

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

*На правах рукописи*

**Хавлин Тарас Викторович**

**СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТДЕЛОЧНО-  
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИН-  
НОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк - 2019

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

Научный руководи-  
тель:

**Михайлов Александр Николаевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные  
оппоненты:

Ведущая  
организация:

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

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА по адресу: корпус 2, ул. Артёма, 58, г. Донецк, 283001

<http://donntu.org>

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

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 01.014.02

Грубка Р.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Газотурбинные двигатели (ГТД) нашли широкое применение в различных областях коллективной деятельности человека. Одним из конструктивных элементов ГТД является турбина. В качестве главных рабочих деталей в турбине применяются рабочие и сопловые лопатки, комплекты которых образуют ступени. Данные детали работают в сложных условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия.

В связи с этим, в данной работе выполняется исследование особенностей эксплуатации лопаток турбин, различных типов ГТД, изучение особенностей возникающего износа функциональных частей лопаток. Параллельно изучаются существующие технологические методы для повышения ресурса данных деталей. Полученные результаты исследования используются для выполнения синтеза технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) лопаток турбины ГТД.

**Степень разработанности темы.** Создание типового технологического процесса (ТП) ОУО лопаток турбин работающих в сложных условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия, является основным направлением данного диссертационного исследования. В качестве основы для работы выбрана методология синтеза функционально-ориентированных технологий (ФОТ), предполагающая поэтапное замкнутое проектирование ТП. При таком подходе лопаткам придаются функционально-ориентированные свойства (ФОС), обеспечивающие разноуровневую равноэффективную защиту, как на уровне одной лопатки, так и на уровне комплектов лопаток ступеней.

Используемые серийные методы обработки не в полной мере учитывают сложность структуры совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия газового потока. Тем не менее, разработанные ТП по повышению надежности лопаток турбин, дают полное представление об особенностях конструкции данных деталей, условиях эксплуатации и методах повышения ресурса. Это обеспечивает твердую основу для создания синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбин ГТД на базе ФОТ.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационного исследования заключается в создании типового ТП ОУО лопаток турбин работающих под воздействием сложного, по совокупности и особенностям, абразивно-эрозионного и температурного воздействия

Для достижения данной цели в работе определены следующие задачи:

1. Изучить особенности эксплуатации и разрушения лопаток турбин, различных типов ГТД, работающих в условиях комплексного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Провести анализ существующих технологических методов для повышения ресурса лопаток турбин.

2. Разработать общий подход для синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбин, работающих в условиях совместного эксплуатационного воздействия и реализовать этот подход для повышения ресурса данных деталей на базе функционально-ориентированного подхода.

3. Разработать структурно-технологическое обеспечение ОУО лопаток турбин, которые работают в условиях комплексного воздействия. Выполнить

усовершенствование процесса чистовой обработки лопаток из жаропрочных сплавов с покрытием и без него, учитывая сущность и особенности процесса изготовления и восстановления лопаток, с применением функционально-ориентированного покрытия (ФОП).

4. Разработать конструкторско-технологическое обеспечение процесса напыления защитного покрытия, способного обеспечить защиту лопаток турбин в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Создать структуру ТП обеспечения ФОС лопаток, с ориентированием на сложные условия эксплуатации.

5. Разработать способ формирования ФОС покрытия пера лопаток для повышения их ресурса, и выполнить экспериментальные исследования разработанного ФОП, изучив связи между параметрами и результатами различных эксплуатационных воздействий.

6. Разработать рекомендации по созданию ТП, направленного на обеспечение ФОС лопаток турбин, работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Внедрить результаты исследования в производство.

**Объект исследования.** *Объектом* исследования является структура ТП ОУО для обеспечения ФОС лопаток турбин работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия, а *предметом* – условия и связи в выборе параметров технологических операций ОУО для обеспечения ФОС лопаток турбин работающих при данных нагрузках.

*Научная идея работы* заключается в создании структуры ТП ОУО лопаток турбин ГТД, работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия, на базе применения ФОП.

**Научная новизна.** В диссертационном исследовании выполнен синтез технологического обеспечения ОУО лопаток турбин ГТД работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Установлено, что для защиты от совместного эксплуатационного воздействия лопаток турбин ГТД необходимо применять многослойные разнотолщинные ФОП, позволяющие обеспечить одновременный износ на всей рабочей поверхности.

2. Впервые разработан общий подход к обеспечению ФОС лопаток турбин ГТД, работающих в условиях совместного эксплуатационного воздействия, позволяющий создавать технологии с реализацией принципа обеспечения разноразмерной равноэффективной защиты поверхности пера лопаток.

3. Усовершенствована технология ОУО с применения ФОП для лопаток турбин ГТД, на основе структурных и функциональных зависимостей, с типизацией ТП, что позволяет повышать их ресурс.

**Теоретическая значимость работы.**

1. Разработан общий принцип повышения ресурса лопаток турбин и модель создания ТП ОУО лопаток турбин ГТД работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия.

2. Разработан алгоритм создания ТП для повышения ресурса лопаток

турбин на базе функционально-ориентированного подхода.

3. Установлена сущность и определены особенности процесса обработки как новых, так и восстанавливаемых после эксплуатации лопаток турбин.

4. Созданы структурные схемы ФОП для лопаток турбин ГТД, работающих в условиях совместного эксплуатационного воздействия.

5. Разработаны рекомендации и создан алгоритм для проектирования ТП ОУО, направленного на обеспечение ФОС лопаток турбин ГТД.

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

1. Предложенная структура ТП, конструкторское и технологическое обеспечение ОУО позволяют увеличить ресурс лопаток турбин, работающих в условиях комплексного абразивно-эрозионного и температурного воздействия.

2. Разработанная и предложенная методика и рекомендации позволяет проектировать типовой ТП для повышения ресурса лопаток турбин ГТД, работающих в условиях совместного функционального воздействия.

3. Предложенная методика прецизионного изучения начальных условий, организационных связей между ними, а также их дифференциация, объединение и классификация позволяет осуществить выбор наиболее рациональных технологических решений для повышения ресурса лопаток многоступенчатых турбин ГТД, работающих в условиях совместного эксплуатационного воздействия.

4. Результаты диссертационного исследования внедрены в ООО «Горловский энергомеханический завод» (г. Горловка, Донецкая Народная Республика), ОАО «Ейский станкостроительный завод» (г. Ейск, Российская Федерация), ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк, Донецкая Народная Республика) и в Филиале Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Российская Федерация). Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 111000,00 рублей РФ (сто одиннадцать тысяч рублей РФ).

