

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
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Михайлов А.Н.

Идентичность всех экземпляров диссертации
ПОДТВЕРЖДАЮ:

Ученый секретарь диссертационного совета

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



Донецк 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБИНЫ НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА.....	14
1.1. Анализ особенностей разрушения лопаток турбин газотурбинных двигателей и действующих эксплуатационных функций.....	14
1.2. Анализ существующих технологических методов, применяемых для повышения ресурса лопаток турбин.....	34
1.3. Цель и задачи работы	41
РАЗДЕЛ 2. СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ	44
2.1. Общие положения.....	44
2.2. Классификация функционально-ориентированных покрытий.....	48
2.3. Разработка общего принципа повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода.....	57
2.4. Синтез метода повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода.....	65
2.5. Разработка способа повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода.....	69
2.6. Алгоритм повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода.....	75
2.7. Структурная схема диссертационной работы.....	77
2.8. Выводы.....	80

РАЗДЕЛ 3. СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИНТЕЗА ПРОЦЕССА ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	82
3.1. Структура стадий технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода.....	82
3.2. Сущность и особенности процесса обработки поверхностей пера лопаток турбин для нанесения защитных покрытий	85
3.3. Совершенствование процесса чистовой обработки лопаток турбин газотурбинных двигателей.....	98
3.4. Особенности процесса полирования поверхностей пера лопаток турбин газотурбинных двигателей.....	104
3.5. Выводы.....	113
РАЗДЕЛ 4. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ ТУРБИН ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ	115
4.1. Основы метода нанесения функционально-ориентированных покрытий на лопатки турбин	115
4.2. Конструкторское и технологическое обеспечение нанесения функционально-ориентированных покрытий.....	119
4.3. Процесс подготовки поверхностей пера лопатки турбины к нанесению защитного покрытия	123
4.4. Структура типового технологического процесса нанесения покрытий на лопатки турбин.....	128
4.5. Структура конструкторско-технологического обеспечения технологического процесса нанесения ионно-плазменного защитного покрытия	136
4.6. Выводы	142
РАЗДЕЛ 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. РЕКОМЕНДАЦИИ. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	143

5.1 Особенности совместного абразивно-эрозионного и температурного разрушений пера лопаток турбин	143
5.2. Способ формирования ФОС покрытия пера лопаток различных ступени турбины	148
5.3. Алгоритм технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин с применением ФОП	150
5.4. Синтез типового технологического процесса подготовки поверхности пера лопаток турбины	152
5.5. Экспериментальные исследования процесса нанесения защитного ФОП на лопатки турбины	157
5.6. Изучение сравнительных характеристик разрушений лопаток турбин при экспериментальном термомеханическом воздействии.....	161
5.7. Основные рекомендации исследования	165
5.8. Внедрение результатов исследования.....	169
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ (А). Методика и рекомендации по синтезу технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя.....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ (Б). Деление лопатки турбины на функциональные элементы, части, зоны.....	210
ПРИЛОЖЕНИЕ (В). Метод разработки подхода в совершенствовании функционально-ориентированного материального обеспечения синтеза отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин.....	219
ПРИЛОЖЕНИЕ (Г). Акты внедрения.....	224

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве двигателей для авиации широкое применение приобрели газотурбинные двигатели (ГТД), так же эффективно данный тип двигателя применяется для обеспечения энергетического потенциала в виде наземных технологических систем, и не менее эффективно применяется в качестве двигателей боевых машин. При этом каждое направление, будь то производство вертолётных двигателей, судовых двигателей, двигателей боевых машин или энергетических установок, требует глубокого изучения. Так, например, при производстве вертолётных двигателей основная тенденция их развития направлена на высотные, скоростные характеристики и продолжительность полёта, а при производстве двигателей боевых машин, на способность двигателя работать в условиях сильной запылённости и т.д.

Установленный ресурс эксплуатации, гарантирующий надёжность и безотказность ГТД, во многом определяется свойствами деталей турбины, а именно лопатками турбины. Способность лопаток турбины обеспечивать выполнение возложенных на них эксплуатационных функций, при наличии неоднородных и неравномерных по продолжительности, мощности, ориентировании и природе воздействий, определяет качество детали и двигателя в целом. Среди таких воздействий наиболее выраженными и характерными для лопаток турбины являются высокотемпературное окисление, газовая коррозия, механическая эрозия и т.д. Такие условия, можно сказать, в большинстве характерны для всех типов двигателей, но, применяя при изучении функционально-ориентированный подход [63], можно определить конкретные особенности эксплуатации и требуемые технологии для производства данных типов деталей, необходимых каждому образцу ГТД.

Таким образом, главной задачей исследования является создание синтеза технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя с целью повышения их ресурса.

Актуальность темы. 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. Такие условия в целом приводят к износу лопаток турбин, охарактеризованному неравномерностью в виде прогаров входных и выходных кромок, абразивного износа поверхностей, изменений фазовых и структурных свойств материалов функциональных частей пера лопатки.

С целью повышения ресурса лопаток турбин при обеспечении надежности ГТД используются разнообразные технологические решения с применением комплекса операций обработки поверхностей пера лопатки. В основе таких операций в большинстве случаев лежат традиционные способы и методы, которые не сориентированы на существующие особенности действий эксплуатационных функций и их результаты в виде возникающих неоднородных абразивно-эрозионных и температурных разрушений (изменений) поверхностей (слоев) пера.

Сложность форм износа поверхностей пера, в первую очередь, формируется за счет энергетических воздействий на функциональные элементы, имеющие определённую техническими требованиями геометрическую форму. Воздействия обусловлены свойствами (состоянием) и поведением газового потока в рабочем тракте, а так же концентрацией и физическими свойствами частиц пыли, сажи, выделяющих при сгорании лучевую энергию и т.д.

Формирование зоны разрушения лопаток турбин от температурных и абразивно-эрозионных воздействий в большинстве случаев начинается в нескольких частях. Одна из них, – это входная кромка пера лопатки, а именно

несколько ниже её срединной части. На выходной кромке, – это зона близкая к пересечению выходной кромки и бандажной полки. Прогрессирование разрушения происходит по определённой закономерности: на входной кромке вверх к бандажной полке, на выходной кромке вниз к замку лопатки и по переходной поверхности (периферийной кромке) между пером и бандажной полкой в сторону входной кромки. Разрушение поверхности корытца пера лопатки происходит радиально от указанных выше зон.

Воздействие механических частиц, происходит в соответствии с направлением течения газового потока, геометрией пера и выражается в виде активации процесса разрушения по поверхности входной кромки и в зоне пересечения выходной кромки с бандажной полкой (периферийной кромкой) при сепарации механических частиц в результате вращения рабочего колеса турбины или налипания расплава. В дальнейшем разрушение распространяется по поверхности корытца пера лопатки.

Для придания нужных свойств лопаткам турбин, традиционно применяются технологии нанесения защитных покрытий постоянных по различным параметрам относительно той поверхности, на которую они наносятся. Данные покрытия обеспечивают в целом свойства всей детали, но не дают возможность предотвратить неравномерность износа и повреждений различных функциональных элементов лопатки на протяжении одновременного эксплуатационного периода. В связи с этим в данном исследовании для повышения ресурса лопаток турбин предлагается применять защитные функционально-ориентированные покрытия (ФОП), обеспечивающие пропорциональную неравномерным воздействиям степень защиты поверхностей пера лопатки турбины.

Реализовать данную идею возможно за счет создания специальной технологии, способной повысить ресурс не только новых, но и лопаток, требующих ремонта и восстановления. Наряду с этим, необходимо обратить внимание на то, что технология должна охватывать процесс подготовки поверхностей перед напылением покрытия, сам процесс повышения ресурса, и

окончательную обработку лопатки после нанесения на неё покрытия с функционально-ориентированными свойствами (ФОС).

В работе особое внимание уделяется условиям эксплуатации. В общем такие условия можно описать как сложные (критические, переменные, смешанные и т.д.) нагрузки различной природы. Последствия воздействий таких нагрузок легко определяется в ходе технического обслуживания, ремонта, измерений и прочее. В связи с чем, работа по созданию технологии предполагает решение проблемы не только по факту наличия разрушений, приводящих к неремонтопригодности детали, но и с перспективой увеличения количества повторных циклов использования лопаток, например, обеспечения равномерности износа всей поверхности пера.

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. Создание типового технологического процесса 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 технологического процесса. При таком подходе лопаткам придаются 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 технологические

процессы 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 технологического процесса 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 восстановлении лопаток, с применением 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 технологического процесса 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 технологического процесса, направленного на обеспечение ФОС лопаток турбин, работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Внедрить результаты исследования в производство.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является структура технологического процесса 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 технологического процесса ОУО лопаток турбин ГТД, работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия, на базе применения ФОП.

Научная новизна полученных результатов. В диссертационном исследовании выполнен определённый объем работы, цель которой создание типового технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин газотурбинных двигателей с применением ФОП, способных увеличить продолжительность эксплуатации данных деталей 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 разноуровневой равноэффективной защиты поверхности пера лопаток.

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

Теоретическая значимость работы.

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

2. Разработан алгоритм создания технологического процесса 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 технологического процесса ОУО, направленного на обеспечение ФОС лопаток турбин ГТД.

Практическая значимость работы.

1. Предложенная структура технологического процесса, 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 технологический процесс 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), «ДОННТУ» (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 работы, 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 технологического процесса 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 технологического процесса 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. 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.).

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

РАЗДЕЛ 1

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБИН

1.1. Анализ особенностей разрушения лопаток турбин газотурбинных двигателей и действующих эксплуатационных функций

Актуальность в решении вопросов по изготовлению машин требуемого качества приобрёл метод, основанный на синтезе ФОТ [72], обеспечивающих качественно новую совокупность свойств и меру полезности изделий машиностроения. Применение функционально-ориентированных технологий для изделий машиностроения позволяет максимально повысить их общие эксплуатационные параметры за счёт увеличения технических возможностей и свойств отдельных элементов, поверхностей (зон) изделия в зависимости от функциональных особенностей эксплуатации.

Одним из продуктивно реализуемых методов обеспечения функционально-ориентированных технологий является метод вакуумного ионно-плазменного напыления (детонационного напыления) различных материалов на поверхности изделий, которые значительно улучшают эксплуатационные свойства этих деталей [11, 73].

Тематика данного исследования указывает на существующие предпосылки в выборе и реализации качественно новой технологии, базирующейся на функционально – ориентированном подходе к изготовлению и обработке лопаток турбин газотурбинных двигателей с целью улучшения технического уровня изделия и экономических показателей процесса изготовления. Модели рабочих лопаток турбин представлены на рисунке 1.1 и модели сопловых лопаток турбин

представлены на рисунке 1.2. На рисунке 1.1 отображены: 1.1,а – рабочая лопатка турбины с бандажной полкой и елочным хвостовиком; 1.1,б – рабочая лопатка турбины без бандажной полки и елочным хвостовиком; 1.1,в – рабочая лопатка турбины с бандажной полкой, системой охлаждения и елочным хвостовиком.

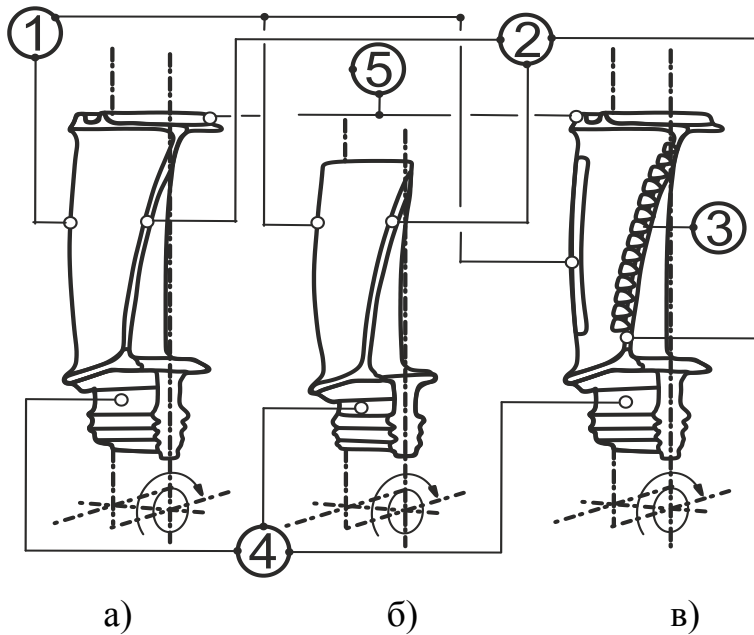


Рисунок 1.1. Модели рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей

Здесь отмечены: 1 – входная кромка пера; 2 – выходная кромка пера; 3 – элементы системы охлаждения; 4 – хвостовик.

На рисунке 1.2. показано: 1.2,а – сопловая лопатка; 1.2,б – сопловая лопатка с системой принудительного охлаждения; 1.2,в – сопловые лопатки в секторах. Здесь отмечено: 1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – наружные и внутренние полки.

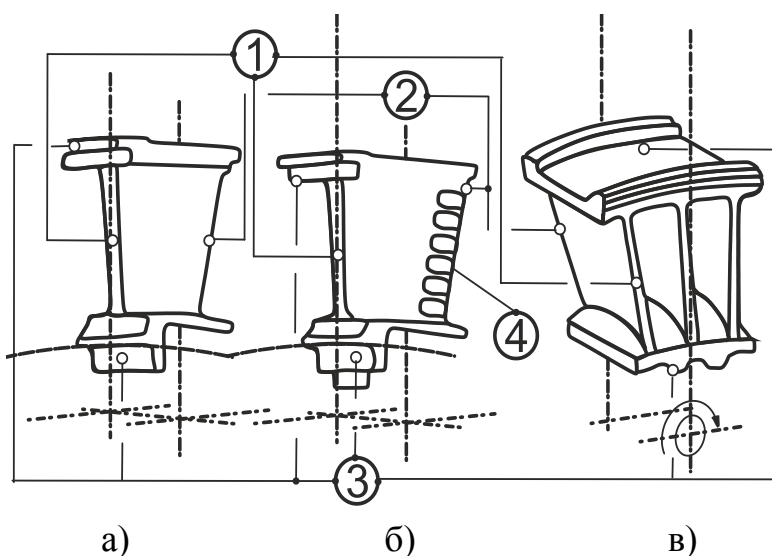


Рисунок 1.2. Модели сопловых лопаток турбин газотурбинных двигателей

Повышение качества таких деталей, безусловно, является одним из важных критериев улучшения временных показателей, в течение которых производимая (произведённая) продукция может свободно адаптироваться к закономерно меняющимся

условиям эксплуатации, что принципиально необходимо специалистам при формировании линейки производимых машин новых поколений.

Классическая схема построения производственного процесса, примененного для решения данных вопросов, предполагает выполнение работы по: разработке технологических операций и выбору средств технологического оснащения; выбору средств механизации и автоматизации процесса изготовления; подбору действующего типового, группового технологического процесса или поиску аналога единичного универсального процесса (процесса, имеющего универсальную структуру) и т.д. [31].

При всём этом множестве направлений первостепенной задачей и составляющей структуры процесса будет анализ начальных условий, результатом которого станет практический вывод, сделанный на основе изучения и исследования особенностей износа (разрушения) лопаток турбин в зависимости от условий эксплуатации. Полученный анализ позволит качественно синтезировать процесс производства изделий, а именно создать хорошо структурированную технологию, применимую как в перспективном машиностроении, так и для улучшения качества и продления ресурса эксплуатации уже существующих образцов лопаток турбин газотурбинного двигателя.

Научно-техническая отрасль по производству газотурбинных двигателей сегодня является стратегической и наукоёмкой, что предъявляет особые требования к процессу выбора технологий производства. Чем же это обусловлено? Конечно же, задачами, которые возложены на газотурбинные двигатели.

Надежность работы двигателя, помимо безопасности работы, непосредственно влияет на затраты, связанные с эксплуатацией машин и установок, и включает в себя такие понятия как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, контролепригодность, эксплуатационную технологичность [35, 92, 112].

Для повышения надежности в данном исследовании выполняется работа по разработке синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбин газотурбинного двигателя с применением защитных покрытий на базе функционально-ориентированного подхода. Это необходимо в связи с возникающими особенностями износа и разрушения поверхности пера лопаток турбин.

Традиционно в современном машиностроении применяется множество видов покрытий, позволяющих решать объём различных проблем, связанных с повышением качества деталей машин. С этой целью используются различные материалы и их комбинации, составы и структуры веществ, наносимые разнообразными (перспективными) методами обработки [20, 44, 72, 73, 106].

Но, изучая результаты эксплуатации деталей турбин газотурбинных двигателей, в частности лопаток турбин, появляется множество информации об особенностях износа и повреждения рабочих поверхностей данных деталей.

Рассматривая особенности разрушений элементов деталей при эксплуатации можно предположить следующее. В любой машине главными функциональными единицами являются детали. Деталь можно структурировать определённой совокупностью исполнительных зон и элементов, выполняющих при эксплуатации в машине (технической системе) различные технические функции для осуществления общей, целевой функции [72].

Анализируя структуру и природу этих функций, можно утверждать о наличии таких зон деталей, в которых, во время работы машины, напряжение наиболее сконцентрировано, и в тоже время концентрация может перераспределяться по изделию пространственно и изменяться по времени продолжительности воздействия.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что возникновение особенностей разрушений элементов деталей и их зон при эксплуатации – процесс прогнозируемый. Такими разрушениями могут, в общем, быть [72]:

1. Неравномерный износ поверхности детали.

2. Неравномерные абразивно-эрозионные, температурные и другие разрушения поверхности детали.

3. Действия неравномерной удельной контактной нагрузки по поверхности детали.

4. Действия неодинаковых эксплуатационных функций по различным поверхностям детали (неодинаковые параметры структуры эксплуатационных функций) и других особенностей эксплуатации.

Возникновение повреждений лопаток турбины является следствием действующих на двигатель различных нагрузок в течении рабочего цикла. Различают несколько видов нагрузок: газовые, инерционные, усилия, возникающие в результате температурных воздействий и механического взаимодействия и др. [45].

Теория возникновения действующих сил, протекание физических процессов в двигателе и причины разрушения лопаток турбин также изучаются авторами в [47, 57, 60, 78, 122].

Далее в данном исследовании приводятся примеры особенностей разрушения лопаток турбин вследствие совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия.

