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)</b>											
1,05	1,03	0,99	0,92	0,88	0,89	0,93	1,08	1,18	1,24	1,25	1,32

**ПРИЛОЖЕНИЕ П 2**  
**Акты внедрения результатов работы**





**Общество с ограниченной ответственностью**  
**«ГОРЛОВСКИЙ**  
**ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

Р/с 260020013514766 в ПАО «ОТП Банк»  
 г. Горловка МФО 300528  
 код ОКПО 34516321  
 ИНН 345163205716, св-во №100078081

Account № 260020013514766 at SIB «OTP Bank»  
 Gorlovka city, bank code 300528  
 Company code 34516321

Исх. № 726  
 Дата 14.02.18г.

Диссертационный совет Д 01.014.02 при Донецком  
 национальном техническом университете

**СПРАВКА**

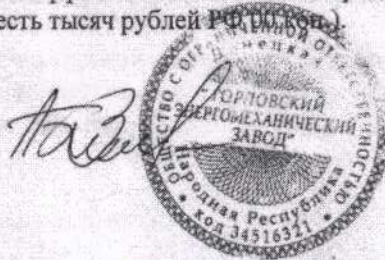
о внедрении результатов исследований диссертационной работы Михайлова Вячеслава Александровича на тему «Совершенствование технологического обеспечения комплексного повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора вертолётного газотурбинного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

ООО «Горловский энергомеханический завод» совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» выполняют научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Одним из направлений этой работы является комплексное повышение ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе функционально-ориентированного подхода. А также проектирование технологической оснастки для напыления функционально-ориентированных покрытий для лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя ТВ3-117 и ВК-2500.

Разработанная методика и рекомендации «Комплексное повышение ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе функционально-ориентированного подхода», представленные в диссертационной работе Михайлова Вячеслава Александровича, используется на ООО «Горловский энергомеханический завод» для повышения качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Представленные рекомендации используются для проектирования технологических процессов и технологического обеспечения для изготовления технологической оснастки для напыления функционально-ориентированных покрытий для лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя ТВ3-117 и ВК-2500.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 56000.00 рублей РФ (пятьдесят шесть тысяч рублей РФ).

Директор ООО «ГЭМЗ»



Байчоров А.А.

84617, Донецкая область  
 г. Горловка, ул. Нестерова, 127  
 тел/факс: (0624) 52-21-68,  
 моб.тел. 8-050-426 44 74

84617, Donetsk obl.  
 Gorlovka, Nesterova st. 127  
 tel/fax: (0624) 52-21-68,  
 mob.tel : 8-050-426 44 74

Соответствует оригиналу  
 Ученый секретарь  
 диссертационного совета



14.02  
 м.п. /подпись/



Открытое Акционерное Общество  
«ЕЙСКИЙ СТАНКОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»

Адрес: 353690, г. Ейск Краснодарского края,  
ул. К. Маркса 124.

Р/с 40702810503050000119 Краснодарский РФ ОАО «Россельхозбанк» г. Краснодар  
К/с 30101810700000000536, БИК 040349536, Тел: (86132)3-04-49, Факс: 3-04-49  
ИНН 2306001118, КПП 230601001 esz@bk.ru

№ 421

« 14 » 03 2018 г.

Диссертационный совет Д 01.014.02 при  
ГОУВПО "Донецкий национальный  
технический университет".

**СПРАВКА.**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Михайлова Вячеслава Александровича на тему "Совершенствование технического обеспечения комплексного повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 - Технология машиностроения.

ОАО "Ейский станкостроительный завод" совместно с кафедрой "Технология машиностроения" ГОУВПО "Донецкий национальный технический университет" выполняют научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Одним из направлений этой работы является комплексное повышение ресурса лопаток вентилятора, лопаточных машин и других деталей компрессоров нефтегазовой промышленности на базе функционально-ориентированного подхода. А так же проектирование технологической оснастки для напыления специальных нитрид-титановых покрытий на лопатки лопаточных машин с использованием ионно-плазменных установок.

Разработанная методика и рекомендации "Комплексное повышение ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе функционально-ориентированного подхода.", представленные в диссертационной работе Михайлова Вячеслава Александровича, используются на ОАО "Ейский станкостроительный завод" для повышения качества и эффективности отделочно-упрочняющей обработки различных изделий машиностроения. Представленные рекомендации используются для проектирования технологических процессов и технологического обеспечения для изготовления технологической оснастки для напыления функционально-ориентированных покрытий для лопаток компрессора и лопаточных машин компрессоров нефтегазовой промышленности.