**Методология и методы исследования.** Методы исследования основываются на реализации основ и принципов технологии машиностроения, внедрения в работу теоретического подхода к синтезу функционально-ориентированных технологий, логики, теории технических систем, трибологии, теории планирования эксперимента и математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены с использованием лабораторной контрольно-измерительной аппаратуры, специально разработанного устройства и оснастки.

**Научные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие научные положения:

- повышение ресурса и количество восстановлений лопаток турбин достигается за счёт нанесения функционально-ориентированного защитного покрытия, которое обеспечит равномерность износа в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия;

- формирование покрытия достигается путём послойного нанесения функционально-ориентированных слоев (температурных, абразивно-эрозионных, связующих и др.) изменяющейся толщины;

- создание структуры типового ТП ОУО лопаток турбин должно выполняться с учетом действующего комплекса совместных эксплуатационных воздействий;

- специальная классификация ФОП лопаток турбин ГТД работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия;

- общий принцип заданного повышения ресурса лопаток турбин ГТД на базе функционально-ориентированного подхода;

- структура и сущность синтеза ТП ОУО лопаток турбин ГТД работающих в условиях комплекса эксплуатационных воздействий.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Степень достоверности подтверждается выполнением математических расчётов, использованием измерительных приборов и промышленного оборудования, соответствия теоретических расчётов с практическими результатами, выводов из полученных результатов внедрения, результатов испытаний, полученных на экспериментальных лабораторных установках с применением образцов на поверенном оборудовании лаборатории ДонНТУ. Результаты работы получены с использованием современных стандартных аналитических методов и экспериментальных испытаний.

Результаты диссертационного исследования были представлены для рассмотрения и обсуждения на следующих научно-технических конференциях:

- «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, Российская Федерация, 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г.);

- «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 2018 г.);

- «Инновационные перспективы Донбасса» (г. Донецк, Донецкая Народная Республика, 2018 г.);

- «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» (г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация, 2018 г.);

- «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, Российская Федерация, 2019 г.).

А также на научном семинаре «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 2019 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» и XXVI международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в 2019 г. в городе Севастополе (Российская Федерация).

**Публикации.** Основные результаты исследования опубликованы в 12 научных трудах, в том числе: 6 статей в специализированных изданиях, утвержденных ВАК Донецкой Народной Республики, включенных в базу научного цитирования «РИНЦ», 6 статей на международных научно-технических конференциях.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 226 страниц, в том числе 160 страниц основного текста, 57 рисунков на 54 страницах, 6 таблиц на 5 страницах, 140 литературных источников на 14 страницах, 3 приложения на 30 страницах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность и новизна тематики диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи работы, определен объект и предмет исследований, определены научная и практическая значимость диссертационной работы.

**В первом разделе** работы проводится анализ особенностей эксплуатации лопаток турбин ГТД. В ходе исследования сделан вывод, что основным фактором, обуславливающим наличие неравномерного износа, является совместное абразивно-эрозионное (скорость частиц до 450 м/с) и температурное (900 - 1200<sup>0</sup>С) воздействия. Проведенный анализ особенностей разрушений лопаток, подтверждает наличие зон на поверхности пера, в которых, во время работы турбины, наиболее сконцентрировано действие комплекса разрушающих факторов, что и является причиной неравномерности.

Анализ существующих технологических методов, повышения ресурса лопаток турбин ГТД, указывает на то, что их применение направлено на повышение качества и надежности деталей без полного учета сложной структуры эксплуатационных воздействий. Кроме того, механическая обработка лопаток турбин при восстановлении, перед нанесением защитного покрытия, выполняемая традиционными методами не учитывает особенности обрабатываемой поверхности, состоящей из материалов с различными свойствами (остатки защитного покрытия). Это приводит к усложнению процесса обеспечения равенства требуемых параметров микрогеометрии при предшествующих ОУО операциях.

Таким образом, на основании проведенных в первом разделе исследований особенностей эксплуатации, износа и разрушения лопаток турбин ГТД, анализа существующих технологических методов для повышения их ресурса, определена цель и основные задачи диссертационной работы.

**Во втором разделе** диссертационной работы решается задача по разработке синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбин ГТД, работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Данные воздействия приводят к неоднородности износа функциональных частей пера лопатки, как на уровне одной лопатки, так и на уровне лопаток разных ступеней турбины.



Рисунок 1. Общая классификация ФОП лопаток турбин.

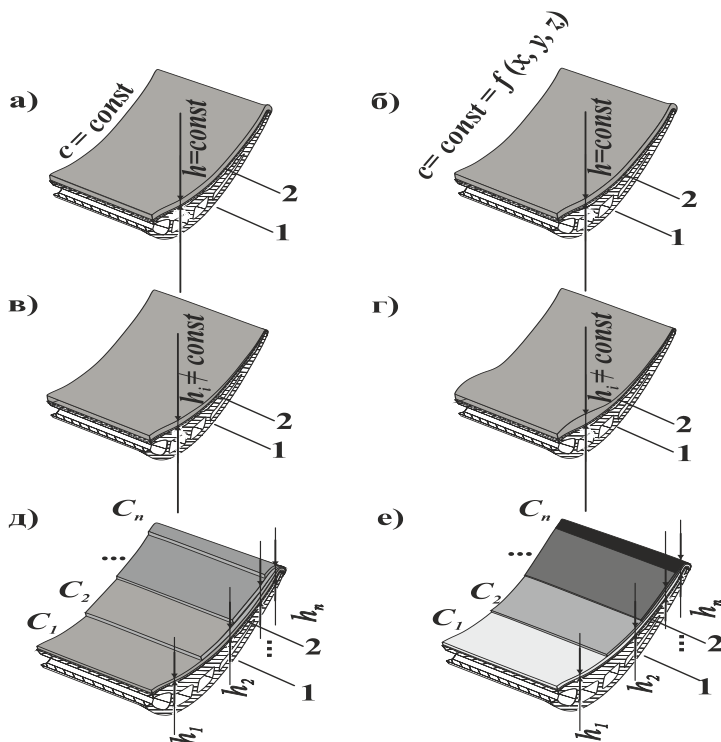


Рисунок 2. Модели ФОП лопаток турбин

Опираясь на результаты проведенных исследований можно утверждать, что работа по разработке синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбин ГТД объединяет в себе множество действий, необходимых для создания условий, способных сориентировать технологов в выборе рационального технологического решения. Возможность осуществления качественного синтеза во многом определяется наличием разнообразных и разноуровневых составляющих как материальных, так и интеллектуальных. Общее множество интеллектуальных источников дополняет разработанная общая классификация ФОП лопаток турбин, рисунок 1.