Первым примером может быть анализ авиационных происшествий по причинам отказа авиационной техники, который свидетельствует, что 30 – 70 % происходит по причине отказа двигателей. Статистика указывает на то, что порядка 35 – 50 % от общего количества возникающих в двигателе дефектов приходится на детали горячего тракта, из которых на лопатки турбины приходится практически половина всех повреждений, около 25 %. Рабочие и сопловые лопатки подвержены действию статических, циклических, повторно-статических нагрузок, высокотемпературной газовой коррозии и комплексным нагрузкам [22]. Данная особенность указывает на необходимость развития темы повышения ресурса лопаток турбин ГТД и двигателя в целом.

Следует учесть, что перспективы в строительстве авиационных двигателей – это увеличение мощности двигателя, что само собой определяет повышение

температуры и давления на входе турбины и усложняет процесс производства лопаток турбины и нанесения защитных покрытий.

Наличие активных веществ, таких как сера, ванадий, либо комплексных химически активных присадок, входящих в состав авиационного топлива, в момент горения вызывают коррозию входных и выходных кромок, взаимодействуя с нанесённым защитным покрытием типа *YSZ* (диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттрия). Особенностью разрушения в данном случае будет появление зон химической коррозии в области наибольшей температуры горения газового потока, недостаточной толщины покрытия в определенных участках, не соответствия свойств покрытия и т.д.

Так же примером разрушения лопаток турбин может быть случай с использованием защитных покрытий на основе *Al* (алюминий), *Me* (металл), *Y* (иттрий), *Cr* (хром), в виде защитного поверхностного слоя. В данном случае причиной возникновения разрушений является применение разнокомпонентных материалов в основном сплаве детали и наносимого покрытия. При таких условиях происходит особое взаимодействие материалов защитного покрытия и жаропрочного сплава лопатки на уровне элементарных частиц (атомарных уровней), которые описываются в [20] как размерный фактор. Особенностью данного воздействия эксплуатационной функции станет температурное напряжение в некоторых зонах пера лопатки.

Далее, в качестве примера можно рассмотреть случай использования монокристаллических безуглеродистых жаропрочных никелевых сплавов, прошедших процесс введения легирующих добавок (рений, рутений) для изготовления лопаток турбин, способных работать при температуре на входе турбины более 2000 °С. Лопатки, изготовленные по данной технологии, представляют собой изделия, функциональные части которых имеют сложные конструктивные особенности (система охлаждения). В данном случае также особенностью воздействия эксплуатационных функций будет появление зон разрушения защитного покрытия на входных и выходных кромках пера лопатки. Главным фактором особенности будет являться неоднородность разрушения по

всей площади пера. Например, входная и выходная кромки лопатки турбины могут иметь максимальные повреждения, и то не по всей длине своего профиля, а корытце и спинка имеют только некоторый износ защитного покрытия.

Использование различных типов покрытий ориентировано на требуемые условия эксплуатации, поэтому рассмотрим следующий пример. Если на поверхность основного металла лопаток нанесён жаропрочный градиентный сплав конденсационно – диффузионного типа методом ионно – плазменного напыления системы $NiCrAlY + NiAlCrY$, возникают разрушения поверхностного защитного слоя из-за отсутствия карбидов на границе сплав/покрытие. Причиной происходящего разрушения является перегрев (средние показатели температуры превышают $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$) и продолжительное (более 100 часов) нахождение лопаток в работе при таких условиях, а как следствие – возникновение ускорения диффузии элементов из защитного покрытия в основной сплав [44]. При рассмотрении данного вида разрушения следует обратить внимание и на тот факт, что повреждение в основном происходит не равномерно по всей поверхности, а ориентируется на функциональные части, элементы, зоны и т.д. пера лопатки.

Наряду с указанными причинами возникновения разрушения лопаток турбин ГТД и их особенностью следует также обратить внимание на процесс, возникающий при работе ступени газовой турбины (лопаток в ней) и сопряжённых с ней узлов ГТД, а именно особенностью распределения температуры газа на выходе из камеры сгорания. Что, в принципе, объясняет возникновение особенностей разрушения (изменения, износа и т.д.) на фоне воздействия температурного напряжения, а главное его неравномерности относительно всех элементов, частей, зон пера лопатки турбины.

На рисунке 1.3 представлен график изменения температуры газа на выходе из камеры сгорания по длине пера лопаток турбины с принудительным охлаждением, где указано: 1.3,а – при равномерном расположении перфорационных отверстий; 1.3,б – при неравномерном расположении перфорационных отверстий (с большей частотой в области, близкой к оси двигателя). Цифрами на данных графиках обозначены: 1 – температура газа перед

входной кромкой соплового аппарата; 2 – температура газа перед передней

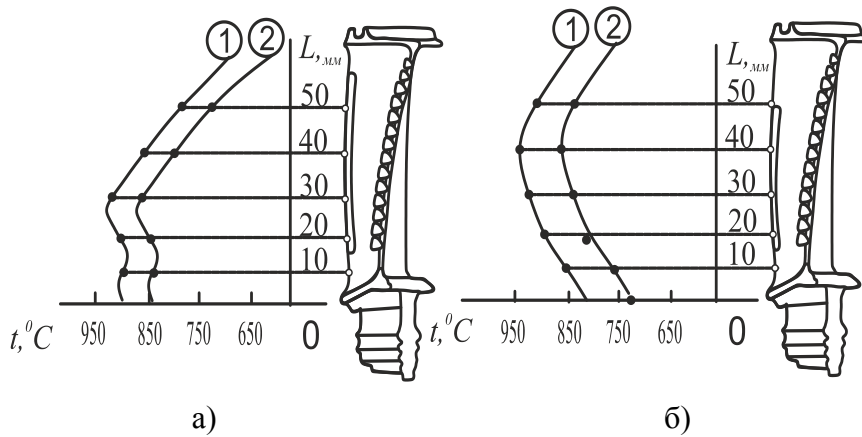


Рисунок. 1.3. График распределения температуры газа на выходе из камеры сгорания по длине пера лопаток турбины с принудительным охлаждением (1 – температура газа перед сопловым венцом; 2 – температура газа перед рабочими лопатками)

кромкой рабочего колеса.

Данная зависимость описывается в [131] и указывает на то, что если даже средняя температура всей лопатки соответствует требованиям, то существуют локальные зоны (выше или ниже срединной части входной кромки), в которых температурные значения предполагают

возникновение процессов коррозии и окисления и фактически подтверждают факт неоднородности (неравномерности) разрушения пера лопатки.

Также следует рассмотреть, как пример, особенности разрушения лопаток турбин в зависимости от того, в какой ступени данные лопатки установлены. Статистика свидетельствует о большей степени вероятности разрушения лопаток последней ступени. Материалом для изготовления таких лопаток является сплав с меньшей жаропрочностью и термоустойчивостью, и при больших температурных показателях возможно возникновение разрушения именно этих лопаток турбин. Данная особенность рассматривается в [131].

Формы эксплуатационных повреждений лопаток турбин не всегда имеют явно выраженные внешние признаки. На примере эксплуатации турбин лопатки, которые изготавливаются из сплава ХН70ВМТЮ (жаропрочный сплав на никелевой основе), можно рассмотреть такую особенность разрушения как снижение предела выносливости с 205 до 107 Мпа после 1000 часов наработки. Металлографический анализ определил наличие участков, где происходит

снижение степени микротвёрдости до 20% и обеднение легирующими элементами на глубину до 50 мкм [131].

Также примером может послужить опыт использования лопаток турбин, изготовленных из сплава ЖС6КП (жаропрочный сплав на никелевой основе), где обнаруживается наличие механических разупрочнений материала с последующим разрушением лопаток с защитным покрытием (алитирование) и без него. Повреждения определяются по наличию на поверхности характерных следов экструзии окислов. У лопаток, предварительно прошедших процесс алитирования, изменений в областях сильнонапряженных функциональных частей выявлено не было, но, однако, в более холодных сечениях образовывались сетки трещин в алитированном слое с одновременным снижением предела выносливости до 15% [131].

Далее, на примере металлографического исследования лопаток I ступени турбины (жаропрочный сплав на никелевой основе ЖС6КП), имевших эксплуатационную наработку до 1000 часов, определили наиболее нагруженную часть изделия, ею является центральная зона профильной части, а именно – входная кромка пера. В функциональной зоне лопатки, где температурные показатели близки к максимальным, происходит нагрев до температуры, способствующей уменьшению содержания алюминия и рекристаллизация поверхностного слоя лопатки. Здесь, между покрытием и основным металлом, формируется прослойка, содержащая фазу игольчатого типа, толщиной 100 – 150 мкм. Также прослеживается возникновение единичных микропор, которые скапливаются под алитированным слоем по границам основного материала. По мере наработки микропоры сливаются в микротрещины, после эксплуатации в течение более 2000 часов. Эти трещины развивались в основном материале, не выходя на поверхность лопатки [131].

Первоочередным этапом в ориентировании процесса поиска наиболее нагруженных по температуре зон должно быть изучение особенностей разрушения в процессе эксплуатации. Как наглядный пример следует рассмотреть зависимость, представленную на графике, отображенном на рисунке 1.1, где

возможно предположить наличие некоторой области, в которой температурные показатели приближены к максимально допустимым. На уровне функциональных частей, согласно графику (рисунок 1.3), следует рассматривать, например, входные и выходные кромки, а на уровне функциональных зон, например, срединную часть входных и выходных кромок (приложение А).

Сущность процесса разрушения и действия разрушающих факторов обусловлена геометрией лопаток ГТД при учёте воздействия на детали турбины газовых потоков (температуры, химических составляющих), а также воздействием элементов внешней среды, таких как пыль, пепел и т.п. Но главное, на что необходимо обратить внимание в данной работе – неоднородность возникающих

дефектов, например, появление зон локального перегрева на поверхности входной кромки пера лопаток [133].

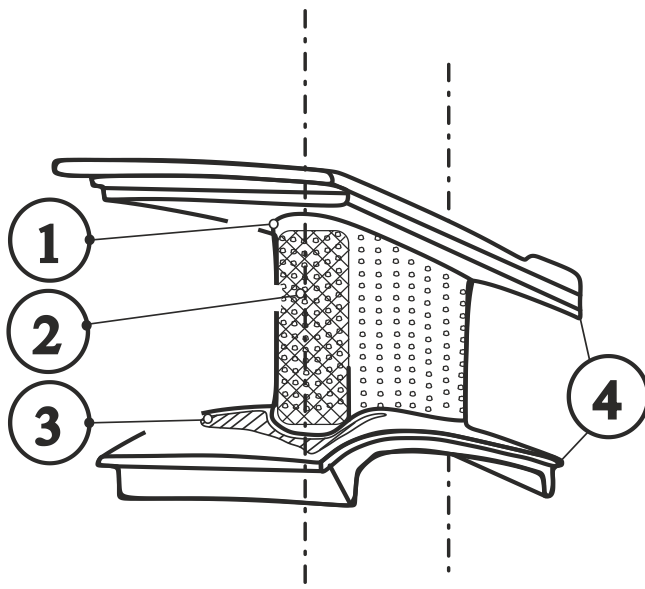


Рисунок 1.4. Модель повреждений защитного покрытия; 4 – полки (внутренняя и внешняя). Среди повреждений можно перечислить: наличие прогаров, трещин, необратимой деформации спинки и выходной кромки, закоксованность поверхностей функциональных частей [106].

Из изображения (рисунок 1.4) усматривается, что очаг разрушения деталей формируется не на всей поверхности, а имеет локальный характер, так как поверхность данной детали можно представить в виде той самой совокупности исполнительных элементов и зон [72]. Концентрация напряжения на каждую зону детали неодинакова и может изменяться по времени, по силе и в комплексе.

Что касается температуры, если рассмотреть модель распределения температуры по поверхности пера сопловой лопатки для данного случая, то также можно обнаружить локальные зоны максимальной нагрузки. Такая модель отображена на рисунке 1.5. Здесь на рисунке 1.5,а показана поверхность модели пера лопатки соплового аппарата со стороны корытца. Тут видно, что распределение температуры (от 1000°C до 1200°C) имеет неравномерный характер, и в основном высокие показатели ее находятся в зонах входной кромки, близлежащей зоне корытца к входной кромке и 90% высоты выходной кромки (зоны возле нее). На рисунке 1.5,б такая же неоднородность. Корытце в своей

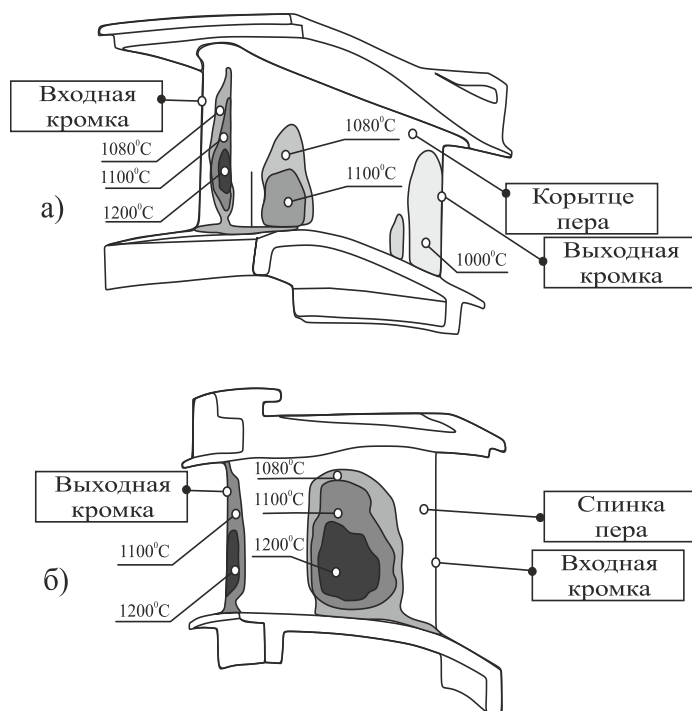


Рисунок 1.5. Модель сопловой лопатки с особенностями распределения теплового поля по поверхности пера

срединной части прогревается до 1200°C , а также 90% выходной кромки имеет высокие температурные показатели, что и приводит к появлению прогаров, трещин, необратимой деформации спинки и выходной кромки.

Следующим видом разрушения лопаток турбин может быть пример газоабразивной эрозии деталей газовоздушного тракта вертолётного двигателя типа ТВ2-117, которая возникает в процессе эксплуатации данных машин в условиях большой (повышенной)

запылённости. Так, например, при работе ГТД ТВ2-117 вертолёта МИ-8 на взлётном режиме над песчаной площадкой в каждый двигатель попадает около 3 кг. пыли в минуту. Примерная скорость движения частиц пыли, размер которых может быть от 5 мкм до 1 мм, достигает 450 м/с, это и приводит к возникновению газоабразивной эрозии [42].

Здесь в дополнение к высокотемпературному воздействию на функциональные элементы пера лопатки добавляется разрушающее воздействие, выражающееся в износе защитных покрытий, обусловленное попаданием частиц пыли (комплексное воздействие). Схемы движения данных частиц могут быть рассмотрены с позиции кинематики движения рабочих лопаток в ступени турбины. Т.е., учитывая наличие вращательного движения и центробежных сил,

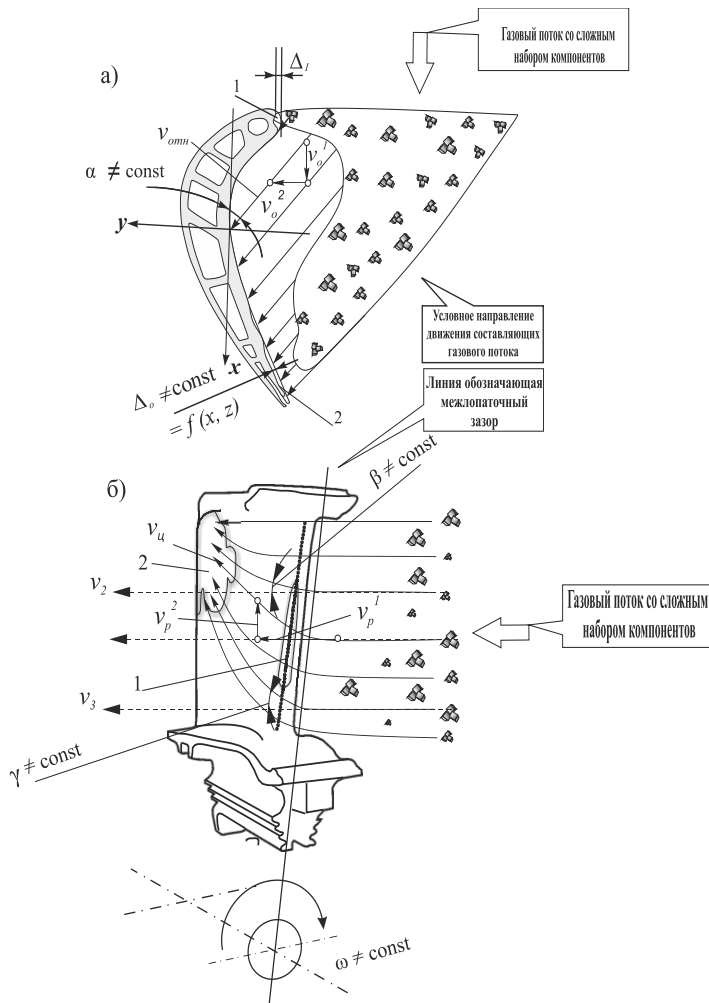


Рисунок 1.6. Схема возможного движения механических частиц газового потока в турбине

примера представлены на рисунке 1.6. Здесь обозначено: 1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; Δ_l – изменение размерности области разрушения входной кромки; Δ_o – изменение размерности области разрушения выходной кромки; V_o^1 – продольная скорость частиц при движении вдоль оси ротора; V_o^2 – поперечная скорость частиц при движении вдоль оси ротора; V_p^1 – скорость частиц при

концентрация частиц пыли будет формироваться на входной кромке первой ступени по всей ее поверхности на выходной кромке, вследствие сепарации, в ее верхней части, ближе к бандажной полке. С каждой последующей ступенью их распределение все больше будет стремиться к наружному радиусу рабочего диска. При этом углы встречи с поверхностями кромок и корытца для каждой частицы или капле расплава песка, прошедшего через пламя, исходящее из камеры сгорания, будут гипотетически различны. Поэтому будут возникать особенности воздействия на функциональные части пера лопатки и их зоны. Модели данного

движении вдоль оси ротора с радиальным отклонением; V_p^2 – поперечная скорость частиц при движении вдоль оси ротора с радиальным отклонением; ω – скорость вращения ротора; α – угол отклонения частиц от осевого направления; $\beta \neq \gamma$ – углы радиального отклонения частиц.