Ожидаемый эффект от использования представленной методики составит 90000,00 (девяносто тысяч) рублей РФ.

ВРИО генерального директора ОАО "Ейской станкостроительный завод"

Сиротенко Д. В.

89528159309.

Соответствует оригиналу  
Ученый секретарь  
диссертационного совета

014, 02

Ермошко



МИНОБРНАУКИ РОССИИ



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ухтинский государственный  
технический университет»  
(ФГБОУ ВО «УГТУ»)

филиал Ухтинского государственного  
технического университета г. Усинске  
(УФ УГТУ)

Нефтяников ул., д. 33, Усинск,  
Республика Коми, 169710  
Телефон: (82144) 29-1-74  
Факс: (82144) 29-6-26  
E-mail: [mail@ufugtu.ru](mailto:mail@ufugtu.ru)  
[http:// www.ufugtu.ru/](http://www.ufugtu.ru/)

23.11.18 № 38/01-1215

Диссертационный совет Д 01.014.02  
при ГОУВПО «Донецкий национальный  
технический университет»

## СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Михайлова Вячеслава Александровича на тему «Совершенствование технологического обеспечения комплексного повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора вертолётного газотурбинного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Усинский филиал Ухтинского государственного технического университета совместно с кафедрой «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета выполняют научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности отделочно-упрочняющей обработки различных изделий машиностроения. Одним из направлений этой работы является комплексное повышение ресурса групп лопаток осевого компрессора газотурбинных установок в нефтегазовом комплексе Республики Коми, Россия.

Полученные результаты и рекомендации по комплексному повышению ресурса групп лопаток осевого компрессора газотурбинных установок, представленные в диссертационной работе Михайлова Вячеслава Александровича, используется в Усинском филиале Ухтинского государственного технического университета для чтения лекций и проведения практических занятий по курсам «Диагностика, техническая экспертиза, ремонт и модернизация насосного и компрессорного оборудования на предприятиях нефтегазового комплекса» и «Технологическое и структурное обеспечение для повышения качества изготовления деталей машин и систем нефтегазового комплекса».

Директор



Соответствует  
Ученый секретарь  
диссертационного совета



014.02

СФР Кромько





**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78  
эл. почта: donntu.info@mail.ru

19.11.19 № 30-12/172А

На № \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.014.02  
при ГОУВПО «ДОННТУ»

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Михайлова Вячеслава Александровича на тему «Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Кафедрой «Технология машиностроения» ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» выполняются научно-исследовательские работы по комплексному повышению ресурса групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя. Одним из направлений этой работы является разработка общей методики комплексного повышения ресурса групп лопаток осевого компрессора двигателя вертолета на базе функционально-ориентированного подхода. А также проектирование технологий и технологической оснастки для реализации сверхпрочных функционально-ориентированных покрытий групп лопаток компрессора.

Разработанная методика «Совершенствование технологического обеспечения комплексного повышения ресурса структурных групп лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя», представленная в диссертационной работе Михайлова Вячеслава Александровича, внедрена в учебный процесс кафедры «Технология машиностроения» для дисциплины «Новые тенденции развития машиностроения» магистерской программы «Информационные технологии машиностроения» направления обучения 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Представленные в методике рекомендации дают возможность проектировать комплексные технологические процессы нанесения функционально-ориентированных покрытий групп лопаток компрессора со специальными свойствами.

Первый проректор

Каракозов А.А.

Начальник учебного отдела

Гавриленко Б.В.

Зам. заведующего кафедрой

Грубка Р.М.

«Технология машиностроения»


Ученый секретарь  
Диссертационный совет Д 01.014.02  
при ГОУВПО «ДОННТУ»  
Грубка Р.М.