На основании составленной классификации, были разработаны модели ФОП для лопаток турбин, работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Данные гипотетические варианты моделей ФОП обеспечивают основу для построения структуры свойств и геометрии наносимых покрытий. На рисунке 2 отображены некоторые модели ФОП, где: *a* – однослойное покрытие с постоянной толщиной и свойствами; *b* – однослойное покрытие с постоянной толщиной и переменными свойствами; *в* – однослойное покрытие равномер-



но изменяющейся толщины и постоянными свойствами;  $z$  – однослойное покрытие неравномерно изменяющейся толщины и постоянными свойствами;  $\delta$  – зонально-многослойное покрытие со слоями одинаковой толщины (свойствами);  $e$  – зонально-многослойное покрытие со слоями неодинаковой толщины (свойствами).

Общий подход в формировании структуры защитного покрытия может иметь следующее отображение:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= (m_1, e_1, i_1), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_{s_1} \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_{t_1} \times dl_{v_1}); \\ V_2 &= (m_2, e_2, i_2), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_{s_2} \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_{t_2} \times dl_{v_2}); \\ &\dots\dots\dots \\ V_k &= (m_k, e_k, i_k), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_{s_k} \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_{t_k} \times dl_{v_k}); \\ &\dots\dots\dots \\ V_{n+m} &= (m_{m+n}, e_{m+n}, i_{m+n}), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_{s(m+n)} \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_{t(m+n)} \times dl_{v(m+n)}) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $V_1, V_2$  – формирование структуры однослойных ФОП;

$V_k$  – формирование  $k$ -ого слоя  $j$ -ого уровня объема защитного ФОП;

$V_{n+m}$  – формирование  $n$ -ого слоя  $m$ -ого уровня объема защитного ФОП;

$(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v})$  – набор параметров технологических воздействий материального, энергетического и информационного характеров;

$(dl_s \times dl_t \times dl_v)$  – декартово произведение в  $s$ -м,  $t$ -м и  $v$ -м направлении или окрестность объемной точки;

$\wedge$  – конъюнкция алгебры логики в направлении  $v$ .

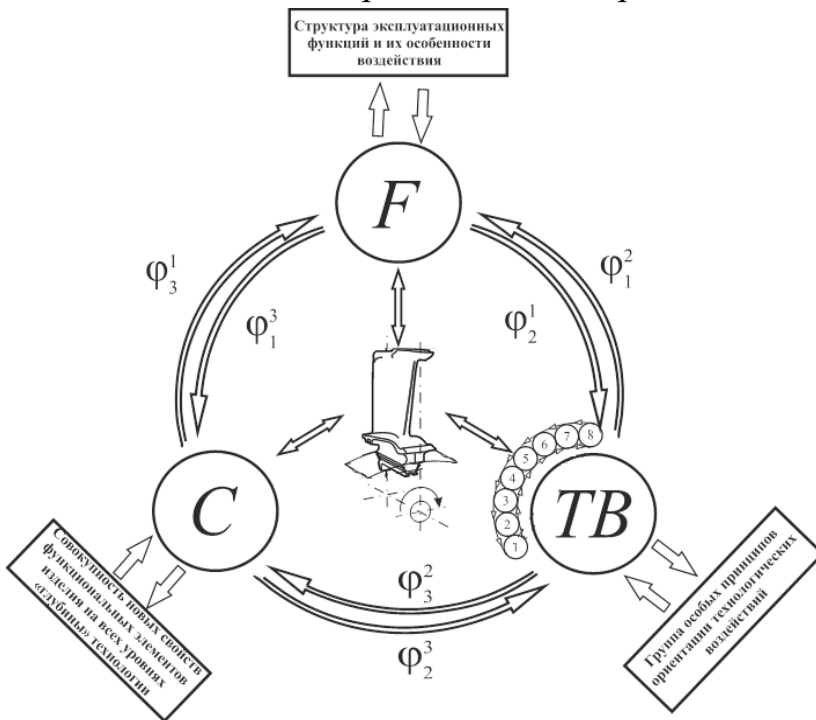


Рисунок 3. Модель ТП ОУО лопаток турбин

Рекуррентная последовательность проектирования технологии привела к созданию модели ТП (рисунок 3), имеющей замкнутую форму реализации. Такой ТП ориентирован на придание специальных свойств (C) изделию, за счет выбора требуемых видов технологических воздействий (ТВ), ориентирующихся на совместные абразивно-эрозионные и температурные воздействия (F). При этом ТВ должны осуществляться, опираясь

на особые принципы ориентации. На рисунке 3 указано:  $\varphi_i^j$  – связи между объектами системы;  $F$  – эксплуатационные функции;  $TВ$  – технологические воздействия;  $C$  – свойства детали; 1...8 – группа особых принципов ориентации ТВ.

В основе общего подхода проектирования ТП ОУО, лежит принцип обеспечения

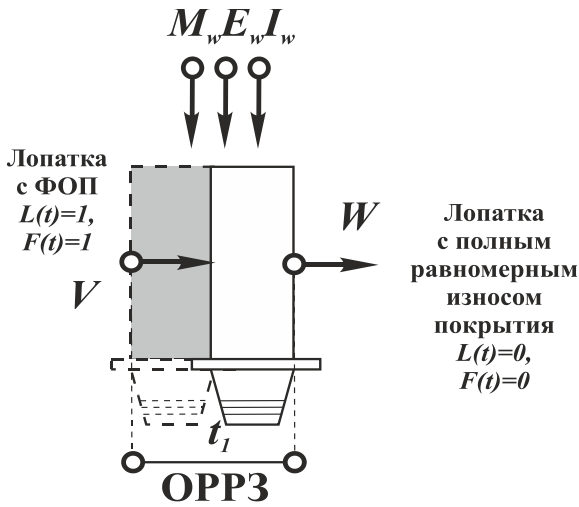


Рисунок 4. Модель принципа ОРРЗ

разноуровневой равноэффективной защиты (ОРРЗ) на всех стадиях ТП. Гипотетическая модель принципа ОРРЗ представлена на рисунке 4, где:  $V$  – входной поток;  $W$  – выходной поток указывает на то, что защитное ФОП имеет полный, единовременный, равномерный по всей поверхности пера износ;  $L, F$  – характеристика покрытия по свойствам и толщине;  $t_i$  – суммарная наработка до проведения одного из видов ремонта (восстановления);  $M, E, I$  – действующие на поверхность пера лопатки эксплуатационные воздействия. Данная модель указывает на то, что ФОП, нанесенное по данному

принципу в процессе эксплуатации лопатки, изнашивается равномерно.