Параллельно необходимо рассмотреть схожую проблематику эксплуатации газотурбинных двигателей, которые применяются на наземной технике, а конкретно, ситуацию связанную с эксплуатацией ГТД-1000Т (модификации), танка Т-80. В жарких и пыльных условиях приходится принудительно снижать максимальную температуру газов (соответственно мощность двигателя) перед силовой турбиной на 40 – 50°C с целью исключения расплава и спекания пыли на лопатках турбины в области входных кромок и бандажных полок. Данная особенность возникает вследствие нивелирования поверхности защитных покрытий локальных зон функциональных частей пера лопатки турбины температурным и абразивным воздействием, а так как ухудшаются показатели шероховатости, происходит налипание расплавленных частиц песка. Это напрямую указывает на неравномерность термомеханического воздействия на перо лопатки [36].

Подобно данной проблеме, существуют особенности эксплуатации турбин газотурбинных установок нефтегазовой промышленности. Здесь лопатки испытывают химико-термические и абразивно-эрозионные разрушения, и также определяются неравномерности износа по перу лопатки и неравномерности по лопаткам разных ступеней турбины. Факторами, приводящими к износу и разрушению, являются температурные, абразивные и химические воздействия [18, 82, 91, 126].

Все приведённые примеры свидетельствуют, что разрушение тела детали происходит в определённой зависимости от условий эксплуатации, действий переменных эксплуатационных нагрузок, особой (сложной) геометрии пера лопатки, режимов работы двигателя и т.д. Это приводит к снижению работоспособности изделия, выходу его из строя, необходимости проведения преждевременных ремонтов или дорогостоящих плановых ремонтов с

невозможностью повторной эксплуатации (восстановления) используемых лопаток турбин.

Определив, что изучение особенностей разрушения лопаток турбин является одним из этапов создания синтеза технологического процесса на базе ФОТ, следует сконцентрировать внимание на вопросе причин формирования различий и особенностей разрушения их структуры, вида, иерархии и т.д.

В научных трудах, посвященных созданию основ синтеза ФОТ, предложенных профессором А.Н. Михайловым [72], описывается зависимость между функциональными воздействиями и их результатами. В данном случае это можно представить как действие множества эксплуатационных функций на поверхность функциональных элементов лопатки турбины двигателя, обуславливающих возникновение прерывных и непрерывных пространственно-временных преобразований структуры материалов, используемых в производстве лопаток в качестве основного сплава, а также материалов (композиций) защитного покрытия.

Теоретически на каждую поверхность воздействуют неравномерные нагрузки, каждая зона действия удельных нагрузок имеет определенные топологические параметры, при этом действующие функции имеют определенную структуру [73].

В свою очередь структура и, в общем, природа возникновения нагрузок, неравномерных на всём протяжении времени эксплуатации или равномерных в дискретном периоде, основывается на теории, позволяющей описать физические основы рабочего процесса, происходящего в лопаточной машине, процесса термодинамических и газодинамических преобразований.

Рассмотрение и изучение сущности возникновения, и течение газо-термодинамических процессов описывается во многих образцах специальной литературы [60, 61, 87, 122, 129].

Для вычисления значений действующих сил (эксплуатационных функций), возможно применение подходов, изложенных в [60, 87, 122, 125]. В данной теории существует определяющая особенность проведения расчётов воздействия

сил на поверхность лопатки турбин с учётом особенностей её строения, которая заложена в определённой степени в особенности процесса реализации ФОР, т.е. проведение расчётов при условии наличия геометрического неоднобразия форм функциональных частей, элементов, зон, на которых возникают разрушения.

Обобщая данные проведённого анализа можно отметить, что в процессе эксплуатации рабочие поверхности лопаток испытывают неравномерные нагрузки, приводящие к разрушениям, обусловленным действием сил и явлений, которые рассматриваются в [60, 61, 78, 87, 122, 129], а как особенностью возникающих разрушений, является формирование неравномерности по структуре, форме, масштабам и т.д.

Также можно сделать вывод, что именно разрушению поверхности лопаток турбин ГТД при их эксплуатации уделяется особое внимание, так как свойство поверхности (частей, элементов, зон и т.д.) определяет надёжность при эксплуатации турбины и двигателя в целом.

В продолжении можно рассмотреть более подробно особенности эксплуатации лопаток турбин и действующие на них эксплуатационные функции, а в качестве примера привести вертолетный газотурбинный двигатель ТВ3-117.

Лопатки турбин вертолетных ГТД в процессе эксплуатации работают в сложных условиях. Среди них: температурные воздействия, эрозионно-коррозионные воздействия, воздействия инородных тел, воздействия, возникающие вследствие действия сил инерции и т.д. Результатом эксплуатационных воздействий является интенсивное разрушение поверхности пера лопатки, а особенностью – неоднородность разрушений. Поэтому актуальность темы данного исследования вполне оправдана [126].

Условия работы лопаток данного типа двигателя сложные. Максимальная температура газа на входе в турбину компрессора ТВ3-117 может достигать 990°C, максимальная температура газа на выходе из этой турбины может достигать 650°C, средняя осевая скорость газа ≈ 165 м/с, средняя скорость вращения рота в среднем радиусе ≈ 342 м/с. Ко всему этому, в частности для вертолётных двигателей, необходимо прибавить наличие большой концентрации

механических элементов в виде пыли в газовой смеси (на взлётном режиме количество пыли размером от 3 мкм до 1 мм, попадающей в воздушный тракт,

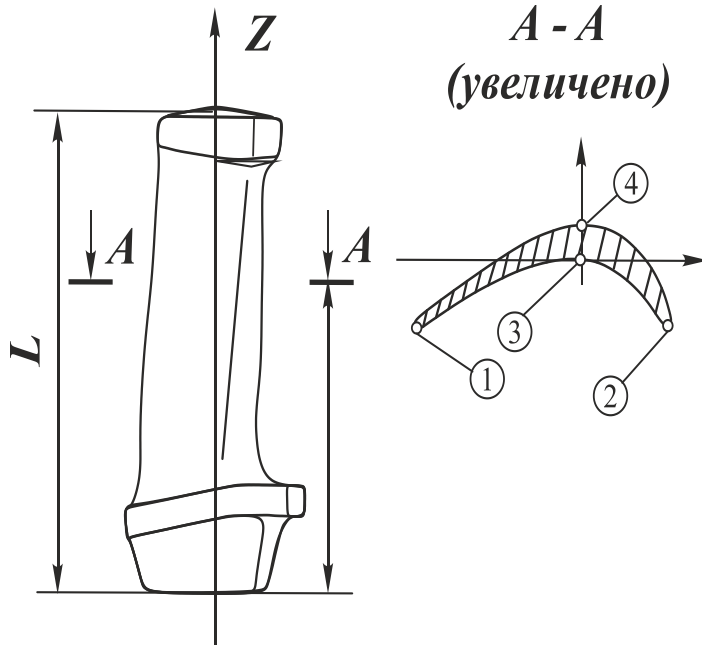


Рисунок 1.7. Общая модель лопатки 1-й ступени турбины компрессора ГТД ТВ3-117

структурные оси. Количество, в частности, рабочих лопаток в двух ступенях турбины компрессора двигателя ТВ3-117 более 200 штук. Особенностью конструкции рабочих и сопловых лопаток турбины компрессора является наличие тонкостенных входных и выходных кромок, изготавливаемых из жаропрочных сплавов на никелевой основе (ЖС6К, ХН77ТЮР и др.). Данные функциональные элементы пера лопаток турбины являются наиболее подверженными элементами к совместному воздействию высокой температуры и механических частиц.

Анализируя структуру и природу этих особенностей можно утверждать о наличии таких элементов, частей, зон лопаток турбин, в которых во время работы напряжение наиболее сконцентрировано, и в тоже время концентрация может распределяться по изделию и изменяться по времени, продолжительности воздействия и степени сложности. Основываясь на вышеизложенном, можно спрогнозировать и обобщённо перечислить особенности структуры разрушений лопаток ГТД, которые возникнут при эксплуатации, а именно:

составляет около 3 кг/мин.), что приводит к эрозионному разрушению.

Лопатка турбины вертолетного двигателя, отображенная на рисунке 1.7. в виде модели, - это сложная деталь с особым набором конструктивных особенностей, ориентированных на определённые способы и специфику применения. На данном рисунке обозначено: 1 – выходная кромка; 2 – входная кромка; 3 – корыто; 4 – спинка; x , y , z – главные

1. Неоднородность и неравномерность износа поверхности лопатки, обусловленные взаимодействием поверхности и газового потока, свойств материала лопатки, особенностей конструкции лопатки.

2. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленные взаимодействием сопряжённых элементов, частей, зон лопатки, испытывающих различные силовые воздействия.

3. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленные взаимодействием лопатки с сопряжёнными узлами (детальями) двигателя и технического состояния этих узлов.

4. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленные качеством производства (технология литья или выращивания, качество литниковых систем, качество стержня и др.).

5. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленные технологией повышения качества (применение редких металлов при изготовлении, применение различных видов энергетического воздействия, отделочно-упрочняющие технологии и др.).

6. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленные сложно структурированными процессами, протекающими в проточной части двигателя (описанными в теории, гипотетически предполагаемыми, неописанными в теории).

Причинно-следственная связь разрушений лопаток турбин ГТД с условиями эксплуатации (действующими эксплуатационными функциями) в определённой степени изучена и представлена в работах различных авторов [22, 44, 75, 122].

Анализ изученного позволяет сделать вывод, что основная эксплуатационная функция (совместное абразивно-эрозионное и температурное воздействие) обобщает в себе множество функций нижнего уровня эксплуатационного воздействия (множеств энергетических, технологических, пространственных и т.д.). Данные множества функций, которые с определённой особенностью оказывают прямое воздействие на лопатки ГТД, и являются

оператором, определяющим множество неоднородностей и особенностей структуры разрушения лопаток турбин.

Классификация основных эксплуатационных воздействий может быть представлена в виде схемы, изображённой на рисунке 1.8.

На данном рисунке перечислены следующие эксплуатационные воздействия:

1. Термические воздействия:

- стабильные;
- изменяющиеся;
- циклические.

2. Механические воздействия:

- пепел;
- сажа;
- песчаный абразив;
- другие.

3. Силовые воздействия:

- термодинамические;
- аэродинамические;
- инерционные;
- суммарные.

4. Комплексные воздействия:

- усиливающие воздействия;
- коррозионно-эрозионные воздействия;
- сложноструктурированные напряжения;
- другие виды воздействий.

Данные воздействия приводят к следующим основным разрушениям, которые возникают на функциональных элементах лопаток турбины (рисунок 1.8.):

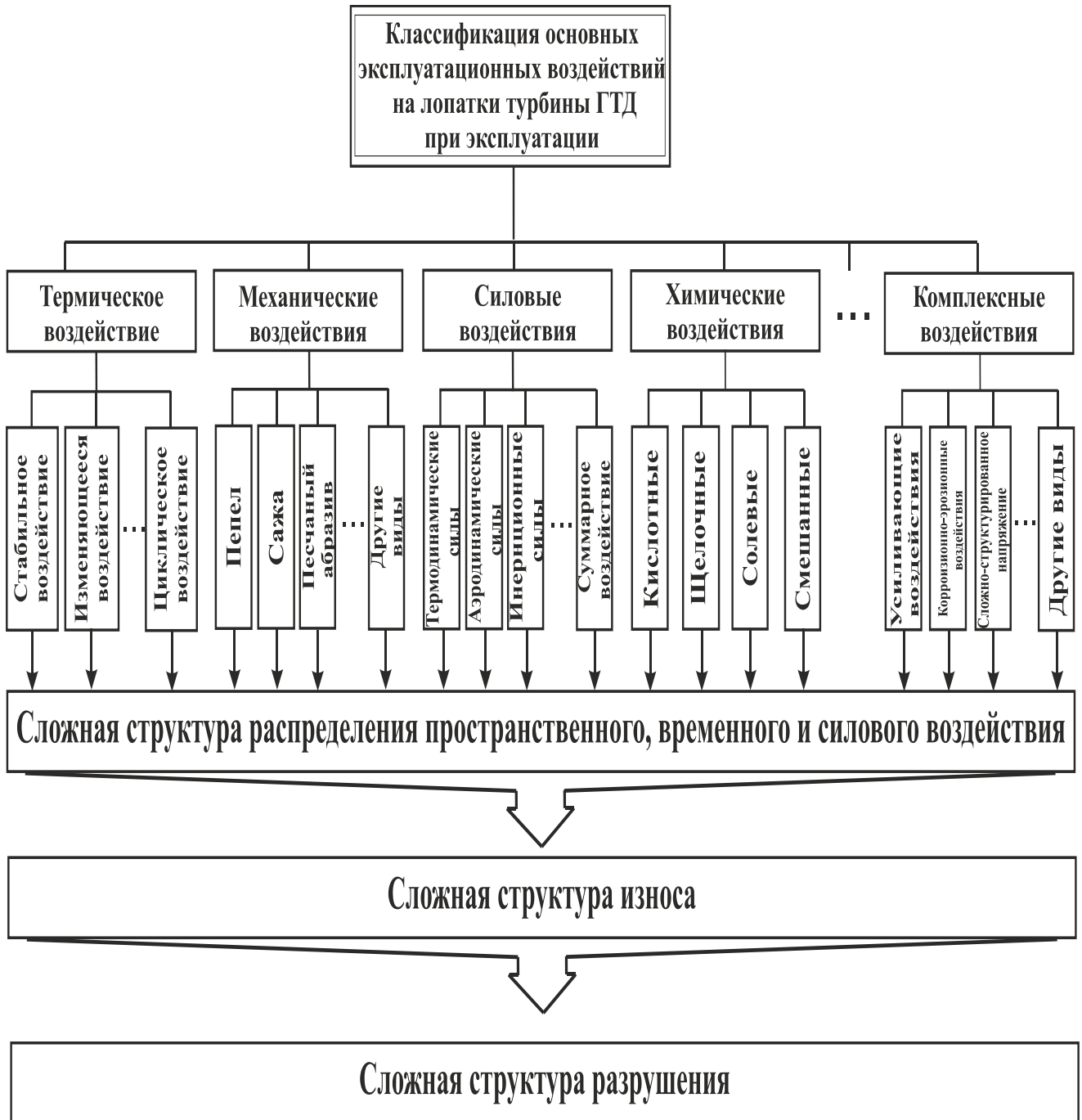


Рисунок 1.8. Классификация основных эксплуатационных воздействий действующих на лопатки турбин ГТД при эксплуатации

- повреждения от воздействия высоких температур (окисление, коррозия, прогары) на входной кромке пера лопатки, а именно в ее срединной (ниже срединной) части для рабочих лопаток и по всей высоте для сопловых лопаток;

- повреждения от воздействия высоких температур (окисление, коррозия, прогары, термонапряжение) на выходной кромке пера лопатки, а именно в ее верхней части, ближе к бандажной полке со стороны корыта (для рабочих лопаток) и по всей длине со стороны корыта и спинки по всей высоте (для сопловых лопаток);

- повреждения (изменение параметров), возникающие от воздействия механических частиц (царапины, вмятины, сколы, налипание) на входной кромке пера лопатки, а именно в ее срединной (ниже срединной) части для рабочих лопаток и по всей высоте для сопловых лопаток;

- повреждения (изменение параметров), возникающие от воздействия механических частиц (царапины, вмятины, сколы, налипание) на выходной кромке пера лопатки, а именно в ее верхней части, ближе к бандажной полке со стороны корыта (для рабочих лопаток) и по всей длине со стороны корыта и спинки по всей высоте (для сопловых лопаток);

- повреждения, возникающие от высокой теплопроводности применяемых защитных покрытий зонально в проекции воздействия температурного поля, для рабочих лопаток срединная часть входной кромки и верхняя часть выходной кромки;

- повреждения, возникающие от высокой теплопроводности применяемых защитных покрытий зонально в проекции воздействия температурного поля, для сопловых лопаток, это вся поверхность входной кромки и вся поверхность выходной кромки, также срединная часть спинки корыта.

1.2. Анализ существующих технологических методов, применяемых для повышения ресурса лопаток турбин

Сложность проектирования, производства, эксплуатации и обслуживания узлов и агрегатов техники была определена с момента разработки проекта газотурбинного двигателя [122].

В настоящее время промышленность развивается стремительными темпами, а вместе с этим и повышается степень требования к таким свойствам изделий как: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и т.д.[8].

В процессе эксплуатации техническое состояние лопаточного механизма турбины непрерывно изменяется под действием эксплуатационных функций, различных как по периоду действия, так и по структуре и ориентированию на поверхность детали. Такими функциями могут быть: большая температурная нагрузка и её возможные резкие перепады вследствие изменения режимов работы двигателя, возникновение вибраций, неравномерность распределения нагрузки по тракту всей турбины от сопряжённых узлов, воздействие химических элементов, механические повреждения от внутренних и внешних объектов и т.д.

Под действием разупрочняющих и разрушающих воздействий снижается степень готовности двигателя на уровне детали обеспечить выполнение заданных режимов работы, происходит ухудшение силовых характеристик вплоть до появления отказов.

Рабочие лопатки турбин современных ГТД изготавливаются в основном из сплавов на никелевой основе, обладающих необходимой жаропрочностью и жаростойкостью, длительной прочностью, а также достаточной пластичностью, высокой теплопроводностью и малыми коэффициентами линейного расширения. К ним относятся ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХН70МВТЮБ (ЭИ598), ХН70ВМТЮ (ЭИ617), ХН62МВКЮ (ЭИ867), ЖС6К, ЖС6У, ЖС6КП, ХН55ВМТКЮ (ЭИ929) и др. [44].

Параллельно разрабатывают новые сплавы на молибденовой, ниобиевой основе, а также металлокерамика и системы охлаждения, позволяющие работать лопаткам при температуре 1600 К и более [57].

Выбор марки сплава для изготовления лопаток турбин, указанных в таблице 1.1, зависит от рабочей температуры газа в турбине газотурбинного двигателя, с учетом особенностей эксплуатации каждого вида техники [57].