**ПРИЛОЖЕНИЕ П 3**

**Копия письма о положительном результате экспертизы  
заявки на изобретение и описание декларационного патента  
на изобретение**

Федеральная служба по интеллектуальной  
собственности  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение

 «Федеральный институт  
промышленной собственности»  
(ФИПС)

Верхневолжская наб., 30, этаж 1, Москва, Г-89, ГСП-3, 125993  
Телефон (8-495) 240-60-18. Факс (8-495) 531-63-18

Форма N 91 ИС-2017  
910,372

филиал Ухтинского государственного  
технического университета  
ул. Нефтяников, 33  
г. Усинск  
Респ. Коми  
169710

На № 23-2209 от 14.05.2018

На № 2018107164/02(010972)

При перемещении прототипа сформирован по номеру заявки и  
содержанию документа государственного  
корректирующего от 09.06.2018

### УВЕДОМЛЕНИЕ

о положительном результате формальной экспертизы  
заявки на изобретение

(21) Заявка № 2018107164/02(010972)

Дата поступления документов заявки 26.02.2018

(22) Дата подачи заявки 26.02.2018

(71) Заявитель(и) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Ухтинский государственный технический университет", RU

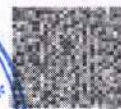
(54) Название изобретения Способ нанесения функционально-ориентированного  
износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя

4

ДПМ 24.05.2018  
ПОШ 24.05.2018

200117

Соответствует  
Ученый секретарь  
диссертационного совета



*С.Ф.Р.*  
2018.01.14.02  
А. Еромько





УКРАЇНА

(19) UA (11) 54100 (13) A

(51) 7 C23C 14/04

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВИНАХІДВидається під  
відповідальність  
власника  
патенту**(54) СПОСІБ НАНЕСЕННЯ НІТРИДНОГО ДЕКОРАТИВНОГО РЕЛЬЄФНОГО ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНЮ ВИРОБУ**

1

(21) 2002053915  
(22) 14 05 2002  
(24) 17 02 2003  
(46) 17 02 2003, Бюл. № 2, 2003 р  
(72) Михайлов Вячеслав Олександрович  
(73) ДОНЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
(57) Спосіб нанесення нітридного декоративного  
рельєфного покриття на поверхню виробу мето-  
дом вакуумного іонного бомбардування, що вклю-  
чає розміщення на поверхні виробу трафарету,

2

який відрізняється тим, що трафарет виготовля-  
ють таким чином, що при його установці на виріб  
елементи трафарету розташовуються там, де  
потрібно наносити покриття, при цьому на вільну  
від елементів трафарету частину поверхні виробу  
наносять сажну маску, наприклад, методом кол-  
очення, потім трафарет знімають і виконують нане-  
сення нітридного покриття на усю вільну поверхню  
виробу і поверхню сажної маски, після чого вида-  
ляють нітридне покриття з поверхні сажної маски  
разом із сажкою

Винахід відноситься до технологій нанесення  
нітридного покриття на поверхні виробу методом  
вакуумного іонного бомбардування і може бути  
використаний в машинобудівній, електротехнічній,  
мікроелектронній і інших галузях промисловості.

Відомий спосіб нанесення нітридного покриття  
на поверхню виробу (Плазменная металлизация в  
вакууме / А. П. Досганко, С. В. Грушецкий, Л. И. Ки-  
селевский и др. — Мн: Наука и техника, 1985 —  
279с (с. 189)), у якому виконується нанесення по-  
криття на виріб методом вакуумного іонного бом-  
бардування. У цьому способі конфігурація плівко-  
вого покриття виконується за допомогою  
фотоплюрафії, спочатку на виявленій фоторезис-  
тивній масці, а потім за допомогою рідинного хім-  
ичного травлення шару робочого матеріалу.

Недоліком цього способу є те, що він має дуже  
низьку продуктивність нанесення декоративного  
покриття. Це пов'язано з тим, що тут спочатку по-  
трібно нанести покриття, потім виконати роботи,  
пов'язані з фотоплюрафією і нанесенням маски, а  
після цього виконується тривалий процес трав-  
лення.

Найбільш близьким по своїй технічній сутності  
є спосіб нанесення нітридного декоративного ре-  
льєфного покриття на поверхні виробу методом  
вакуумного іонного бомбардування на установці  
типу «Бупат» (Никитин М. М. Технология и оборудо-  
вание вакуумного напыления — М: Металлургия,  
1992 — 122с (с. 50 - 51)). Цей спосіб дозво-

ляє наносити декоративне рельєфне покриття на  
поверхні виробу за допомогою екранування чи  
розміщення на поверхні виробу трафарету, що  
запобігає нанесенню покриття під його елемента-  
ми.