Далее, на базе общего подхода и выбранного принципа осуществляется синтез метода. Синтез осуществляется по замкнутой схеме, рисунок 5, где.

1. Структурирование абразивно-эрозионного и температурного воздействия,  $F$ .
2. Деление лопатки турбины на функциональные элементы, части, зоны ( $\PhiЭ$ ).
3. Составление требуемого набора специальных свойств ( $C$ ).
4. Связи между объектами модели ( $f_i^j$ ).

Структура синтеза методики будет иметь вид (рисунок 6):



Рисунок 5. Модель синтеза

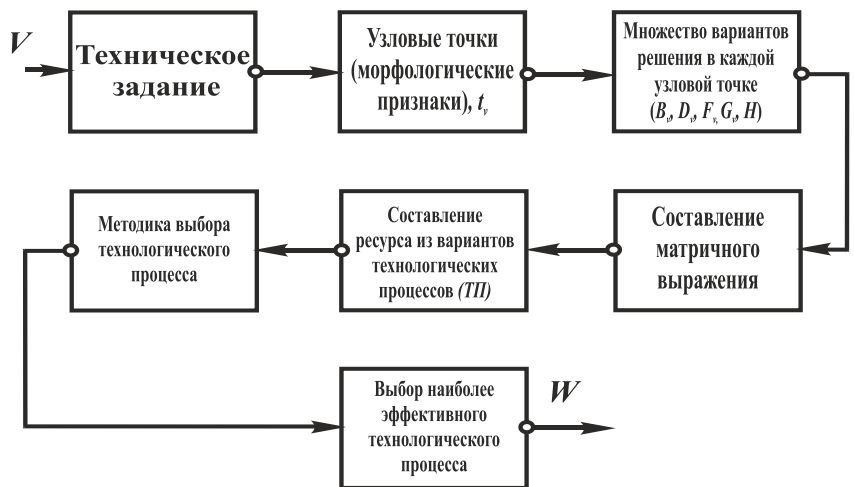


Рисунок 6. Структура синтеза методики выбора наиболее эффективного ТП

Для понимания последовательности создания ТП в работе предложена общая структурная схема диссертационного исследования.

**В третьем разделе** работы решается задача по разработке структурно-технологического обеспечения процесса ОУО лопаток турбин ГТД.

Разработанная схема основных стадий процесса представлена на рисунке 7.

На рисунке 6 указано:  $V$  – входной поток (восстановление или изготовление лопаток);  $W$  – выходной поток (восстановленные или изготовленные лопатки); ЛТ – лопатки турбин; ФЭ – функциональный элемент (часть) лопатки; ТП – традиционное покрытие; ФОП – функционально-ориентированное покрытие.

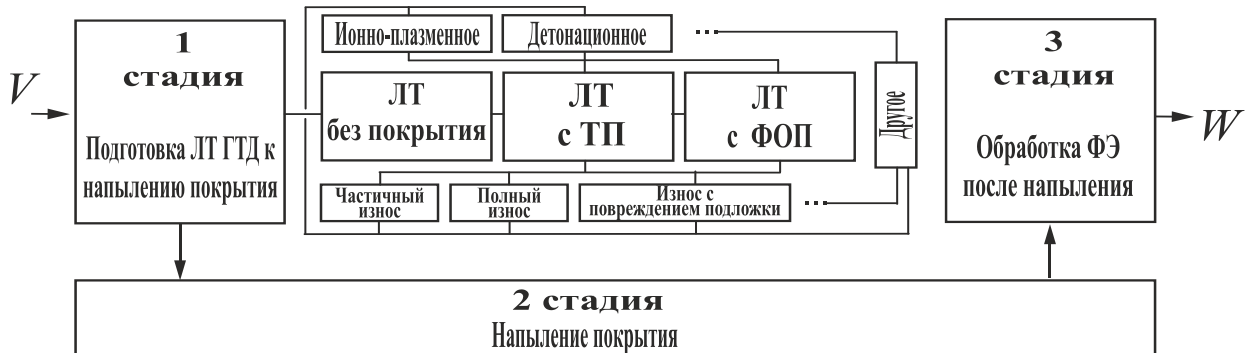


Рисунок 7. Основные стадии структуры ТП ОУО лопаток турбин

Каждая стадия ТП завершается механической обработкой поверхности перед или после нанесения защитного покрытия.

Обработка поверхностей лопатки турбины должна выполняться в течении нескольких последовательных технологических операций. Так, для получения шероховатости  $R_z = 0,025 \dots 0,032$  мкм, при исходном параметре шероховатости  $R_a = 0,25 \dots 0,32$  мкм, необходимо выполнить четыре и более технологические операции, по полировке поверхности. В случае удаления защитного покрытия с поверхности пера лопатки, это можно выполнить в следующем порядке: 1) снятие покрытия (припуск – 0,050 ... 0,070 мм),  $R_a = 0,08 \dots 0,125$  мкм; 2) предварительное полирование (припуск – 0,010 ... 0,015 мм),  $R_a = 0,04 \dots 0,063$  мкм; 3) окончательное полирование (припуск – 0,005 ... 0,007 мм),  $R_a = 0,02 \dots 0,025$  мкм; 4) глянецвание (припуск – 0,0005 ... 0,001 мм),  $R_z = 0,025 \dots 0,032$  мкм.

В процессе изучения сущности и особенностей технологии по обработке поверхностей пера лопаток турбин определена необходимость обратить внимание на начальные условия построения процесса. Поле композиций технологических решений можно представить в виде следующего выражения:

$$S_{t(i+1)} = C_m \cap C_l \cap C_d \cap C_n \quad (2)$$

где  $S_{t(i+1)}$  – технологическое решение  $(i+1)$ -го уровня глубины технологии;

$C_m$  – множество условий свойств основного материала;

$C_l$  – множество условий свойств защитных покрытий;

$C_d$  – множество условий сложной структуры поверхности или материалов с различными свойствами;

$C_n$  – мощность множества условий.

Получение пределов микрогеометрии поверхности ( $R_z = 0,025 \dots 0,032$  мкм) достигается на протяжении четырех последовательных операций, при этом производительность процесса обработки поверхности увеличилась на 17,6%.

Для повышения эффективности полирования поверхности лопаток состоящей из материалов с различными свойствами, в исследовании предложено, при обработке лопаток турбин с остатками старого покрытия применять полирование, способом направленного воздействия или использовать специально созданный полировальник с функционально-ориентированными свойствами.