Таблица 1.1

Рабочая температура лопаток, °С	Марка сплава
600...800	ЭИ437А, ЭИ437Б
800...900	ЭИ598, ЭИ896
900...950	ЭИ867, ЭП109
950...1050	ЖС6-К
1200 и более	ЖС26, ЖС 30, ЖС 32 и др.

Данные направления, т.е. непосредственно изготовление детали и системы охлаждения в диссертационном исследовании не рассматриваются, поскольку главное изучение направлено на создание технологического процесса восстановления лопаток после эксплуатации и нанесения защитных ФОП.

С целью повышения ресурса лопаток турбин, наряду с применением жаропрочных сплавов и систем охлаждения при их изготовлении, в современном машиностроении применяются перспективные технологии – это технологии нанесения защитных покрытий.

Необходимость применения таких технологий вызвана возникновением на поверхности деталей, под действием эксплуатационных функций микротрещин, эрозионных повреждений, сколов, окислений, снижением концентрации защитных элементов, возникновением пор, проявлением газовой коррозии и т.д. [57].

Согласно изложенной научной мысли в «Производство газотурбинных двигателей» под редакцией Крымова В.В., защитное покрытие должно удовлетворять нескольким основным требованиям [57]:

1. Высокая жаростойкость в конкретных условиях воздействия газовой среды. Это требование удовлетворяется способностью материала покрытия к образованию тонкой защитной оксидной пленки с хорошей адгезией к металлу и минимальной диффузионной проницаемостью.

2. Высокая фазовая и структурная стабильность защитного покрытия. Покрытие должно обладать низкой скоростью диффузионного взаимодействия с защищенным материалом, быть достаточно инертным, стабильным по толщине в течение всего срока его эксплуатации.

3. Достаточные прочность, вязкость и пластичность слоя покрытия, предотвращающие возможность преждевременного разрушения под действием термомеханических циклических нагрузок.

4. Хорошая технологичность, возможность защиты деталей сложной конфигурации и т.д.

Изучены, опробованы и приняты для использования различные способы нанесения защитных покрытий, такие как порошковый, шликерный (метод окраски), ионно-плазменный, электронно-лучевой, катодным распылением, лазерным осаждением [57], детонационный и др.

Порошковый метод алитирования алюминием относится к диффузионному методу нанесения защитных покрытий. Алюминиевый слой, наносимый на поверхность детали с концентрацией 30 – 50% с присадкой смеси хлоридов, придаёт жаропрочные свойства поверхности лопатки и предохраняет от возникновения интеркристаллитного окисления. Проведённые исследования воздействия эксплуатационных функций на лопатки, изготовленные из жаропрочного сплава ЖС6К с предварительной термической обработкой показали, что термостойкость алитированных лопаток составляет 1050 °С при условии возможности нанесения таких покрытий в труднодоступные места (отверстия, щели, полости) [1, 57, 118]. Наряду с рассмотренным методом существует дополнительно метод «доалитирования», позволяющий сократить цикл ремонта в 4 раза и сохранить материальную часть турбины [124].

К основным недостаткам порошкового метода следует отнести сложность и трудоемкость изготовления порошковых смесей, необходимость нагрева лопаток вместе с порошками до высоких температур, сложность защиты поверхностей, не требующих нанесения покрытий, вредность при работе с мелкодисперсионными порошковыми смесями. К недостаткам или к особенностям применения данных видов покрытий изучаемым в свете данного исследования нужно отнести так же традиционность применения данного способа, т.е. свойства придаются всей детали (поверхности), без учета особенностей воздействий эксплуатационных функций.

Следующий метод нанесения защитных покрытий, который можно рассмотреть – шликерный метод, он же диффузионный метод окраски. При данном методе предполагается использование порошковой суспензии из алюминия и связующего элемента. Алитирование методом окраски (шликерный метод) включает в себя приготовление суспензии из порошка алюминия и связующего, нанесение ее на поверхность пера и диффузионный отжиг. В качестве связующего используется нитроклетчатка, которая растворяется в смеси амилацетата с диэтилоксалатом, в пропорции 3:1, и наносится на поверхность пера лопатки методом распыления под давлением. При глубине алитированного слоя до 50 мкм прочность и пластичность не снижается, а сопротивление термической усталости возрастает на 30 %.

Или, например, для создания хромоалюминидного покрытия шликерным методом применяется суспензия коллоксилина в амилацетате с диэтилоксалатом и взвесь алюминия (Al — 680 г/л), кремния (Si — 114 г/л) и хрома (Cr — 139 г/л). Размерность частиц веществ и их пропорции обеспечивают равномерность поверхностного слоя, появление диффузионного барьера для тугоплавких элементов сплава, снижение концентрации анионных вакансий в оксидной пленке алюминия, снижение степени проницаемости для кислорода [1, 10, 49]. Здесь также просматривается процесс придания свойства всей поверхности детали без прецизионного изучения особенностей разрушения.

Более перспективный метод нанесения защитных покрытий – метод применения вакуумно-плазменной технологии. С помощью оборудования, созданного для обеспечения данного технологического процесса, возможно осуществить нанесение металлических и неметаллических (комбинированных) покрытий при достижении высокой точности поверхностного слоя в частях лопатки, требующих защиты от факторов разрушения.

Технология основывается на создании плазменного потока с энергией частиц $10...10^2$ эВ с последующей фокусировкой этого потока и конденсацией применяемого покрытия на обрабатываемую поверхность. В данном способе обеспечивается возможность нанесения покрытий на детали с профилями любых сложностей и без предварительного разогрева, с предварительным ионным травлением обрабатываемой детали. Состав плазменных покрытий может быть различен в зависимости от придаваемой изделию степени качества (нитриды, карбиды и т.д.) [57, 114].

Далее, в работе [114] предлагается осуществлять ионно-имплантационную обработку поверхности ионами Yb , Y , N . Алгоритм последовательного нанесения защитного жаростойкого слоя состоит из ионно-плазменной очистки поверхности, ионно-имплантационного легирования (ионы Yb , Y , N), формирования внутреннего (Cr – от 18 % до 30 %, Al – от 5 до 13 %, Y – от 0,2 до 0,65 %, Ni – остальное) и внешнего (Si – от 4,0 до 12,0 %; Y – от 1,0 до 2,0 %; Al – остальное) жаростойкого слоя. Перспектива повышения степени качества в данном случае, как заявлено автором, достигается чередованием материала защитных слоёв и имплантацией с образованием субмикро – или нано – слоёв. В результате проведённых технологических процессов нанесения покрытия достигнута величина условного предела выносливости (σ_{-1}) образцов, которая равна 260 – 290 МПа, и повышение изотермической жаропрочности [113, 114].

Значительный вклад в создание технологий повышения качества лопаток турбин ГТД достигается принципиальными подходами в применение методов нанесения газотермических покрытий. Данный метод заключается в повышении

степени адгезии наносимых плазменных покрытий с основным металлом путём наклепа поверхности перед нанесением на него защитного покрытия [64].

Также существует циркуляционный способ получения диффузионных многокомпонентных покрытий из газовой фазы, которые соответствуют свойствам конденсационного и диффузионного методов. Для этого разработаны комбинированные конденсационно-диффузионные покрытия, содержащие тугоплавкие барьерные элементы (тантал, рений, вольфрам), тормозящие диффузию атомов на границе со сплавом [95].

Долговечность лопаток турбин можно увеличить также путём последовательного насыщения деталей хромом и алюминием, которое позволяет увеличить содержание хрома в поверхностном слое, значительно повысить качество покрытия и тем самым повысить его срок службы. Процесс диффузионного хромирования деталей осуществляют в газовой среде, формирующейся при нагреве гранул хрома 60...98%, сплава ($Ni80-Y20$) 1...35% и хлорида никеля 1...5%. Применение указанного состава позволяет проводить хромирование при температуре 1000°C и выше с последующим алитированием при температуре 900°C и выше [95].

Для повышения вязкости и пластичности покрытия проводят термическую обработку при температуре закалки сплавов в течение, например, 1 – 2 ч. При этом получают структуру покрытия, состоящую из фаз $\beta - NiAl$ и $\gamma - Ni3Al$. Способ позволяет на 30...50% увеличить термостойкость лопаток и стабильность поверхностного слоя лопаток газовых турбин [95]. Рассмотренные выше методы описываются в [3, 5, 9, 91, 100, 108].

Следующий применяемый метод – детонационное напыление. Это технология нанесения покрытий, в которой для разогрева и разгона порошкообразного материала покрытия используется энергия газового взрыва.

Энергия взрыва нагревает и разгоняет частицы порошка по направлению к обрабатываемой детали и вбивает расплавленные частицы в поверхность, обеспечивая равномерную и плотную структуру покрытия, приближающуюся по свойствам к монолитным материалам. Во время выстрела скорость частиц

превышает скорость звука, достигая (в зависимости от состава газовой смеси) от 420 м/с до 1300 м/с и более, а температура доходит до точек плавления материала порошков и основы (1500...2500°С). Среди достоинств данного метода можно выделить высокую степень адгезии наносимого материала и основного металла, минимальные показатели степени шероховатости и возможность применения для нанесения защитных покрытий широкого спектра материалов (металл, керамика, полимеры и т.д.) [11].

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.

Данное диссертационное исследование предлагает другой подход в построении технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин ГТД и ориентируется на выполнение следующих действий:

- определение закономерности между особенностями разрушения и действующим на лопатку турбины совместным абразивно-эрозионным и температурным воздействием с высоким уровнем прецизионности;
- определение закономерности между уровнем «глубины технологии» и методом реализации технологических воздействий при повышении качественных свойств лопаток турбин ГТД;
- определение связей между вариантами технологических воздействий направленных на придание лопаткам ГТД проектируемой степени качества и особыми принципами ориентации технологических воздействий;
- разработка рекомендации по созданию ФОТ при обработке лопаток ГТД, применяя специальные покрытия с целью повышения ресурса.

1.3. Цель и основные задачи работы

Таким образом, анализ особенностей разрушения лопаток турбин и существующих технологических методов для повышения их ресурса позволили сделать следующие выводы:

1. Основным фактором, обуславливающим наличие износа рабочих поверхностей пера лопаток турбины, приводящим к частичному или полному разрушению защитных покрытий (поверхностей) функциональных частей, является совместное абразивно-эрозионное и температурное воздействие. Термостойкость и жаростойкость материалов применяемых покрытий не в полной мере обеспечивает защиту от совместных эксплуатационных воздействий. Также вследствие наличия в газовом потоке механических частиц, которые в зависимости от режимов полета могут иметь различную концентрацию, будет возникать эрозионный износ, изменяющийся по поверхности пера (возможны изменения в зависимости от номера ступени турбины). В отдельных случаях возможно возникновение налипания расплава частиц песка на входные кромки соплового аппарата и кромки рабочих лопаток в зонах повышенного износа (температурного воздействия), такая особенность характерна для лопаток турбин наземной техники.

Сложная комбинация функциональных воздействий, состоящих из перечисленных факторов, приводит к возникновению на поверхности неравномерного износа, который в процессе эксплуатации приводит к дальнейшим более критическим повреждениям (прогары, трещины, обрывы, уменьшение в связи с налипанием межлопаточных зазоров и т.д.).

2. 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.

В связи с этим в данном исследовании предлагается разработать синтез ТП ОУО лопаток турбин (турбины компрессора) для защиты поверхности ее пера от совместного температурного и механического воздействия. Также предлагается разработать метод восстановления пера лопатки турбины для придания ей новых эксплуатационных свойств.

Основным направлением в разработке методов и способов будет построение структуры технологического процесса (выбор наборов или комплексов технологических операций), направленной на обеспечение соответствующих характеристик поверхностей функциональных частей пера лопатки турбины ГТД.

Еще одним направлением будет внедрение в структуру процесса, операций повышения ресурса лопаток турбин, бывших в эксплуатации, а именно технологических операций подготовки поверхностей функциональных частей содержащих зоны с остатками покрытия. Здесь сложность и трудоемкость определяется особенностями, которые связаны с характеристиками твердости различных материалов.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационного исследования заключается в создании типового технологического процесса 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 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 технологического процесса 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 технологического процесса, направленного на обеспечение ФОС лопаток турбин, работающих в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Внедрить результаты исследования в производство.

РАЗДЕЛ 2

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

2.1. Общие положения

Лопатки турбин газотурбинных двигателей – это детали, которые имеют множество особенностей и сложностей, как при создании и реализации процесса

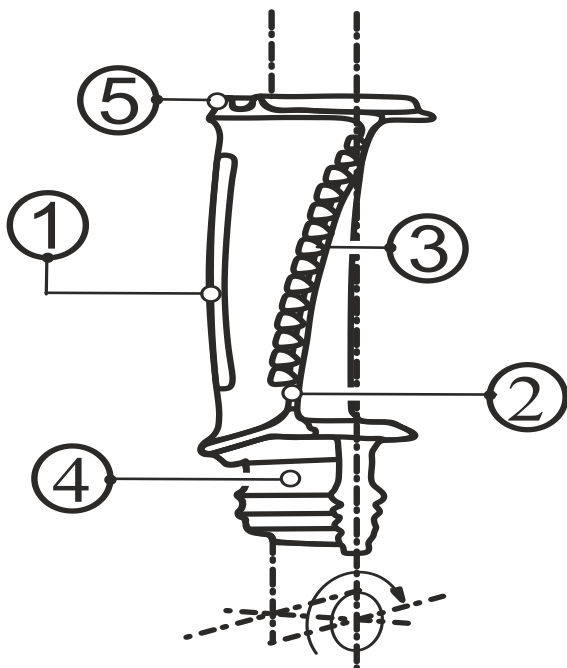


Рисунок 2.1. Общая модель рабочей лопатки турбины

изготовления, так и процесса эксплуатации. Это связано с тем, что данные детали играют важнейшую роль в реализации цикла ГТД, на их создание, использование и восстановление тратится огромный ресурсный потенциал. Имея довольно сложную пространственную геометрию, лопаткам турбин приходится выполнять свою непосредственную функцию в условиях высоких температур, высокого давления, инерционных напряжений, воздействий механических и химических составляющих газового потока в рабочем

тракте. Лопатка турбины в виде общей модели отображена на рисунке 2.1, где цифрами указано: 1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – элементы системы охлаждения (оборудуются по требованиям условий эксплуатации); 4 – замковая часть (хвостовик); 5 – бандажная полка (оборудуется по требованиям

условий эксплуатации). Данные детали для различных видов техники (силовых установок) в своем роде имеют различные (особые) пространственно-геометрические формы, но в общем, как деталь имеют определенный набор функциональных частей.

Лопатки соплового аппарата турбин состоят в большинстве случаев из пера, системы охлаждения (определяется техническими требованиями), и двух концевых полок (внутренняя, наружная). Сопловые лопатки турбин газотурбинных двигателей могут быть лопатками отдельными, лопатками в

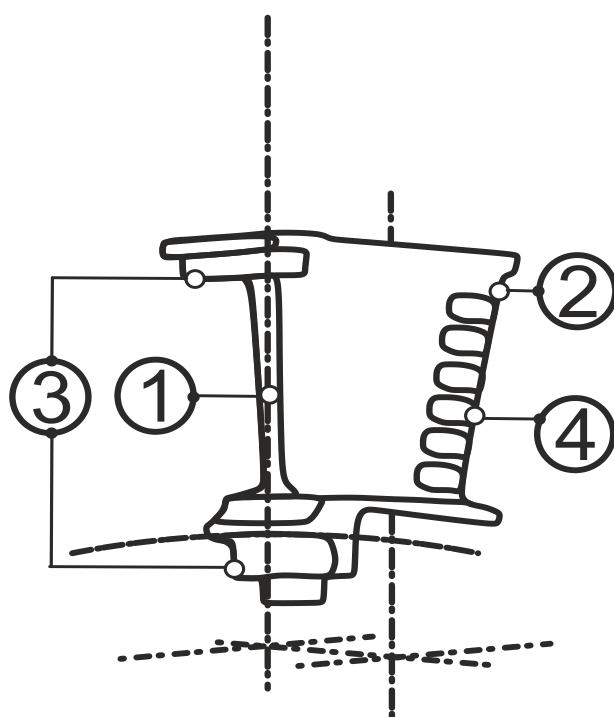


Рисунок 2.2. Общая модель сопловой лопатки турбины

секторах, лопатками в цельных рабочих колесах. Общая модель отдельной сопловой лопатки отображена на рисунке 2.2, здесь цифрами обозначено: 1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – наружная и внутренняя полки; 4 – элементы системы охлаждения (оборудуются по требованиям условий эксплуатации).

Каждая из функциональных частей лопаток имеет определенные основные функциональные элементы, например, перо лопатки состоит из входной кромки, выходной кромки, корытца и спинки (наличие системы охлаждения определяется техническими требованиями). Каждый функциональный элемент имеет особенности пространственно-геометрических форм, например, тонкие стенки корытца и спинки при наличии системы охлаждения и тонкие входные и выходные кромки. В связи с этим, для изготовления лопаток турбин, работающих в сложных условиях, применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе и др. Для повышения эксплуатационных свойств лопаток дополнительно применяются защитные покрытия и системы охлаждения.

Далее, опираясь на исследования особенностей разрушения лопаток турбин, проведенные в данной работе, сделан вывод, что, несмотря на применяемые технологии при их изготовлении и повышении ресурса, при эксплуатации некоторые поверхности пера лопатки приобретают повреждения в виде локальных зон с частичным износом покрытий, полным износом и даже повреждением основного сплава тела пера лопатки.

Основные действующие эксплуатационные функции, приводящие к разрушениям, это высокая температура газового потока и наличие механических частиц воздействующие совместно.