Однак для реалізації цього способу необхідно  
виготовити металеві трафарети (температури  
процесу 540°C). При цьому для складних простор-  
ових виробів зі складним рельєфним покриттям,  
металеві спеціальні трафарети виготовляють вкрай  
складно і неефективно. Це особливо позначається  
в одиничному і дрібносерійному виробництві. Усе  
це веде до зниження продуктивності нанесення  
нітридного декоративного рельєфного покриття.  
Крім того ці покриття можна наносити тільки на  
прості просторові поверхні виробів.

В основі винаходу поставлена задача удоско-  
налення способу нанесення нітридного декора-  
тивного рельєфного покриття на поверхню виробу  
за рахунок спрощення процесу нанесення нітрид-  
ного декоративного покриття зі складними рельє-  
фами і просторовими формами поверхонь ви-  
робів, що забезпечує підвищення продуктивності і  
розширення технологічних можливостей.

Поставлена задача вирішується тим, що у ви-  
домому способі нанесення нітридного декора-  
тивного рельєфного покриття на поверхню виробу  
методом вакуумного іонного бомбардування, що  
включає розміщення трафарету на поверхні ви-  
робу, згідно винаходу, трафарет виготовляють таким

Соответствует оригиналу  
Ученый секрет  
диссертационного совета



С. П. Крамько  
04.02

(13) A  
(11) 54100  
(19) UA



3

чином, що при його накладанні на виріб його елементи розташовуються там, де потрібно наносити покриття, при цьому на вільну від елемента трафарету поверхню виробу наносять сажну маску, наприклад методом копчення, потім трафарет знімають і роблять нанесення нитридного покриття на усю вільну поверхню виробу і поверхню сажної маски, після чого видаляють нитридне покриття з поверхні сажної маски разом із сажою.

Ознакою, що відрізняє заявлений спосіб, є те, що виготовлення трафарету і встановлення його таким чином, що елементи розташовуються там, де потрібно наносити покриття, забезпечує можливість нанесення на вільну від елемента трафарету частину поверхні виробу сажної маски методом копчення, потім, завдяки тому, що трафарет знімають, виконується нанесення нитридного покриття на усю вільну поверхню виробу і поверхню сажної маски, після чого виконують вільне видавлення нитридного покриття з поверхні сажної маски разом із сажою, тим самим забезпечується можливість значно знизити час нанесення нитридного рельєфного покриття на складні просторові поверхні, що істотно підвищує продуктивність і розширює технологічні можливості нанесення нитридного декоративного рельєфного покриття на поверхню виробу.

На малюнках показані етапи послідовності реалізації запропонованого способу.

На фіг 1 представлений вид виробу зверху із установленим трафаретом з рельєфними прорізами і нанесеною через них сажною маскою. На фіг 2 - перетин А-А на фіг 1, показано 1 - виріб, 2 - трафарет, 3 - сажна маска. На фіг 3 - виріб з вилученим трафаретом і сажною маскою. На фіг 4 - перетин Б-Б на фіг 3, де 1 - виріб, 3 - сажна маска. Після того, коли трафарет знятий, наносять нитридне покриття на усю вільну поверхню сажної маски (на фіг 5 - не показано). На фіг 6 - шар нитридного покриття на поверхні виробу з вилученим нитридним покриттям з поверхні сажної маски разом із сажою. На фіг 6 - перетин В-В на фіг 5, де 1 - виріб, 4 - рельєфне декоративне нитридне покриття.

Для реалізації способу як предмет обробки використовується металевий виріб зі сталі 20Х2-4Х.

54100

4

чи керамічний виріб зі складними просторовими поверхнями. Трафарет з рельєфними прорізами виготовляється з тонкої алюмінієвої фольги. Сажна маска на поверхню виробу наноситься, наприклад, методом копчення за допомогою масляного пюзового пальника.