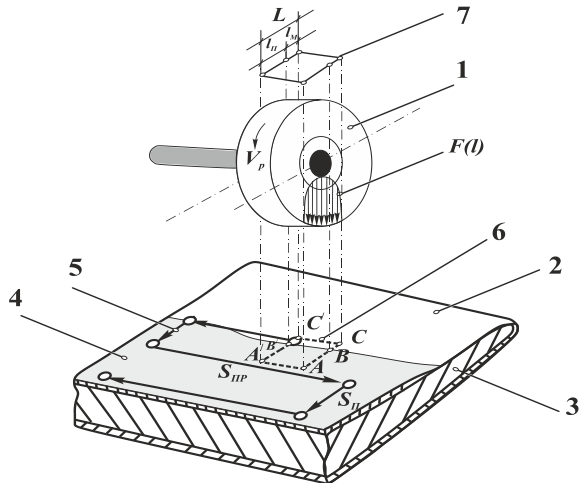


Рисунок. 8. Схема полирования покрытия корыта направленным воздействием с ориентированием продольной оси полировального круга по подаче  $s_o$ .

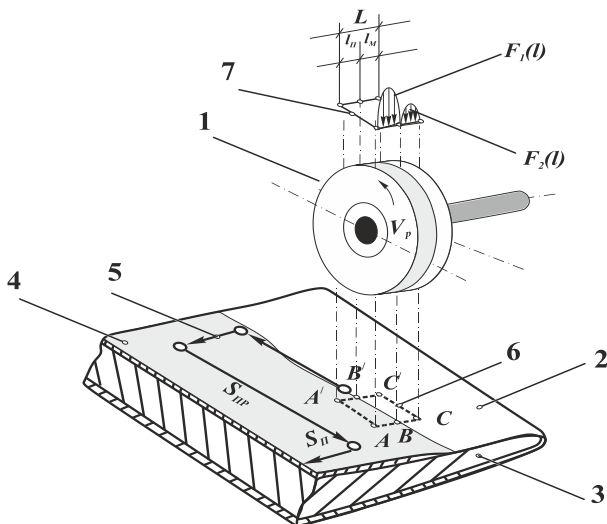


Рисунок. 9. Схема полирования покрытия корыта полировальником с ФОС с ориентированием продольной оси полировального круга по подаче  $s_o$ .

На рисунке 8 представлена схема полирования пера лопатки турбины направленным воздействием. Здесь для указания объектов и действий используются следующие обозначения: 1 – полировальный круг на эластичной связке; 2 – поверхность без покрытия; 3 – перо лопатки; 4 – защитное покрытие.

На рисунке 8, также обозначено: 5 – траектория движения полировальника; 6 – проекция воздействия полировальника на поверхность пера лопатки; 7 – проекция воздействия полировальника для указания размеров зон;  $S_{пр}$  – поперечная подача;  $S_{пр}$  – продольная подача;  $V_p$  – скорость резания;  $F(l)$  – распределение силового воздействия по пятну контакта;  $L$  – длина пятна контакта в данной плоскости;  $l_{пр}$  – длина пятна контакта на покрытии;  $l_M$  – длина пятна контакта с материалом лопатки;  $A, A', B', C', C, B$  – пятно контакта полировальника с обрабатываемой поверхностью. Схема полирования спинки пера аналогична схеме, представленной на рисунке 8.

Далее, в исследовании рассмотрен еще один способ, а точнее основа для его разработки. Предложено использование полировальника с функционально-ориентированными свойствами. На рисунке 9 представлена схема полирования покрытия пера лопатки полировальником с ФОС. Здесь указано: 1 – полировальный круг с ФОС; 2 – поверхность без

покрытия; 3 – перо лопатки; 4 – защитное покрытие; 5 – траектория установочного движения; 6 – проекция воздействия полировальника на поверхность пера лопатки; 7 – проекция воздействия полировальника для указания размеров зон и функций силового воздействия;  $S_{\perp}$  – поперечная подача;  $S_{\parallel}$  – продольная подача;  $V_P$  – скорость резания;  $F_1(l)$  и  $F_2(l)$  – распределения силовых воздействий по пятну контакта;  $L$  – длина пятна контакта в данной плоскости;  $l_{\perp}$  – длина пятна контакта на покрытии;  $l_M$  – длина пятна контакта с материалом лопатки;  $A, A', B', C', C, B$  – пятно контакта полировальника обрабатываемой поверхностью. Схема полирования спинки пера аналогична схеме, представленной на рисунке 9.

В качестве технических параметров воздействия полировального инструмента на обрабатываемую поверхность рекомендуется использовать следующие показатели:

- частота вращения полировальника –  $\leq 2800$  об/мин;
- усилие прижима для предварительного полирования –  $5 \dots 15$  кг/см<sup>2</sup>;
- усилие прижима для глянцеваания –  $2 \dots 5$  кг/см<sup>2</sup>.

Разработаны рекомендации по обеспечению приблизительного сходства параметров обработанной поверхности из различных материалов способом полирования направленным воздействием или с применением специального инструмента.

**В четвертом разделе** исследования решается задача по разработке конструкторско-технологического обеспечения ФОР для напыления покрытий на лопатки турбин ГТД работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия.

Обобщая результаты и выводы выполненных в предыдущих разделах исследований, в рамках создания основы для метода нанесения покрытия с ФОР, было определено, что свойства ФОР лопаток турбин должны отвечать некоторым основным требованиям:

1. Свойства с переменным ориентированием.
2. Свойства со ступенчатым ориентированием.
3. Свойства с зонально изменяющимся ориентированием.
4. Свойства со специальным ориентированием.