Результаты и особенности воздействия эксплуатационных функций выражаются в разрушении срединной и ниже срединной части входной кромки рабочих лопаток (для сопловых лопаток турбины компрессора, например, всей поверхности входной кромки). Также происходит разрушение верхней части выходной кромки рабочих лопаток турбин (для сопловых лопаток разрушение и износ происходит по всей высоте выходной кромки: и со стороны корыта, и со

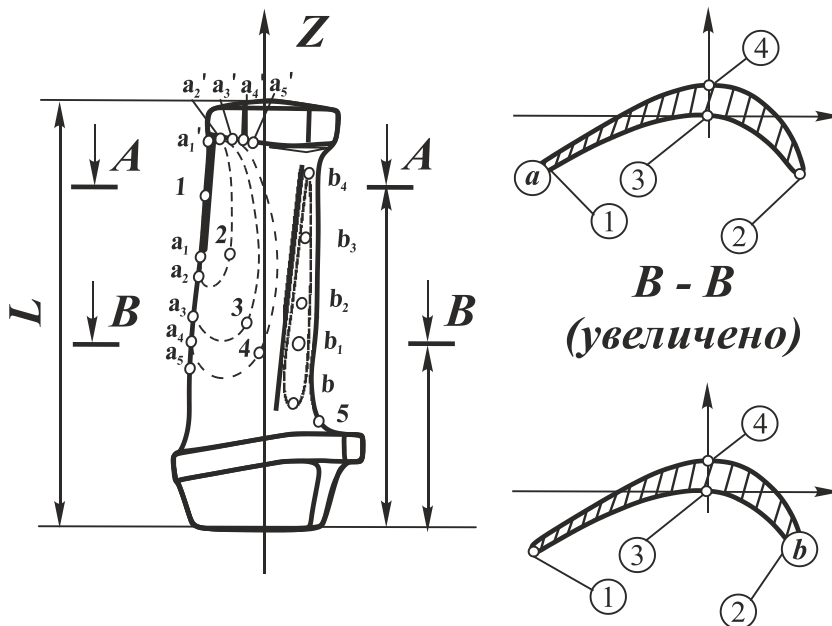


Рисунок 2.3. Общая модель лопатки турбины с особенностями разрушения

сторонами спинки) вследствие совместного термомеханического воздействия.

В продолжение можно отметить следующее. Полученные данные из проведенного исследования особенностей разрушения лопаток турбин (рисунок 2.3.) позволяют сделать вывод, что для каждого типа ГТД характерны особые (индивидуальные) условия

эксплуатации, и для повышения ресурса с применением функционально-ориентированного подхода можно прецизионно или особо прецизионно изучить данные условия. Для реализации создания метода повышения ресурса предлагается использовать общую упрощенную модель (рисунок 2.3.) рабочей лопатки турбины с набором основных функциональных частей.

Общая модель такой лопатки на данном рисунке отображает особенности износа (зоны износа отображены на основании проведенного анализа особенностей разрушения). Модель представлена в проекции наиболее удобной для восприятия возможных особенностей разрушения. Здесь, на рисунке 2.3. обозначено: 1 – выходная кромка; 2 – входная кромка; 3 – корытце пера; 4 – спинка пера; 5 – бандажная полка; 6 – хвостовик; $a, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_1', a_2', a_3', a_4', a_5'$ – границы износа в зоне a ; b, b_1, b_2, b_3, b_4 – границы износа в зоне b .

В связи с вышеизложенным, в данном исследовании будет изучаться вопрос синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбин газотурбинного двигателя, направленного на повышение ресурса функциональных частей только пера лопаток турбин за счет нанесения защитных ФОП.

В последующем будет определен принцип повышения ресурса лопаток турбин и выполнен синтез метода повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода. Завершающим этапом данного раздела будет разработка способов повышения ресурса лопаток турбины и составлена общая структурная схема исследования.

Методология, которая используется в данной части работы для реализации графического отображения и последующего логического описания процесса, рассматривается в работах [14, 15, 19, 41].

2.2. Классификация функционально-ориентированных покрытий

Работа по созданию метода повышения ресурса лопаток турбин объединяет в себе множество действий, необходимых для синтеза процесса, направленного на создание условий, способных сориентировать технологов в выборе (создании) верной (правильной) технологии, способной повысить ресурс изделия. Возможность осуществления качественного синтеза технологий, применимых для повышения ресурса деталей, во многом определяется наличием разнообразных и разноуровневых составляющих как материальных, так и интеллектуальных, и энергетических. Множество таких составляющих позволит расширено

оперировать логикой выбора способов и методов при создании технологии.

Таковыми составляющими являются различные теории, наблюдения, исследования, мнения, выводы, факты, факторы, аспекты или же классификации, например, классификация основных эксплуатационных воздействий, или ориентированная классификация лопаток турбин (приложение Б), классификация основных методов, применяемых для повышения качества лопаток и т.д. Общее множество таких

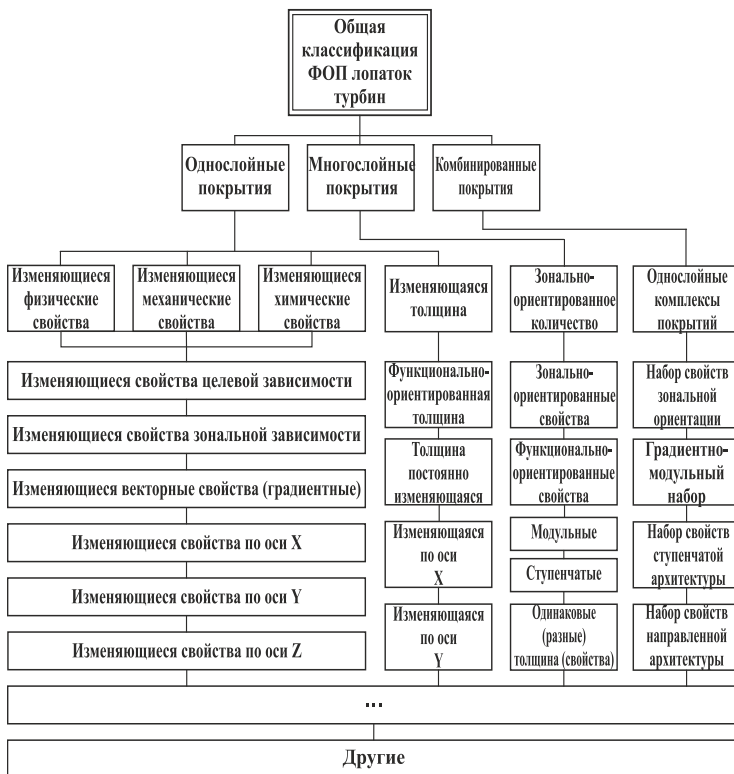


Рисунок 2.4. Общая классификация ФООП лопаток турбин.

информационно-аналитических (интеллектуальных) источников разумно дополняет общая классификация ФООП лопаток турбин (рисунок 2.4).

Вариант классификации ФОП выполнен следующим образом:

- однослойные покрытия;
- многослойные покрытия;
- комбинированные покрытия.

Однослойные ФОП – это покрытия с изменяемой толщиной и изменяемыми физическими, химическими и механическими свойствами. При этом, однослойные покрытия с изменяющимися свойствами могут иметь различную пространственную (функциональную) ориентацию:

- изменяющиеся свойства целевой зависимости;
- изменяющиеся свойства зональной зависимости;
- изменяющиеся векторные свойства (градиентные);
- изменяющиеся свойства по осям координат x , y , z ;
- другие свойства.

Для обеспечения разноуровневой равноэффективной защиты (ОРРЗ) лопаток турбин, в связи наличием неравномерности износа функциональных элементов, можно применять однослойные покрытия изменяющейся толщины. Однослойные покрытия изменяющейся толщины могут иметь следующие свойства:

- функционально-ориентированная толщина;
- толщина постоянно изменяющаяся (выбор оптимального количества размеров слоев или слоя);
- толщина, изменяющаяся по оси x ;
- толщина, изменяющаяся по оси y ;
- и другие.

Для повышения ресурса лопаток турбин в условиях действия совместной термомеханической нагрузки могут применяться многослойные покрытия, имеющие следующие характеристики:

- зонально-ориентированное количество слоев покрытия;
- зонально-ориентированные функциональные свойства (характеристики) ФОП;

- функционально-ориентированные свойства (характеристики) покрытия;
- модульные функционально-ориентированные свойства (характеристики);
- ступенчатые функционально-ориентированные свойства (характеристики);
- одинаковые (разные) функционально-ориентированные свойства (характеристики) или/и толщина;
- другие возможные свойства.

Комбинированные покрытия для повышения ресурса лопаток турбин применимы при наличии условий сложноструктурированных эксплуатационных нагрузок и могут иметь следующие структуры:

- однослойные комплексы (комплексы, состоящие из множества различных слоев одного свойства);
- покрытия с набором свойств зональной ориентации;
- покрытия с градиентно-модульным набором функционально-ориентированных свойств (характеристик);
- покрытия с набором функционально-ориентированных свойств (характеристик) ступенчатой архитектуры;
- покрытия с набором функционально-ориентированных свойств (характеристик) направленной архитектуры;
- другие возможные свойства.

Учитывая сформированную общую классификацию ФОП, перед технологами остается выбор, какое покрытие наиболее применимое в любом рассматриваемом примере разрушения (износа) лопаток турбин ГТД. В этом случае точное изучение особенностей эксплуатации, материалов из которых изготовлена лопатка, установленных ресурсных показателей эксплуатации детали, возможностей технологического обеспечения, особенностей технологии восстановления и нанесения защитных покрытий и т.д., позволит осуществить синтез технологического процесса, направленного на повышение ресурса лопаток турбин.

Можно рассмотреть некоторые модели ФОП лопаток турбин, которые могут быть нанесены на поверхности, подверженные сложному разрушению,

например, с помощью ионно-плазменного или детонационного напыления. Такие

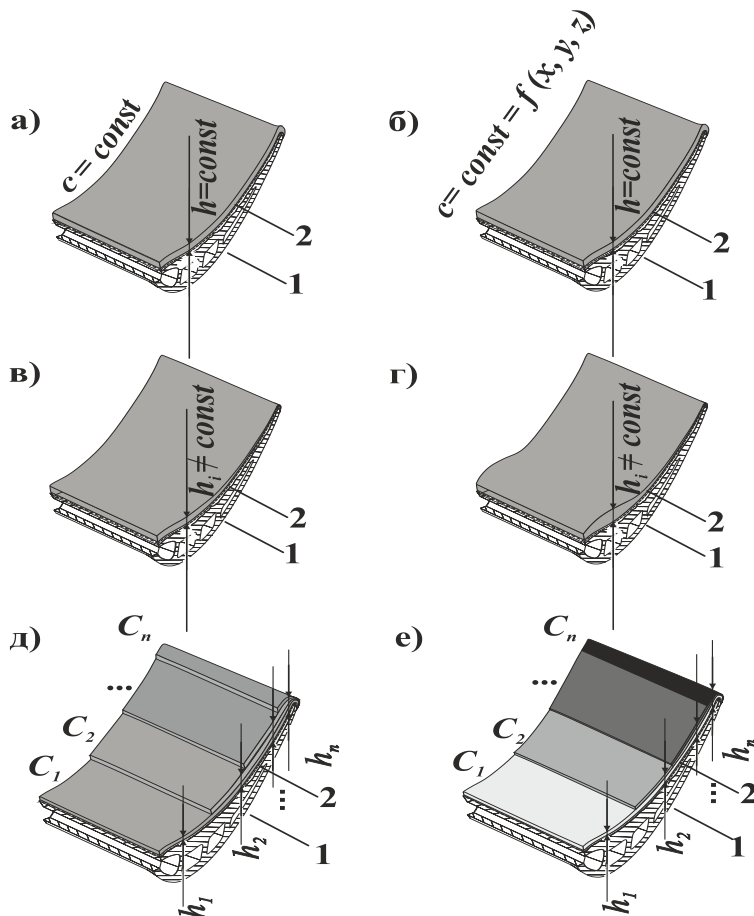


Рисунок 2.5. Модели ФОП лопаток турбин, где: а – однослойное покрытие с постоянными толщиной и свойствами; б – однослойное покрытие постоянной толщины и переменными свойствами; в – однослойное покрытие равномерно переменной толщины и постоянными свойствами; г – однослойное покрытие неравномерно изменяющейся толщины и с постоянными свойствами; д – зонально-многослойное покрытие со слоями одинаковой толщины (свойствами); е – зонально-многослойное (многомодульное) покрытие со слоями неодинаковой толщины (свойствами).

покрытия могут иметь вид, как это показано на рисунке 2.5. Здесь: рисунок 2.5,а – однослойное покрытие постоянных толщины и свойств; рисунок 2.5,б – однослойное покрытие постоянной толщины и с переменными свойствами; рисунок 2.5,в – однослойное покрытие переменно-изменяющейся толщины и с постоянными свойствами; рис. 2.5,г – однослойное покрытие постоянно-изменяющейся толщины и с постоянными свойствами; рис. 2.5,д – зонально-многослойное покрытие со слоями одинаковой толщины; рис. 2.5,е – зонально-многослойное покрытие со слоями неодинаковой толщины, 1 – фрагмент пера лопатки; 2 – повреждение элемента пера лопатки; C, C_1, C_2, \dots, C_n – слои покрытия; h, h_1, h_2, \dots, h_n – толщина покрытия.

Таким образом, имея информационный ресурс в виде составленной классификации

ФОП (рисунок 2.4), можно обеспечить выполнение одного из промежуточных этапов синтеза.

Способами нанесения ФОП для лопаток турбин могут быть электронно-лучевой метод испарения с последующей конденсацией материалов покрытия в вакууме, плазменное напыление, ионно-плазменное напыление, детонационное напыление [1, 11, 12, 44, 49, 118] и др.

В данной работе предлагается рассмотреть в качестве основного метода нанесения защитного покрытия – ионно-плазменное напыление. Данный вид технологии является в настоящее время достаточно перспективным и технологичным, работы по данному направлению велись в [12].

Представленная на рисунке 2.6 модернизированная установка для нанесения ионно-плазменных ФОП сконструирована и разработана на базе системы ННВ 6.6.-И1. по методу конденсации материала покрытия из плазменной фазы в

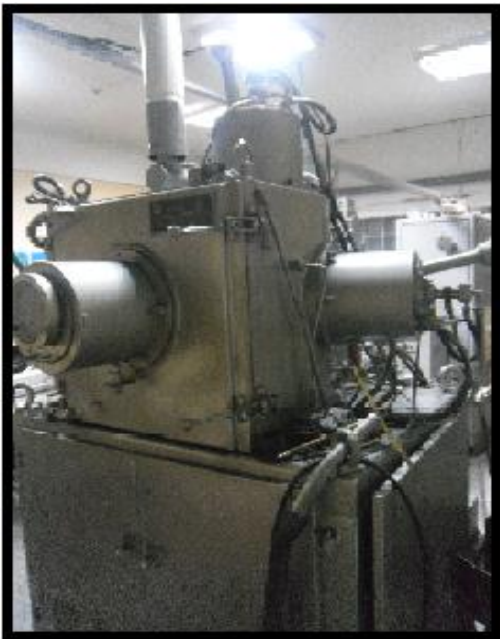


Рисунок. 2.6. Установка ННВ 6.6.-И1

вакууме с ионной бомбардировкой поверхности обрабатываемой детали. Аналогичное название данного метода, это метод КИБ – катодно-ионной бомбардировки. В перечень возможностей данной установки при проектировании и конструировании заложена возможность нанесения покрытий на большой ряд различных видов деталей машиностроения.

Характеристиками ННВ 6.6.- И1 являются:

- размеры камеры установки – 600 x 650

мм (тип камеры - вакуумная);

- количество испарителей – 3 шт.;

- скорость нанесения слоя покрытия – от

10 до 40 мкм/ч;

- время технологического цикла – до 2,5 часа.

Работа данной установки реализуется за счет сформированного плазменного потока, состоящего из микрочастиц и частиц материала (комплексов

материалов), используемого в качестве покрытия. Подводимый электрический ток к катодам, изготовленным из специальных материалов, создает дуговой разряд в вакуумной камере установки между анодом, который по сути, и есть лопатка турбины закрепленная в вспомогательном устройстве приводимом в движение с помощью электромотора и редуктора. Это позволяет базировать деталь в потоке плазмы без прекращения процесса нанесения покрытия. За счет технической возможности, позволяющей регулировать интенсивность и ширину плазменного потока, осуществляется регуляция равномерности нанесения защитного покрытия [12].

Аналогично можно предположить вариант решения вопроса повышения ресурса лопаток турбин с применением способа детонационного напыления. Детонационное напыление – это процесс нанесения защитных покрытий путём разогрева и разгона порошкообразного материала (смеси) энергией взрыва газа. Процесс имеет управляемую последовательность детонаций, что является основой для формирования структуры и размерности покрытий. Инициирование взрыва газовой смеси происходит за счёт искры на свече, поступающий в камеру сгорания газ мгновенно воспламеняется, разогревает и разгоняет подаваемый в ствол пушки дозированный порошок. Разогретая порошковая смесь разгоняется по стволу по направлению к обрабатываемой детали и вбивает сформировавшиеся частицы в поверхность, при этом формируется плотная структура покрытия.

Во время детонации скорость частиц превышает скорость звука, достигая (в зависимости от состава газовой смеси) от 420 м/с до 1300 м/с и более, а температура доходит до точек плавления материала порошков и основы – 1500...4000 °С. При столкновении расплавленного материала происходит ударное прессование на молекулярном уровне и порошок прочно соединяется с поверхностью детали. Необходимая толщина покрытия формируется продолжительностью последовательных детонаций [11].

Достоинствами данного покрытия являются: низкая пористость покрытия, высокая прочность связи с основой обрабатываемой детали, незначительное термическое воздействие, позволяющее избегать нежелательных

термонапряжений и коробления даже тонкостенных деталей сложной конструкции [12].

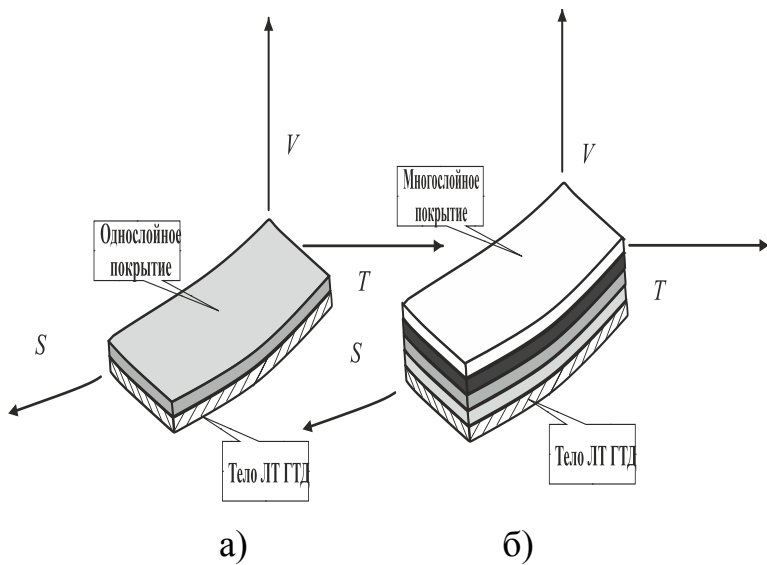


Рисунок 2.7. Структурные схемы покрытий для лопаток турбин: а) покрытие типа EEH ,

в виде нескольких типов, как например, однослойное EEH – покрытие наносится как единовременно-единовременное непрерывное и многослойное, $EEП$ – покрытие наносится как единовременно-единовременное прерывное. Имеется ввиду, что слой покрытия на функциональную часть (зону) напыляется в направлении s и t единовременно, а в направлении v непрерывно в случае EEH , а в случае $EEП$ в направлении s и t единовременно, а в направлении v прерывисто [72].