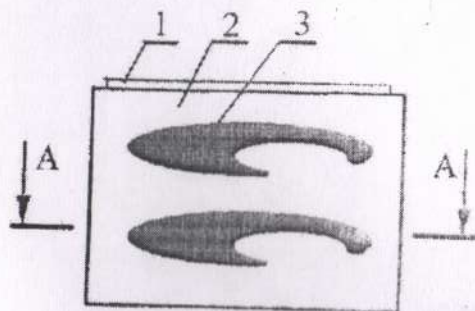
Трафарет з алюмінієвої фольги виготовляється з рельєфними прорізами, через які наноситься сажна маска (товщина не обмежується), наприклад методом копчення. Перед нанесенням нитридного покриття трафарет знімається, і виконується нанесення нитридного покриття при температурі 540°C методом вакуумного іонного бомбардування на установці «Бупат - 6».

Товщина нитридного покриття визначається технічними умовами виготовлення виробу. Для декоративних покриттів товщина нитридного покриття може бути 5 - 6 мкм.

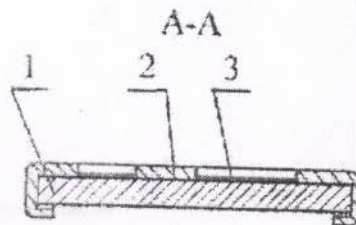
Після нанесення нитридного покриття на виріб, виконується вільне видавлення нитридного покриття сухим дрантям з поверхні сажної маски разом із сажою.

У даному способі експериментально встановлено, що тільки сажна маска (не вигоріє з поверхні виробу при температурі 800°C, через сажу не проходять до поверхні виробу іони нитриду титану й інших елементів) дозволяє високопродуктивними методами виконувати складні візерунки і рельєфи декоративного покриття на різних виробках складної просторової форми (наприклад циліндр, конус, рука столової ложки і т.п.).

Реалізація даного способу дозволяє за допомогою сажних масок забезпечувати складні рельєфи декоративного нитридного покриття на складних просторових поверхнях виробів високопродуктивними методами, за допомогою одного трафарету, навіть в одиничному і дрібносерійному виробництві. Таким чином, запропонований спосіб дозволяє підвищити продуктивність нанесення нитридного декоративного рельєфного покриття на поверхню виробу і зменшити число застосовуваних спеціальних трафаретів, а також розширити технологічні можливості цього процесу.



Фиг. 1



Фиг. 2

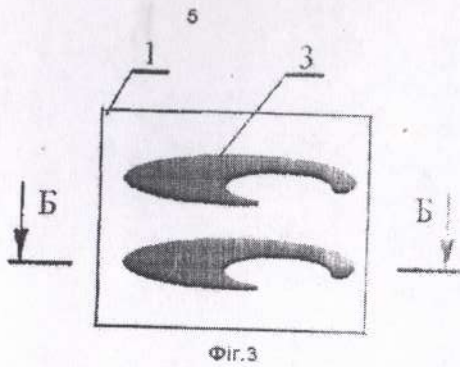
Соответствует оригиналу  
Ученый секретарь  
диссертационного совета



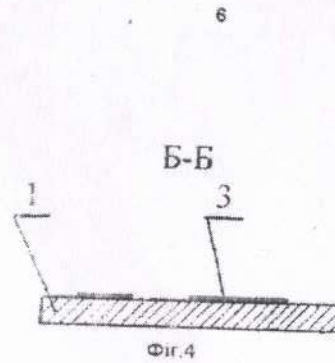
14.06

Ганько

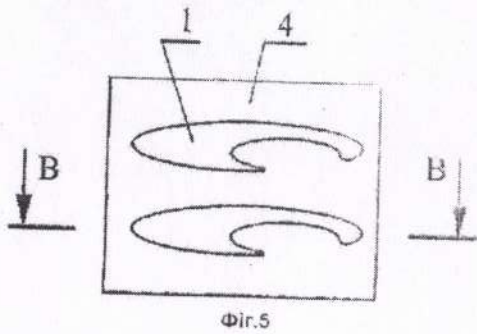
54100



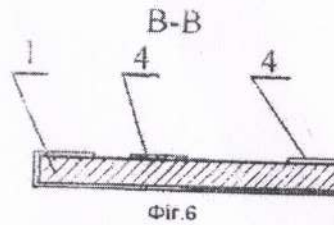
Фиг.3



Фиг.4



Фиг.5



Фиг.6

ТСД "Міжнародний науковий комітет"  
вул. Артема, 17, м. Київ 04050 України  
(044) 236 - 47 - 24

Соответствует оригиналу  
Ученый секретарь  
диссертационного совета



14.02  
Ромько