Далее была разработана схема нанесения нитрид циркониевого ФОР (общая толщина 120 мкм) для лопаток турбин работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия, рисунок 10. На данной схеме (позиция 0) указано несколько поверхностей, на которых происходит разрушение в виде плоских и объёмных геометрических форм (точек, линий, эллипсов и т.д.). Можно определить, что разрушению подвержены два функциональных элемента: входная кромка и выходная кромка, а также происходит прогрессия разрушения по корытцу. Разрушение покрытия и основного металла на выходной кромке пера имеет вид широкой линии  $a_1 - 1 - a_1'$ , далее повреждение покрытия расширяется до поверхности корыта  $a_2 - 2 - a_2' - a_1' - 1 - a_1 - a_2$ , и так разрушение происходит до поверхности, обозначенной как  $a_5 - 5 - a_5' - a_4' - a_3' - a_2' - a_1' - 1 - a_1 - a_2 - a_3 - a_4 - a_5$  (зона  $a$  может расширяться в сторону входной кромки). Дополнительно на поверхности входной кромки про-



Рисунок. 10. Схема последовательности нанесения ФОП

считается разрушение покрытия в области, имеющей форму неправильного эллипса, следовательно, можно локализовать поверхность разрушения, обозначив её  $b - b_1 - b_2 - b_3 - b_4$  (зона  $b$  по решению технолога может увеличиваться, уменьшаться, изменять направление, форму и т.д.). На основании разработанного общего подхода формирования структуры защитного покрытия, может быть выполнено нанесение покрытия любой сложности. На позициях 1-6 рисунка 10, показана последовательность нанесения ФОП для лопаток турбин работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия.



Рисунок. 11. Установка ННВ 6.6.-И1

Нанесение защитных покрытий лопаток турбин выполняется с помощью ионно-плазменной установки, рисунок 11.

Далее было установлено, что наиболее эффективным способом подготовки поверхности пера лопатки турбины, является ультразвуковая обработка. С этой целью было выполнено усовершенствование требуемого технологического оборудования и рассчитана цикловая производительность процесса обработки лопаток турбин ультразвуком, которая имеет следующее отображение:

$$P_{\text{ц}} = \frac{\iiint_V dx dy dz}{(t_o + t_p) \iiint_{V_0} dx_0 dy_0 dz_0} \quad (3)$$

где  $P_{\text{ц}}$  – цикловая производительность;

$\iiint_V dx dy dz$  – геометрические параметры устройства крепления лопаток;



Рисунок. 12. Ультразвуковая установка для обработки лопаток турбин

$\iiint_{V_0} dx_0 dy_0 dz_0$  - элементарный объем одной рабочей

позиции;

$t_o$  – основное время ультразвуковых воздействий;

$t_p$  – время вспомогательных работ (загрузка, выгрузка лопаток турбины).

Ультразвуковая установка для очистки лопаток турбин ГТД (рисунок 12) со специальным кассетным устройством для комплексного размещения набора лопаток повышает эффективность процесса обработки.

Выявлено, что при достижении уровня разрушения алюминиевой фольги в 90% (рисунок 13) происходит удаление с обрабатываемой поверхности лопаток турбин остатков загрязнений, (рисунок 14).



а)

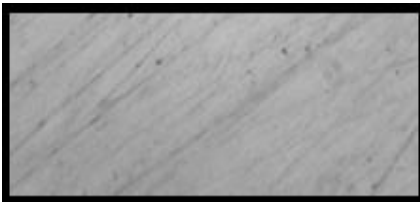


б)

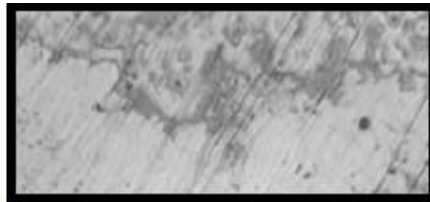


в)

Рисунок 13. Алюминиевая фольга после ультразвуковой обработки (расстояние до поверхности магнитоотрицательной головки 0,1 м, частота колебаний 18 кГц): а – до обработки, б – обработка 60 с, в – обработка 120 с



а)



б)

Рисунок 14. Полированные поверхности, материал ЖСБК (увеличение  $\times 150$  раз): а – до обработки ультразвуком, б – после обработки ультразвуком (расстояние до поверхности магнитоотрицательной головки 0,1 м; частота 18 кГц; время обработки 120 с.)

Далее была разработана структура типового технологического процесса нанесения защитного покрытия на лопатки турбин. При создании структуры учитывалось, что технологические операции - это некая совокупность действий одного процесса

$Y = \{ y_1, y_2, \dots, y_s \}$  и связей (отношений) между ними  $X = \{ x_1, x_2, \dots, x_x \}$ . Исходя из этого, математическое отображение самой структуры технологического процесса, которое будет представлением множества множеств  $Y$  и  $X$ , будет иметь следующий вид:

$$Str_T = \{Y, X\}, \quad (4)$$

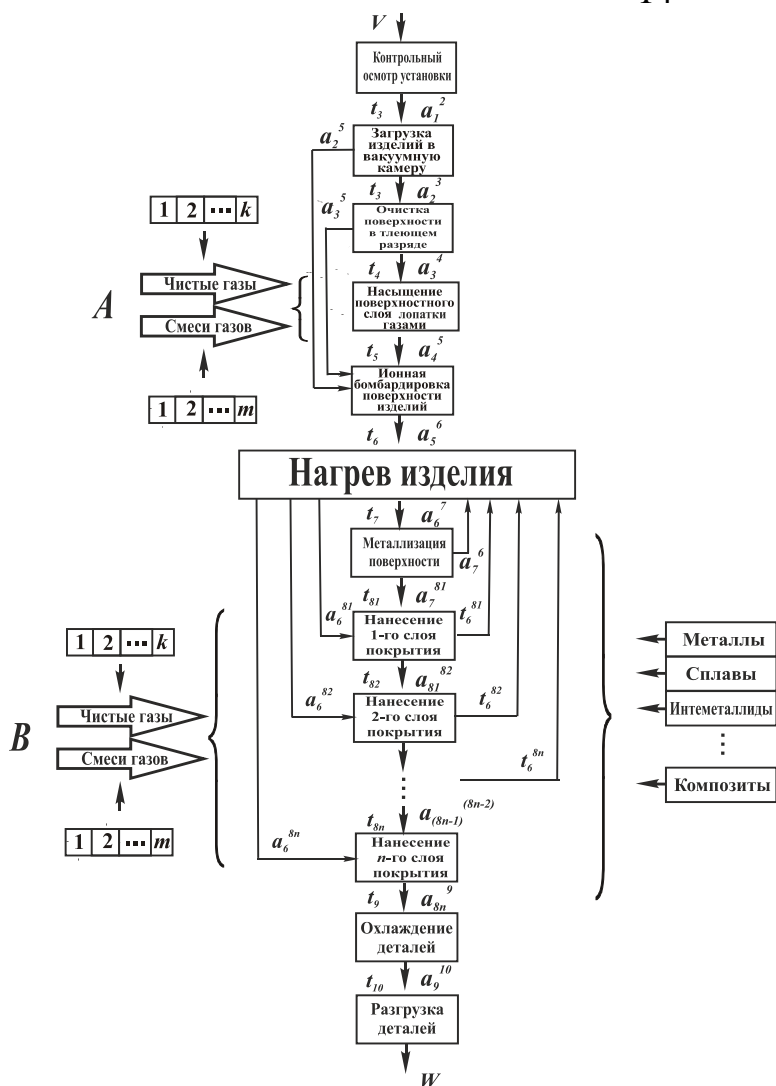


Рисунок 15. Схема типового ТП обработки лопатки турбины

где  $Str_T$  – структура ТП;

$Y$  – множество технологических операций (подпроцессы);

$X$  – множество связей (отношений).