Математическое отображение процесса нанесения однослойного покрытия может, в общем, иметь вид [41, 53, 72, 76]

$$V_0 \rightarrow \bigwedge_{v=1}^{\infty} \left\{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), \left(\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v \right) \right\}, \quad (2.1)$$

где V_0 – объем однослойного покрытия;

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

В продолжении следует отметить, что одним из ключевых шагов в алгоритме создания способа повышения ресурса лопаток турбин является создание гипотетических (базовых) вариантов структурных схем ФОР. Такие варианты структурных схем покрытий отображены на рисунке 2.7.

Покрытия предполагаются

связующего покрытия для увеличения адгезионных свойств различных материалов, модуля температурозащитных жаростойких покрытий, модуля абразивно-эрозионных жаростойких покрытий и т.д. Задача такой структуры выполнить принцип ОРРЗ, ориентируясь на все виды воздействий в комплексе. Защиту от диффундирования элементов между материалами, разгара защитного покрытия с последующим разрушением, защиту покрытия от разрушения при воздействии на него механических частиц, химических элементов топлива и т.д.

Такой подход должен обеспечить в целом равномерность износа защитного покрытия по всей поверхности пера лопатки. Далее можно рассмотреть математическое отображение процесса нанесения модульного покрытия в виде технологических воздействий реализуемых в режиме *ННП* – непрерывно-непрерывно прерывисто. Обеспечение свойств объемов каждого модуля происходит непрерывно в направлении s , непрерывно в направлении t и прерывно в направлении v или окрестности объемной точки. Данное математическое отображение может быть представлено в виде [41, 53, 72, 76].

$$V_M \rightarrow \bigvee_{v=1}^r \bigwedge_{t=1}^{\infty} \bigwedge_{s=1}^{\infty} \{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), (dl_s \times dl_t \times dl_v) \}, \quad (2.3)$$

где V_M – объем модульного покрытия;

r – число модулей различных покрытий ($r = 1, 2, 3, \dots, n$);

\vee – дизъюнкция процесса напыления модуля в направлении v ,

\wedge – конъюнкция процесса напыления модуля в направлении v ,

При нанесении каждого модуля толщина будет формироваться с учетом функциональных характеристик наносимого покрытия в проекции воздействия эксплуатационной функции на зону поверхности пера лопатки турбины.

Следует обратить внимание на то, что исследование направлено на повышение ресурса лопаток турбин непосредственно также за счёт улучшения технологии обработки деталей, а именно улучшения свойств поверхностного слоя лопатки турбины, применяя для этого специальные (комбинированные) покрытия и технологическое обеспечение. При этом технологические методы и производственные процессы изготовления непосредственно самих лопаток

(штамповка, литьё и т.д.), которые в достаточной мере рассматриваются в научных работах [57, 60, 61, 99, 122, 131] и применяются в данное время для массового производства указанных изделий, в данной работе не затрагиваются.

2.3. Разработка общего принципа, повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода

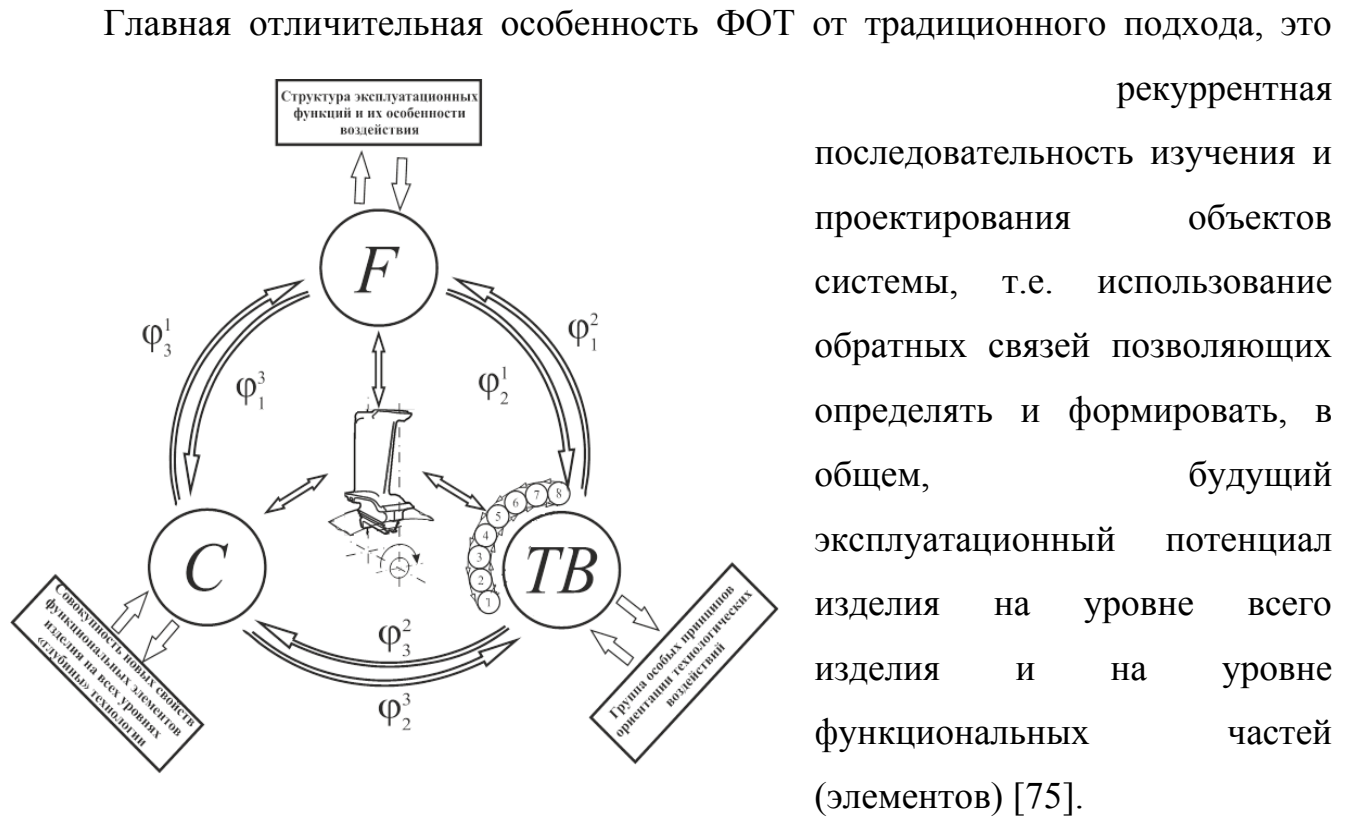


Рисунок 2.9. Модель технологического процесса поддерживаемого связями взаимодействия φ_i^j между объектами системы.

представлен в виде модели предложенной на рисунке 2.9. где: F – эксплуатационные функции; TB – технологические воздействия; C – свойства

Технологический процесс, имеющий замкнутую форму реализации, может быть

детали; 1...8 – группа особых принципов ориентации технологических воздействий.

Таким образом, можно сделать вывод, что ФОР позволят создать процесс повышения ресурса лопаток турбины на глубоко структурированном уровне изделия, ориентированный исключительно на придание тех специальных свойств изделию, которые необходимы для выполнения своих функций, при работе в совместном абразивно-эрозионном и температурном воздействии. При этом преобразование изделия в заготовку должно опираться на особые принципы ориентации технологических воздействий [72].

Для придания лопаткам турбин качественно новых свойств на базе ФОР применяется множество методов, например, метода нанесения детонационного покрытия [11, 86], метод нанесения ионно-плазменного покрытия [12, 76] и использования соответствующего технологического обеспечения. Для реализации этих методов в работе предлагается рассмотреть процесс подготовки детали, процесс формирования защитного ФОР, процесс нанесения покрытия и чистовой обработки поверхностей с покрытием (без него) на базе принципа ОРРЗ. Выполнить это необходимо для получения именно ФОР и формирования

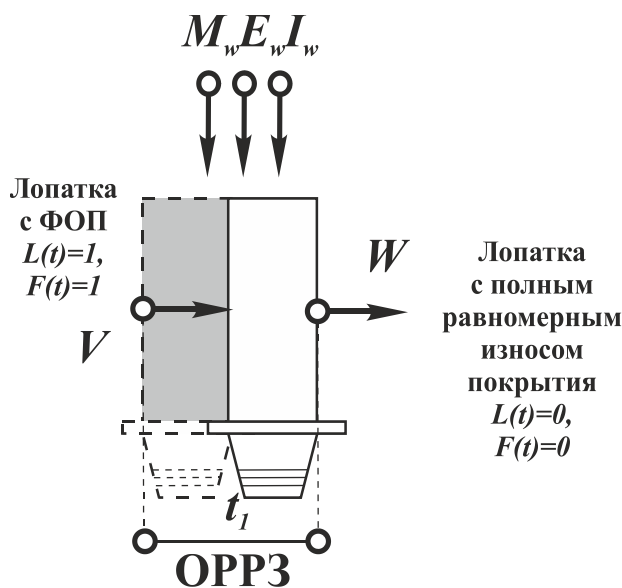


Рисунок 2.10. Модель реализации принципа ОРРЗ

соответствующего технологического обеспечения.

Рисунок 2.10. представляет собой визуальное отображение модели процесса, использующего принцип ОРРЗ. На данном рисунке обозначен входной поток V (начало эксплуатации лопатки с ФОР), выходной поток W (лопатки без покрытия) указывает на то, что защитное ФОР имеет полный, равномерный по всей поверхности пера износ, без повреждения тела пера лопатки на протяжении эксплуатационного ресурса t .

Совместные эксплуатационные воздействия могут гипотетически выражаться в виде потоков материи M_W , энергии E_W и информации I_W [130].

Принцип ОРРЗ применим в двух направлениях общего подхода повышения ресурса лопаток турбин, во-первых, это обеспечение соответствия свойств покрытия во всех зонах одной общей поверхности пера лопатки. Во-вторых – снижение затрат ресурсов на трудоемкую подготовку поверхностей пера лопаток перед нанесением нового покрытия.

Схематично процессы эксплуатации и восстановления лопаток турбин можно отобразить в трех последовательностях, рисунок 2.11.

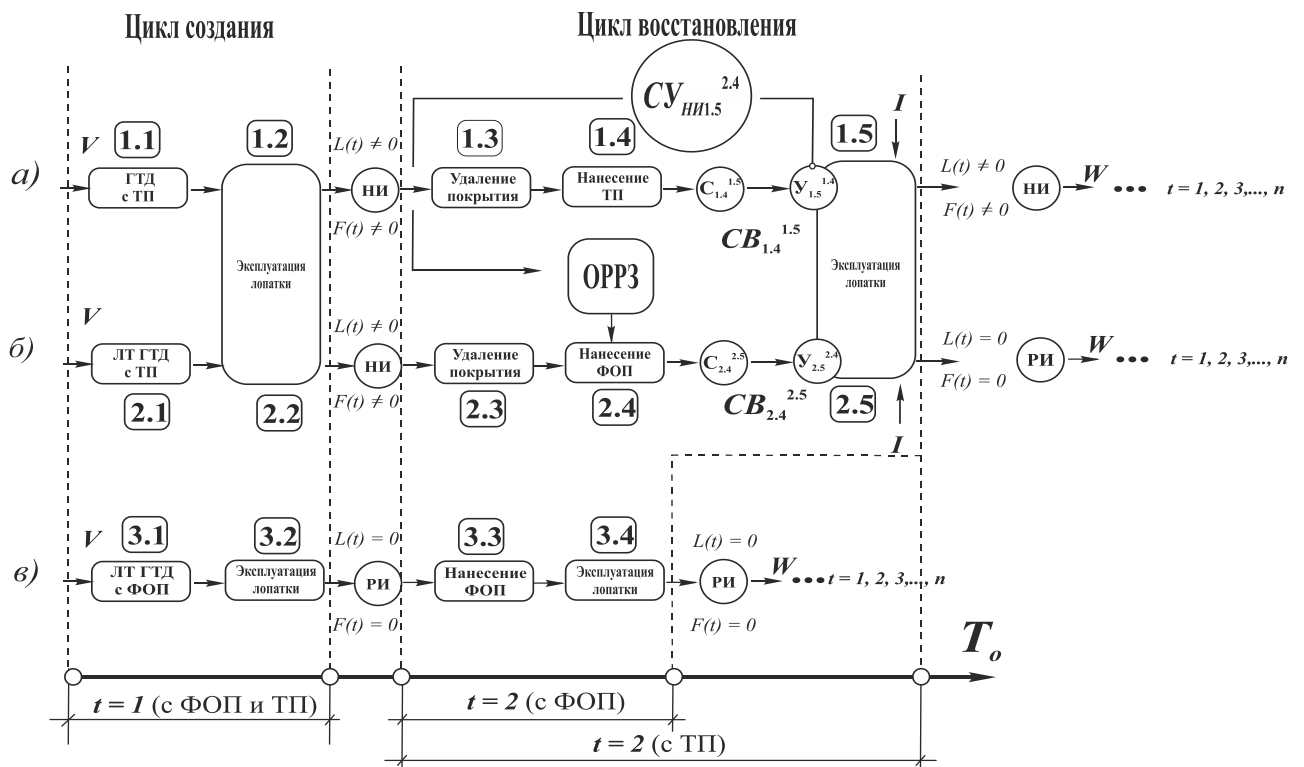


Рисунок 2.11. Варианты структур процессов эксплуатации лопаток турбин

На рисунке 2.11 показаны схемы таких процессов, а именно: 2.11,а – процесс эксплуатации и восстановления лопатки с защитным покрытием, наносимым по общим принципам; 2.11,б – процесс эксплуатации лопаток с защитным покрытием, наносимым по общим принципам, далее восстановление с нанесением ФОП; 2.11,в – процесс эксплуатации лопаток с нанесенным ФОП перед началом первого цикла эксплуатации: V – входной поток, W – выходной поток, I – информационный ресурс анализа эксплуатации; T_o – общее время

работы лопатки с покрытием (износ покрытия), t – условный цикл, $t = 1, 2, 3, \dots, n$.
 Здесь также указано: *НИ* – неравномерный износ; *РИ* – равномерный износ; *ТП* – традиционное покрытие; *ФОП* – функционально-ориентированное покрытие; *ОРРЗ* – принцип обеспечения разноуровневой равноэффективной защиты; $СУ_{НИ.5}^{2.4}$ – связь управления процессом повышения ресурса объекта; $СВ_{1.4}^{1.5}$, $СВ_{2.5}^{2.4}$ – связи взаимодействия при обеспечении целевой функции; $С_{1.4}^{1.5}$, $С_{2.5}^{2.4}$ – свойства лопатки (покрытия) обеспечивающие выполнение технических функций, $У_{1.4}^{1.5}$, $У_{2.4}^{2.5}$ – условия эксплуатации; *ЛТ ГТД* – лопатка турбины газотурбинного двигателя.

Каждый из трех вариантов процессов эксплуатации лопатки турбины имеет несколько условных жизненных циклов, это циклы создания и восстановления (повышения ресурса). Каждый условный цикл состоит из нескольких частей, в цикл создания включено производство и использование в качестве детали машины (системы), а в цикл восстановления включено обслуживание (ремонт, восстановление, замена и т.д.) и использование в качестве детали машины (системы). Если в каждом цикле реализуется принцип ОРРЗ и наносится ФОП, то после каждого расчетного времени эксплуатации лопаток ресурс защитного покрытия, характеризующийся, в общем, толщиной $L \neq const$ и свойствами $F \neq const$, будет иметь нулевые показатели ($L(t) = 0$, $F(t) = 0$). В случае применения покрытий, наносимых традиционным подходом, время (период, цикл) работы (эксплуатации) лопатки с покрытием $t = 0$, а показатели $L(t) \neq 0$, $F(t) \neq 0$, т.е. в определенных зонах поверхности пера лопатки будет сохраняться часть покрытия, имеющая определенные показатели по свойствам и толщине.

На рисунке 2.11,а показана схема использования лопаток турбин с покрытием, наносимым традиционным методом. В результате эксплуатации установленный ресурс времени исчерпан, а ресурс покрытия в некоторых зонах поверхности остается, не израсходован, т.е. например, для свойств покрытия можно использовать следующее выражение

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) \neq 0 \quad (2.4.)$$

где $\lim_{t \rightarrow 0} F(t)$ – предел функции, где t стремится к нулю;

t – жизненный цикл (время от начала использования до начала восстановления);

$t = 1, 2, 3, \dots, n$.

Для толщины покрытия можно использовать следующее выражение,

$$\lim_{t \rightarrow 0} L(t) \neq 0 \quad (2.5.)$$

где $\lim_{t \rightarrow 0} L(t)$ – предел функции, где t стремится к нулю;

t – жизненный цикл (время от начала использования до начала восстановления);

$t = 1, 2, 3, \dots, n$.

На рисунке 2.11,б показана схема использования лопаток турбин с покрытием, наносимым традиционным методом и нанесение покрытия ФОП во втором части цикла. В первом цикле ресурсы L и F имеют неравенство нулю как отображено в выражениях 2.4 и 2.5, но после применения ФОП показатели ресурса можно описать следующими выражениями:

- для ресурса свойств

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad (2.6.)$$

где $\lim_{t \rightarrow 0} F(t)$ – предел функции, где t стремится к нулю;

t – жизненный цикл (время от начала использования до начала восстановления);

$t = 1, 2, 3, \dots, n$;

- для ресурса толщины

$$\lim_{t \rightarrow 0} L(t) = 0 \quad (2.7.)$$

где $\lim_{t \rightarrow 0} L(t)$ – предел функции, где t стремится к нулю;

t – жизненный цикл (время от начала использования до начала восстановления);

$t = 1, 2, 3, \dots, n$;

На схеме, отображенной на рисунке 2.11,в предполагается постоянное применение ФОП. Т.е. здесь ресурс всегда отображается выражениями 2.6 и 2.7. Это может быть основой для вывода, что процесс использования защитных ФОП с первого жизненного цикла лопаток турбин $t = 1$ позволяет повысить

технологичность процесса, снизить трудоемкость, снизить материальные затраты, время и т.д.

Дополнительно необходимо учитывать, что в схемах 2.11,а и 2.11,б при подготовке поверхностей пера лопаток, прошедших первую стадию, необходимо перед нанесением защитного покрытия повторно произвести подготовку поверхности при наличии на них не только повреждений основного сплава пера лопатки, но и произвести съём оставшихся слоев (слоя) защитного покрытия.

Особенностью данного съема (выполировки) покрытия является необходимость обработки поверхности на которой базируются свойства двух различных по твердости материалов. В случае проведения полировки поверхности, сила нажима по площади пятна контакта полировальника и поверхности практически равнозначна, поэтому на поверхности, где микротвердость имеет меньшие по степени значения, будет возникать чрезмерная выполировка, повышаться волнистость, будут различные температурные показатели из-за различий по степени нажима. По окончании процесса выполировки различных материалов, характеристики реальной поверхности будут иметь большие отличия.

Чтобы исключить данную проблему, необходимо выбрать определённую технологическую операцию, которая позволит обеспечить пропорциональность свойств поверхности, состоящей из различных материалов. Такими операциями могут быть полирование методом направленного воздействия или применение функционально-ориентированного полировального инструмента, где концентрация воздействия и процесс абразивного резания, за счет пространственной ориентации полировального инструмента или использования его технических характеристик, направлена, в большей степени на материал оставшегося на поверхности пера лопатки защитного покрытия.

В случае использования третьей схемы, отображенной на рисунке 2.11,в выполнение технологических операций, связанных с обработкой поверхности с комплексной микротвердостью, исключается, т.к. покрытие, нанесенное на

поверхность по принципу ОРЗ на протяжении времени одного эксплуатационного цикла t , имеет полный равномерный износ.

Далее на рисунке 2.12 представлена схема, которая раскрывает структуру технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин,



Рисунок 2.12. Основные стадии и комплексы операций обработки или восстановления лопатки турбины

описывающего первые части циклов создания и восстановления. Здесь рассматривается процесс подготовки поверхности лопатки (основного металла, покрытия, модуля покрытия, слоя покрытия и т.д.) к нанесению первого (последующего) слоя покрытия.

Такой процесс может быть разделен на несколько стадий с комплексом технологических операций (КТО), а именно:

1-я стадия с КТО – набор операций по подготовке поверхности к нанесению защитного покрытия;

2-я стадия с КТО – набор операций по выполнению процесса нанесения покрытия на поверхности пера лопатки турбины;

3-я стадия с КТО – набор операций, направленных на обработку поверхностей с нанесенными покрытиями.

В 1-ой стадии перечень технологических операций ориентируется на начальные условия, связанные с характеристиками лопатки (новая лопатка, лопатка после эксплуатации, состояние поверхности, характеристики сплава лопатки, характеристика материалов покрытия и т.д.), и может формироваться в следующем объеме:

- химическая обработка поверхности с покрытием (рыхление, травление и др.) или ионное травление в камере ионно-плазменной установки с последующей механической обработкой абразивным резанием (шлифование, полирование с направленным воздействием или ориентированным инструментом);

- полирование поверхности покрытия (предварительное, окончательное).

На 2-ой стадии перечень технологических операций непосредственно нанесения защитного покрытия ориентируется на эксплуатационные условия лопатки (тип турбины, количество ступеней, температура на входе, наличие системы охлаждения и т.д.) и может формироваться в следующем объеме:

- напыление покрытия традиционным подходом (однослойное, многослойное);

- напыление ФОП (однослойное, многослойное, модульное и др.).

В 3-й стадии перечень технологических операций ориентируется на свойства поверхности покрытия и может включать в себя операции полирования (глянцевания) или без обработки.

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что применение принципа ОРРЗ в технологическом процессе повышения ресурса

реализует поставленную цель путем нанесения защитного покрытия, увеличивающего количество циклов восстановления детали и исключая трудоемкие операции по выполировке оставшегося после эксплуатации покрытия.

2.4. Синтез метода повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода

Синтез метода, как антипод анализа, будет выполнен в виде избирательно подобранных блоков данных или действий (шагов, циклов, вариантов, стадий, частей, технологических операций и т.д.) для выбора решения, способа, построения структуры технологического процесса и алгоритма его реализации на информационном пространстве изученной проблематики.



Рисунок 2.13. Модель синтеза

частей, технологических операций и т.д.) для выбора решения, способа, построения структуры технологического процесса и алгоритма его реализации на информационном пространстве изученной проблематики.

Визуально модель синтеза можно представить, как это показано на рисунке 2.13.

На данном рисунке указаны основные объекты модели:

1. Определение действующих эксплуатационных воздействий F .

2. Деление лопатки турбины на функциональные элементы, части, зоны ($\Phi Э$).

3. Составление требуемого набора специальных (перспективных) свойств C .

Для указания связей взаимодействия между

объектами синтеза, посредством которых обеспечивается соответствие свойств или выполнение действий, на рисунке 2.13 используется соответствующее обозначение f_i^j - связь между составляющими синтеза (i – оператор, j – операнд).

Используя модель, представленную на рисунке 2.13, можно провести исследование подхода в создании методики обеспечения специальных свойств лопаткам турбины.

С этой целью необходимо использовать последовательность выполнения определенных стадий технологического процесса нанесения защитного покрытия традиционного или ФОП, которая изображена на рисунке 2.14, где обозначено: V

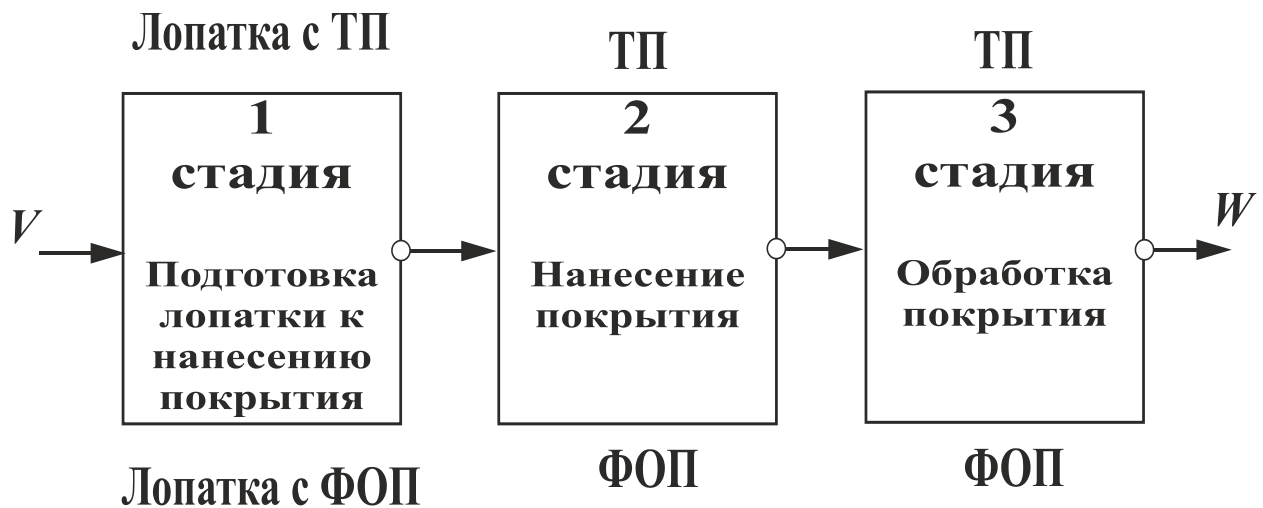


Рисунок 2.14. Последовательность выполнения стадий процесса обработки детали

– входной поток деталей; W – выходной поток деталей с покрытием; $ТП$ – традиционное защитное покрытие; $ФОП$ – функционально-ориентированное покрытие.

Последовательность состоит из:

- 1-й стадии с набором операций по подготовке поверхности к нанесению защитного покрытия;
- 2-й стадии с набором операций по выполнению процесса нанесения покрытия на поверхности пера лопатки турбины;

– 3-й стадии с набором операций, направленных на обработку поверхностей с нанесенными покрытиями.

Во второй стадии выполняется нанесение защитных покрытий на лопатки, бывшие в эксплуатации, как с традиционным покрытием, так и с функционально-ориентированным покрытием. На данной стадии может продолжаться напыление покрытий, наносимых традиционными способами, но цель данного исследования связана со стремлением повысить ресурс деталей, поэтому в качестве рекомендаций предлагается использовать именно функционально-ориентированные покрытия на всех циклах T_o .

Нанесение защитного ФОП на лопатки турбины происходит в двух вариантах:

- восстановление лопаток с покрытием, наносимым по традиционным технологиям с последующим нанесением ФОП (последующее восстановление с ФОП);

- нанесение ФОП на новую лопатку турбины (последующее восстановление с ФОП).

Синтез метода будет осуществляться оперируя множеством (комплексом) технологических операций, подбираемых исходя из множества аналитических данных проведенных исследований особенностей разрушения, информации о свойствах и структуре поверхностей функциональных частей лопаток, данных об эффективности методов отделочной обработки.

$$I_0 = \{ i_1, i_2, i_3, \dots, i_j, \dots, i_N \}, \quad (2.8)$$

где I_0 - общее множество аналитических данных об эффективности технологических операций;

i_j - база данных об эффективности элементарной технологической операции;

N - массив данных о возможных методах отделочной обработки с наборами различных элементарных технологических операций.

В ходе синтезирования технологического процесса будет осуществляться формирование набора (подмножества) технологических операций, применимых (потенциально эффективных) для данного (любого возможного) технического задания по повышению ресурса.

Такой процесс методически правильно решать с применением морфологического синтеза [130], где будет осуществляться анализ всех существующих (применимых для данного технического задания) вариантов технологических воздействий и последующий выбор из данного подмножества наиболее применимых по совокупности их характеристик.

Структура синтеза метода будет иметь вид (рисунок 2.15):

1. Анализ проблематики, выбор цели создания процесса, подбор структурных элементов, составление технического задания.

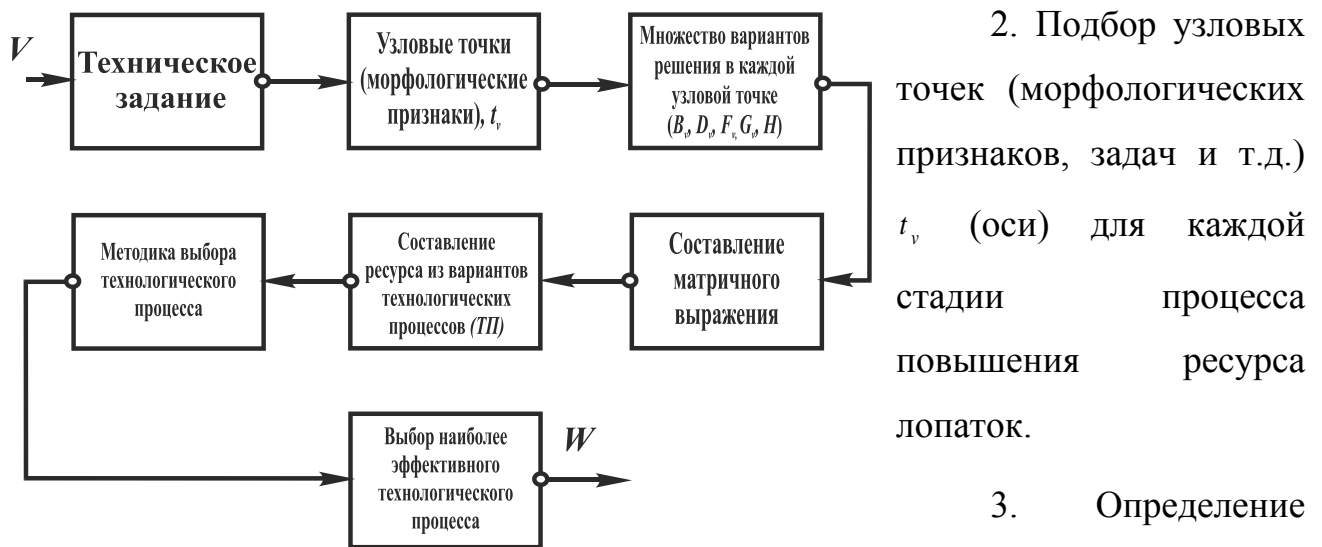


Рисунок 2.15. Структура синтеза метода выбора наиболее эффективного технологического процесса

2. Подбор узловых точек (морфологических признаков, задач и т.д.) t_v (оси) для каждой стадии процесса повышения ресурса лопаток.

3. Определение перечня возможных множеств вариантов решения для каждой узловой точки (морфологических признаков, задач, и т.д.) $(B_v, D_v, F_v, G_v, H_v)$ по осям для каждой стадии процесса повышения ресурса лопаток.

4. Составление математической модели в виде матричного выражения.

5. Работа с составлением ресурса вариантов технологических процессов (решений) (ТП).

6. Метод выбора технологического процесса.

7. Выявление продуктивных комбинаций, выбор эффективной (рациональной) структуры процесса повышения ресурса лопаток.

Подбор узловых точек (морфологических признаков, задач и т.д.) t_v производится по осям матричной модели с аналитическим выявлением групп продуктивных операций схожих по целевому предназначению мощностями $(B_v, D_v, F_v, G_v, H_v)$.

2.5. Разработка способа повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода

Рассматривая процесс повышения ресурса лопаток турбин, а именно качества поверхностного слоя с помощью нанесения защитных покрытий, следует учитывать тот факт, что в каждую точку поверхности (пространства) преобразуемого изделия должно быть реализовано требуемое технологическое воздействие с необходимыми параметрами потоков материи, энергии и информации (M, E, I) . При этом параметры M, E, I выбираются и определяются в зависимости от действующих в данных точках эксплуатационных функций и перечня свойств, позволяющих определять и формировать эксплуатационный потенциал изделия.

Процесс реализации технологических воздействий должен базироваться на особых принципах ориентации [72, 75], что непосредственно позволяет упорядочить множество элементов технологических воздействий для реализации определённых свойств функциональных составляющих: поверхностная точка,

объёмная точка, поверхностная линия, объёмная линия, поверхность, поверхностный слой, объём. Точка поверхностная либо объёмная является основным формообразующим элементом, используя который можно создать (нанести) покрытия любой сложности или комбинации как, в общем, и формировать деталь [72], данная методика представлена в приложении А.

Рассмотрим подробнее особенности синтеза технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя для повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода.

Как указывалось ранее, последовательность построения технологического процесса реализуется по принципу ОРРЗ и особым принципам ориентации технологических воздействий в следующей последовательности:

1. Определение действующих эксплуатационных воздействий функций.
2. Деление лопатки турбины на функциональные элементы, части, зоны (приложение 2).
3. Составление требуемого набора специальных (перспективных) свойств и структуры покрытия.
4. Подготовка поверхности обрабатываемого функционального элемента пера лопатки.
5. Нанесение выбранного варианта ФОП.
- 6 Чистовая обработка поверхности нанесенного покрытия.

Каждый из данных процессов содержит в себе наборы (варианты) технологических операций (подходов, методов и т.д.), составляемых по критериям оценки (рациональности) на основании морфологического синтеза. Данная методика позволяет составить универсальную структуру технологического процесса, имеющего целевое назначение для определенного типа лопатки турбин возможных образцов двигателя. Реализация способа основывается на обеспечении ФОС наносимому защитному покрытию. Однако главное, что должно соблюдаться при нанесении защитного покрытия, это его функциональное ориентирование на условия эксплуатации, т.е. создание

покрытия особых форм, свойств и их пропорций на поверхности детали.

На рисунке 2.16 представлена схема одного из возможных вариантов нанесения модульного ФОП, где 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, ..., n – последовательность нанесения каждого слоя различных модулей.

На данной схеме (позиция 0) видно несколько поверхностей, на которых происходит разрушение в виде плоских и объёмных геометрических форм (точек, линий, эллипсов и т.д.). Можно определить, что для данного случая разрушению подвержены два функциональных элемента: входная кромка и выходная кромка, а также происходит прогрессия разрушения по корытцу. На кромках распространение разрушения покрытия происходит одновременно в разных направлениях. Так, начало полного разрушения покрытия и основного металла на выходной кромке пера имеет вид широкой линии $a_1 - l - a_1'$, далее повреждение

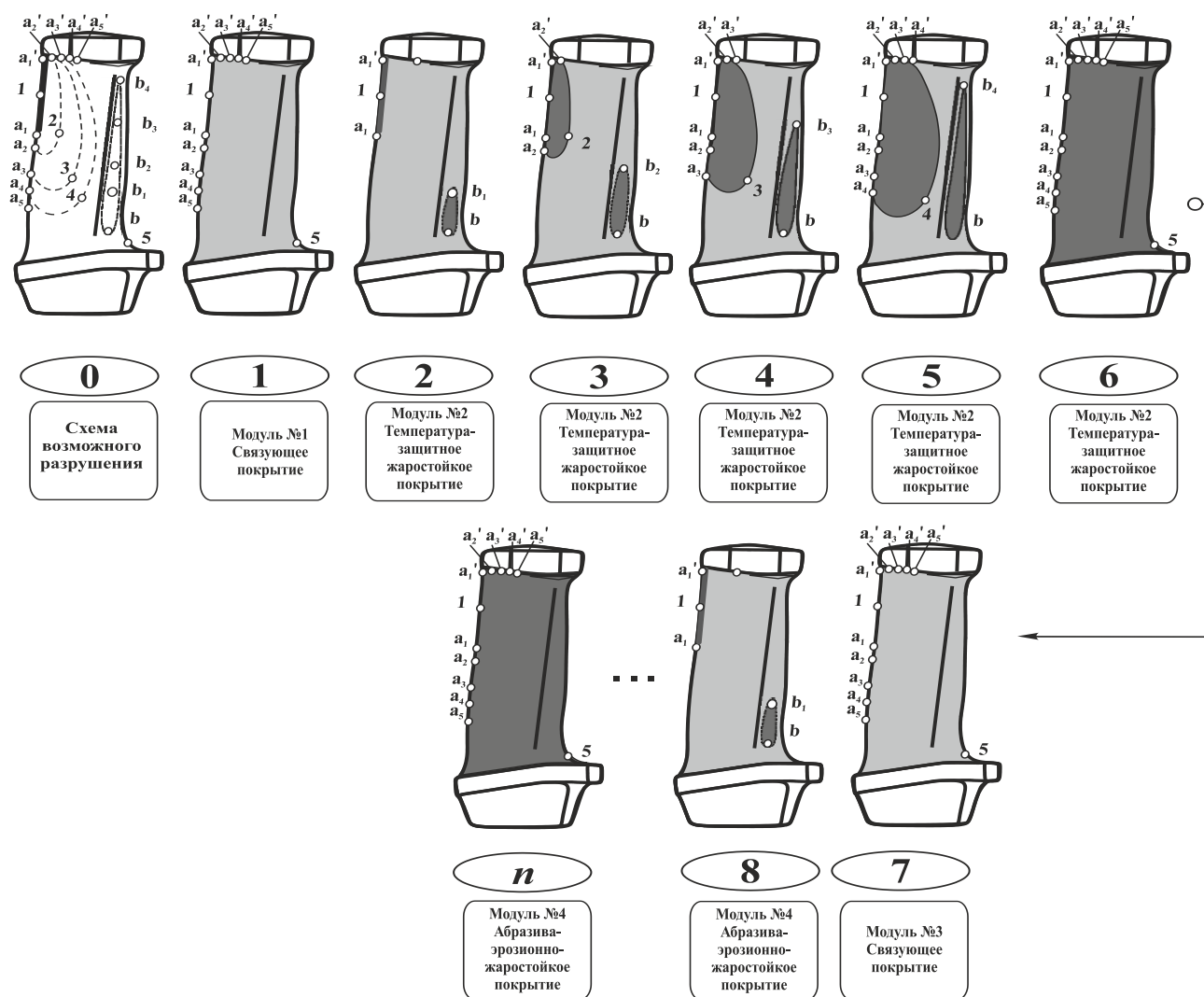


Рисунок 2.16. Сокращенная схема нанесения модульного ФОП на перо лопатки турбины

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 просматривается 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.). Такой набор особенностей разрушений характерен только для данного случая, обусловленного видом лопатки турбины, материалом самой лопатки, материалом покрытия, методами нанесения традиционного покрытия, продолжительностью эксплуатации, наличием или отсутствием системы охлаждения и т.д.