Предложенная на рисунке 15 схема ТП нанесения защитных вакуумных ионно-плазменных покрытий, может быть использована при повышении ресурса лопаток турбин различных типов ГТД.

Для нанесения ФОП в данной работе предложено применять метод ионно-плазменного напыления. В связи с этим была разработана структура конструкторско-технологического обеспечения процесса нанесения защитного покрытия. В данную структуру входит расчет максимальной концентрации позиций для установки лопаток турбин на вспомогательном оборудовании вакуумной камеры ионно-плазменной установки. Для

этого используется следующее выражение:

$$\lambda = \frac{\iiint_U dx dy dz}{\iiint_{U_0} dx_0 dy_0 dz_0}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – максимальная концентрация позиций для установки лопаток;

$\iiint_U dx dy dz$  – объем вакуумной камеры;

$\iiint_{U_0} dx_0 dy_0 dz_0$  – элементарный объем одной позиции для установки лопатки.

**В пятом разделе** выполняются экспериментальные исследования ресурса лопаток, разрабатываются рекомендации по построению структуры ТП ОУО лопаток турбин и приведены внедрения результатов исследования.

Было выполнено изучение особенностей разрушения защитного покрытия на лопатках турбин газотурбинного двигателя ТВЗ-117, работающих в



условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия (коэффициент неравномерности износа –  $\gamma_1 = 2,6$ ).

Измерения износа покрытия выполнялось с помощью толщиномера К-5, рисунок 16.



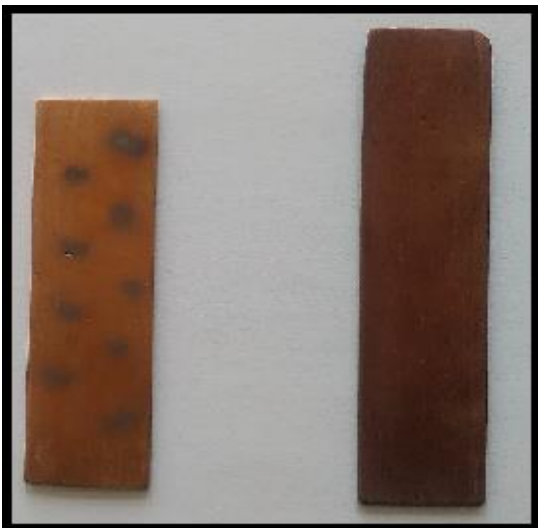
Рисунок 16. Толщиномер «Константа К5»



Рисунок 17. Общий вид установки для проведения эксперимента

Также было проведено изучение особенностей разрушения 10-ти лопаток каждой ступени турбины компрессора, где определен коэффициент неравномерности –  $\gamma_2 = 2,0$ .

Разработана общая схема ТП нанесения ФОП на лопатки турбины. Разработан алгоритм и структура синтеза процесса нанесения покрытия с ФОС.



а)

б)

Рисунок 18. Образцы свидетели с зонами износа

Далее в исследовании была составлена матрица структуры ФОП для лопаток турбин компрессора ГТД с указанием толщины слоя каждого покрытия, количества слоев (6 слоев, общей толщиной 120 мкм) и времени нанесения.

Была разработана методика ускоренного экспериментального исследования и создана специальная установка (рисунок 17), моделирующей как отдельное, так и совместное абразивно-эрозионное и температурное воздействие.

Практически в работе было выполнено нанесение нитрид циркониевого защитного ФОП (120 мкм) на образцы свидетели, рисунок 18, где: а – образец с зонами абразивного воздействия; б – образец с зо-

нами износа совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. В эксперименте использовалась пневмо-абразивная компрессорная уста-

новка (рисунок 19), пирометр 4ПМ1, а результат ускоренного ресурсного исследования приведен на рисунке 20.



Рисунок. 19. Пневмо-абразивная компрессорная установка

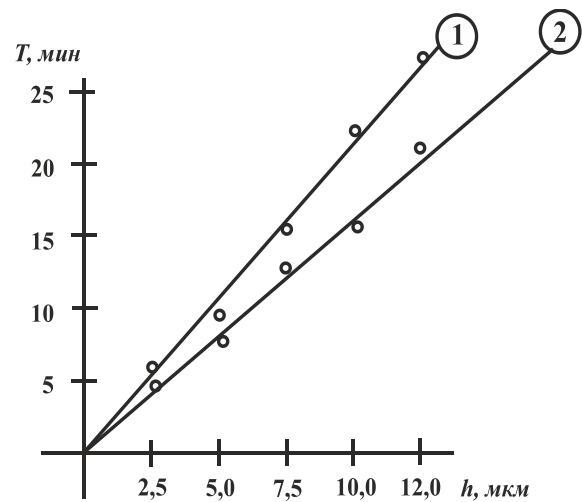


Рисунок. 20. График износа ФОП: 1 – абразивный износ, 2 – совместный абразивно-эрозионный и температурный износ

На основании проведенных исследований в данной работе были разработаны рекомендации по созданию ТП для повышения ресурса лопаток турбин ГТД, работающих в условиях совместных эксплуатационных воздействий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное диссертационное исследование выполнялось с целью создания технологии, способной обеспечить ФОС лопаткам турбин ГТД путем нанесения защитного ФОП. Результаты исследования позволили решить ряд вопросов, а именно:

1. Анализ особенностей эксплуатации лопаток турбин позволил определить наличие совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия на функциональные части пера лопатки. Данное воздействие приводит к неравномерности износа защитных покрытий лопаток турбин. Обзор традиционных технологий указал на то, что большинство из них не обеспечивает защиту от совместного эксплуатационного воздействия.

2. Впервые разработан общий подход синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбин, работающих в условиях совместного воздействия. Данный подход, включающий в себя общую классификацию ФОП, структурную схему процесса и метод нанесения ФОП обеспечивает для лопаток турбин эффективную защиту от термомеханического воздействия. ФОП, спроектированное на базе этого подхода, позволяет повысить ресурс лопаток турбин работающих в условиях совместных эксплуатационных воздействий до 2,0 раз.

3. Разработанное структурно-технологическое обеспечение ОУО лопаток турбин позволило создать общую структуру ТП, создать подход в изучении начальных условий создания технологии, осуществить выбор пределов микрогеометрии обрабатываемой поверхности и подбор абразивных свойств инстру-

мента и материалов. Изученные сущность и особенности процесса обработки деталей, позволили усовершенствовать процесс обработки поверхностей изготовленных из жаропрочных сплавов (с покрытием и без него) и повысить его производительность на 17,6 %.

4. Разработанное конструкторско-технологическое обеспечение процесса напыления защитного покрытия, позволило определить перечень основных требований к свойствам ФОП, набор которых обеспечивает защиту при работе лопаток в условиях совместных эксплуатационных воздействий. Разработать схему многослойного ФОП (покрытие толщиной 120 мкм). Структура типового ТП нанесения защитного покрытия и подход в выборе особых принципов ориентации технологических воздействий, позволяют придать ФОС покрытиям, которые способны защитить от неравномерного термомеханического износа перо лопатки турбины. Такие покрытия могут применяться для различных типов ГТД.

5. Разработанный на основе общего подхода способ формирования ФОС покрытия, позволил обеспечить равноэффективную защиту поверхности рабочих частей пера на уровне одной лопатки и на уровне их комплектов, способствующую минимизации неравномерности износа. Выполненные экспериментальные исследования позволили разработать методику ускоренного эксперимента, определить эффективность ФОП при различных режимах работы лопаток турбин. Сконструированная экспериментальная установка позволяет смоделировать совместное температурное (400°С... 3000°С) и абразивно-эрозионное воздействие (карбид кремния М40, давление воздуха 0,8 МПа, диаметр сопла 3,5 мм) на испытываемый образец.

6. Разработанные рекомендации по созданию технологического процесса, направленного на обеспечение ФОС лопаток турбин, позволяют обеспечить их эффективную защиту при работе в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия, для различных типов ГТД.

7. Результаты диссертационного исследования внедрены в ООО «Горловский энергомеханический завод» (г. Горловка, Донецкая Народная Республика), ОАО «Ейский станкостроительный завод» (г. Ейск, Российская Федерация), ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (г. Донецк, Донецкая Народная Республика) и в Филиале Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Российская Федерация). Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов диссертационного исследования может составить 111000 (сто одиннадцать тысяч) рублей РФ 00 копеек.

## **СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Научные работы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях*

1. Михайлов, А. Н. Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационных двигателя на базе функционально-ориентированной технологии / А. Н. Михайлов, **Т.В. Хавлин** // Прогрессивные

технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 1 (56). – С. 84 - 100.

2. Михайлов, В.А. Общие основы и принципы повышения ресурса газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода / В.А. Михайлов, А.П. Пичко, А.В. Чугункин, **Т.В. Хавлин**, А.В. Лукичев, Д.А. Михайлов, А.Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 3 (58). – С. 32 - 44.

3. Пичко, А.П. К определению структурной надежности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности / А.П. Пичко, В.А. Михайлов, А.А. Колодяжный, Д.А. Михайлов, Е.А. Шейко, **Т.В. Хавлин**, А.Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 2 (61). – С. 64 - 74.

4. Пичко, А. П. Особенности обеспечения свойств лопаток компрессора и турбины газотурбинной установки на базе функционально-ориентированных покрытий и равенства их ресурсов / А. П. Пичко, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, **Т. В. Хавлин**, А. А. Колодяжный, В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 1 (64). – С. 68 - 77.

5. **Хавлин, Т.В.** Последовательность и составляющие общего процесса разработки метода повышения ресурса лопаток турбин газотурбинных двигателей / Т.В. Хавлин, А.Н. Михайлов и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 1 (64). – С. 93 - 105.

6. **Хавлин, Т.В.** Метод разработки функционально-ориентированных технологических решений для обработки поверхности пера лопаток турбин газотурбинных двигателей / Т.В. Хавлин, Д. А. Михайлов, А.Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 2 (65). – С. 65 - 76.

#### *Научные работы в материалах конференций*

7. **Хавлин, Т.В.** Актуальность функционально-ориентированного подхода в повышении свойств изделий / Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. В 2-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2016. Т. 2. – С. 149-150.

8. **Хавлин, Т.В.** Исследование особенностей разрушения лопаток турбин авиационных двигателей / Т.В. Хавлин, А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов и [др.] // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий [Электронный ресурс]: сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., почётного профессора ДГТУ А.П. Бабичева (Ростов-на-Дону, 27-28 февраля 2018 г.); – Донской гос. техн. ун-т. – Электрон. Тестовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – С. 182-186. – URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2018616>.

9. **Хавлин, Т.В.**, Разработка метода повышения ресурса лопаток турбины вертолетного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / Т.В. Хавлин, А.Н. Михайлов и [др.] [Электронный ресурс] // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. Инновационные перспективы Донбасса, (г. Донецк, 22-25 мая 2018г.) – Донецк: ДонНТУ, 2018.Т. 3. – С. 181-183. – URL: <http://ipd.donntu.org/dl/IPD2018/s3.pdf>.

10. **Хавлин, Т.В.** Структурно-технологическое обеспечение функционально-ориентированной технологии применяемой для повышения качества лопаток турбины авиационного газотурбинного двигателя / Т.В. Хавлин, А.Н. Михайлов, Д.А Михайлов, В.А. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 10-16 сентября 2018 г. В 2-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2018. Т. 2. – С. 188-192.

11. **Хавлин, Т.В.** Создание функционально-ориентированной технологии повышения ресурса лопаток турбин авиационных двигателей / Т.В. Хавлин, А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов [и др.] // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» в г. Петропавловск-Камчатский 17-19 октября 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – С. 119-123.

12. **Хавлин, Т.В.** Особенности обработки поверхностей пера лопаток турбин газотурбинных двигателей / Хавлин Т.В., Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Михайлов В.А., Копыл И.А. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XVII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека» 04-05 апреля 2019 г. – Екатеринбург: УГГУ, 2019. – С. 312-315.

**Личный вклад автора в работах**, опубликованных с соавторами: [1, 2, 3, 6, 9, 12] - соискателем разработан общий подход в создании специальной технологии, изучены особенности эксплуатации, разработаны принципы применения ФОТ для повышения ресурса лопаток турбин; [4, 5, 7, 8, 10, 11] – соискателем разработан метод повышения ресурса, структурные модели покрытия и выполнен синтез структуры технологического обеспечения.