Соответственно нанесение многослойного (модульного) ФОП на поверхность пера лопатки, структура которого представлена на рисунке 2.17 (вариант), необходимо производить послойно на проекции зон воздействия

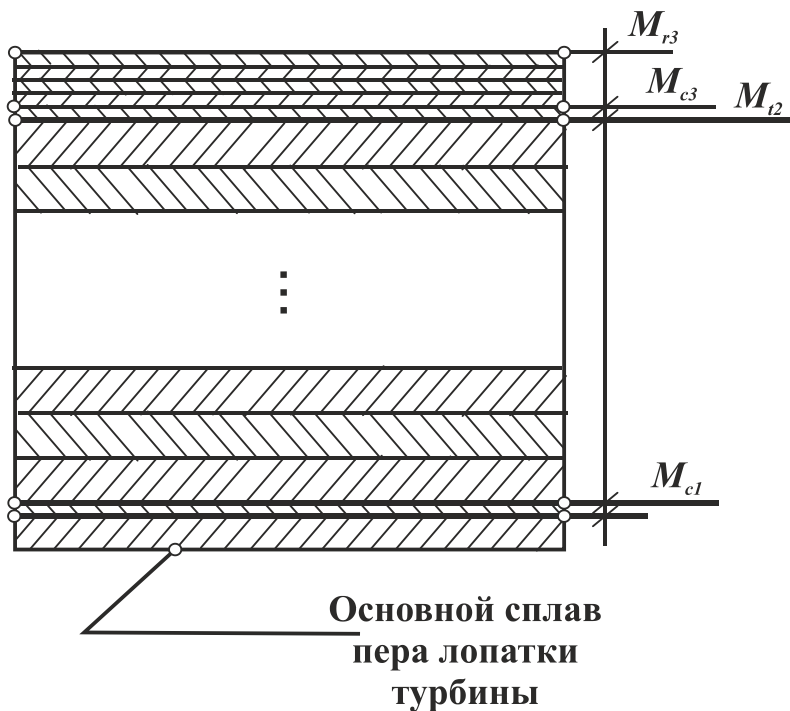


Рисунок 2.17. Структура модульного покрытия лопатки турбины (вариант)

эксплуатационных функций (на всю поверхность пера), с выбранными материалами и использованием особых принципов ориентации технологических воздействий для обеспечения разноуровневой равноэффективной защиты.

Общий слой модульного покрытия в процессе нанесения формируется за счет поочередного напыления каждого слоя на поверхность

пера с учетом проекции воздействия эксплуатационной функции (множества функций), как показано на позиции 0 рисунка 2.16. При этом свойство покрытия может иметь одну целевую характеристику или комплекс. Структура покрытия зоны максимального износа должна иметь форму и/или свойства, обеспечивающие равномерность износа, ориентируясь на процесс износа зоны с минимальной толщиной (структурой свойств) покрытия пера лопатки.

Для лопаток турбин можно, в общем, применять следующие модули покрытия (толщины выбираются в соответствии с типом ГТД) [93]:

- температурно-защитное жаростойкое покрытие (метод газового или детонационно-газового напыления или другие методы; напыляемое покрытие – керамика, композитное или композиционное покрытие);

- абразивно-эрозионно-жаростойкое покрытие (метод газового или детонационно-газового напыления покрытия или другие методы; напыляемое покрытие – керамика, композитное или композиционное покрытие).

При этом общая структура покрытия лопатки турбины может иметь следующий вариант (рисунок 2.17) [93]:

- M_{C1} (Слой 1) – первый модуль связующих покрытий (компенсация разности температурных коэффициентов расширения, улучшение адгезии и т.д.), общая его толщина может составлять 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает основной материал лопатки с температурозащитным жаростойким покрытием;

- M_{T2} (Слой 1,2,3,... n) – модуль температурозащитных жаростойких покрытий, общая его толщина может составлять 300 ... 400 мкм, данный модуль покрытий снижает проникновение температуры к основному материалу лопатки из условия $\xi = 5,1...8,0$ °С /мкм.

- M_{C3} (Слой 1) – второй модуль связующих покрытий 4, общая его толщина обычно составляет 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает температурозащитное жаростойкое покрытие с абразива-эрозионно-жаростойким покрытием;

- M_{R4} (Слой 1,2,3,..., n) – модуль абразива-эрозионно-жаростойких покрытий, общая его толщина рекомендуется в пределах 8,0 ... 20,0 мкм. Первый и второй модули (слой 1 и слой 3) связующих покрытий связывают основной

материал лопатки с модулем M_{T2} температурозащитного жаростойкого покрытия, модуль M_{T2} температурозащитного-жаростойкого покрытия с модулем M_{R4} абразива-эрозионно-жаростойкого покрытия. В данном случае общий ресурс всего покрытия лопатки будет определяться интенсивностью износа в проекциях наименее критических воздействий на модуль M_{R4} абразива-эрозионно-жаростойкого покрытия. Это обусловлено тем, что при износе и разрушении этого модуля покрытий происходит катастрофическое разрушение следующих модулей покрытий. Это недопустимо, особенно для модуля покрытия M_{T2} температурозащитного жаростойкого покрытия. При уменьшении толщины этого модуля покрытия M_{T2} резко повышается температура на основном материале лопатки и происходит катастрофическое разрушение лопатки турбины. Т.е. ресурс времени разрушения покрытия с модулем M_{R4} в зоне поверхности пера лопатки турбины, где эксплуатационные функции оказывают максимальное воздействие, должно быть равно ресурсу времени разрушения покрытия с модулем M_{R4} в зоне поверхности пера лопатки турбины, где эксплуатационные функции оказывают минимальное воздействие. Данное модульное покрытие можно применять для деталей, работающих в наиболее сложных условиях, при повышенной температуре, при наличии большого количества абразива, технической возможностью ГТД др.

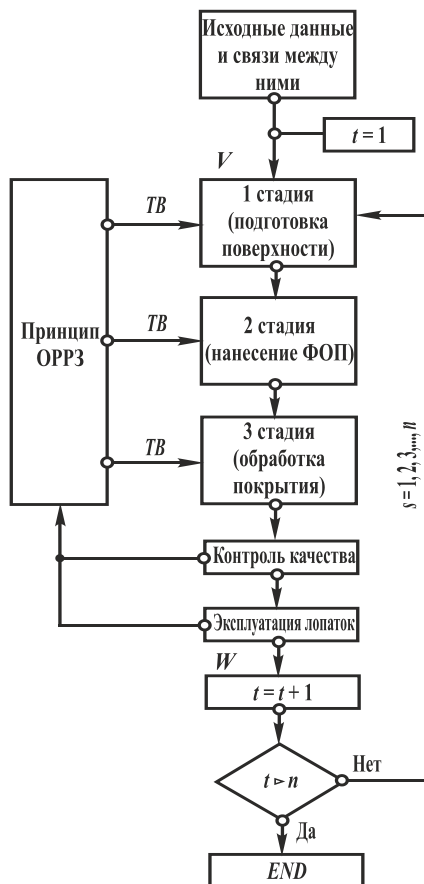
В данном исследовании будет представлен процесс нанесения ФОП для защиты от совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия на основе нитрида циркония наносимого методом ионно-плазменного напыления. Общая его толщина рекомендуется в пределах до 120,0 мкм. Свойства данного покрытия позволяют при особом топологическом распределении слоев обеспечить защиту поверхности пера лопатки от температуры до 3000 °С.

Такое покрытие поверхности обеспечит единовременный равномерный износ в заданных пределах ресурса времени. Это и является принципом разноуровневой равноэффективной защиты всех элементов (участков, зон и т.д), который обеспечивается нанесением защитного покрытия, применяя особые принципы ориентации технологических воздействий.

Покрытие, которое наносится на поверхность пера лопатки, и будет являться покрытием с ФОС. Данное покрытие формируется в соответствии с выражениями (2.1), (2.2) и (2.3) на базе особых принципов ориентации технологических воздействий рассматриваемых, в приложении А.

2.6. Алгоритм повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода

Алгоритм, представленный на рисунке 2.18 описывает последовательность шагов и переходов процесса повышения ресурса лопаток турбин с применением



защитных ФОП. Данный алгоритм предоставляет возможность пошагово, универсально осуществлять создание технологии и непосредственно улучшать свойства детали с целью создания разноуровневой равноэффективной защиты, как при изготовлении, так и при восстановлении изделия. Здесь указано: t – количество циклов восстановления, $t = 1, 2, 3, 4, \dots, n$; s – обратный цикл возврата лопаток на восстановление, $s = 1, 2, 3, 4, \dots, n$; технологические воздействия (TB) обеспечивающие принцип ОРРЗ, $TB = f(t, s)$; W и V – выход и вход процесса; $ОРРЗ$ – технологическое обеспечение разноуровневой равноэффективной защиты; S, E, I – информационный, энергетический и материальный

Рисунок 2.18. Алгоритм поток. На алгоритме стрелка справа указывает процесс повышения обратный цикл возврата лопаток на восстановление,

который возможен только в случае если $t < n$, если $t = n$, то $T_o = 0$ (общий срок службы) и все возможные жизненные циклы лопатки исчерпаны. В этом случае алгоритм переходит к шагу *END*.

Построение такого алгоритма начинается с изучения структурной схемы запланированного технологического процесса, который в данном исследовании представлен на рисунке 2.12 и состоит, в общем, из нескольких частей:

- 1-я стадия содержит набор операций по подготовке поверхности к нанесению защитного покрытия;
- 2-я стадия содержит набор операций по выполнению процесса нанесения покрытия на поверхности пера лопатки турбины;
- 3-я стадия содержит набор операций, направленных на обработку поверхностей с нанесенными защитными покрытиями.

Последовательность осуществления шагов алгоритма происходит с ориентированием на начальные условия. Ориентирование включает в себя подбор соответствующего набора технологических операций для каждой части процесса подготовки поверхности, это будет зависеть от того, к какому начальному состоянию лопатки будет применен алгоритм и схема технологического процесса. При условии подготовки поверхности новой лопатки к нанесению покрытия, набор технологических операций будет иметь один вид, при подготовке поверхностей с неизношенным покрытием, набор операций будет иметь другой состав. Это в целом подтверждает, что в зависимости от состояния поверхности пера лопатки будет осуществляться подбор рационального по количеству и характеристикам набора технологических операций, а алгоритм будет неизменно действовать в любом из возможных вариантов повышения ресурса лопаток турбин. Этот алгоритм может применяться как для нанесения покрытий традиционным подходом, так и ФОП. Может применяться как для ТП повышения ресурса лопаток турбин ГТД авиационной техники, так и для других видов машин или систем.

2.7. Общая структурная схема диссертационной работы

В данном диссертационном исследовании решаются следующие задачи:

- исследование особенностей разрушения лопаток турбин и действующих эксплуатационных функций;
- анализ существующих технологических методов, применяемых для повышения качества лопаток турбин;
- разработка общего принципа повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода;
- синтез метода повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода;
- разработка способа и алгоритма повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода;
- разработка структурно-технологического обеспечения функционально-ориентированной технологии;
- разработка конструкторско-технологического обеспечения функционально-ориентированной технологии;
- экспериментальные исследования, разработка рекомендаций, внедрение результатов в производственные процессы.

С целью решения данных задач в работе выполняется разработка типового технологического процесса, который позволит обеспечить повышение ресурса лопаток турбин на базе применения ФОРП. При этом осуществляется построение структуры технологического процесса и создание алгоритма для данной структуры. Такой подход направлен на увеличение количества возможных циклов восстановления лопаток турбин, за счет применения принципа ОРРЗ и специальных ФОРП. На рисунке 2.19 представлен вариант структурной схемы данного диссертационного исследования.

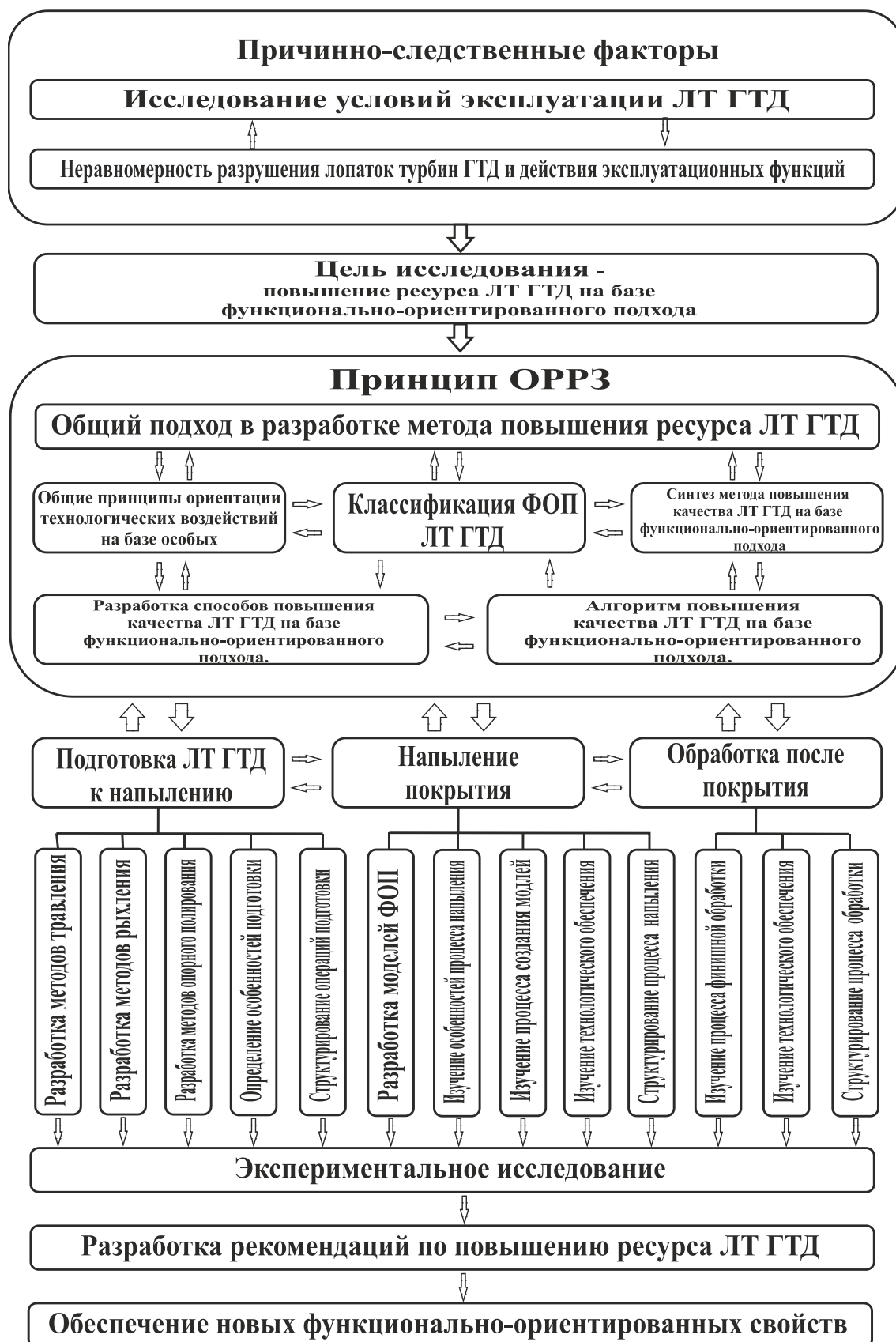


Рисунок 2.19. Структурная схема процесса исследования

Указанная схема может состоять из множества пунктов, обозначающих операции, действия и т.д., перечень которых в свою очередь будет определяться, в зависимости от требований условий в которых проводится исследование.

Структурная схема сокращённо содержит следующие пункты:

- исследование особенностей разрушения лопаток турбин ГТД;
- исследование действующих эксплуатационных функций;
- анализ существующих технологических методов, применяемых для повышения качества лопаток турбины;
- разработка общего подхода метода повышения ресурса;
- классификация ФОП;
- синтез метода повышения ЛТ ГТД;
- составление алгоритма синтеза процесса.

Также в состав данной структурной схемы входят:

- создание структуры синтеза процесса восстановления или напыления ФОП;
- планирование технологического процесса;
- обеспечение технологического процесса;
- разработка методов каждой стадии технологического процесса;
- структурирование каждой операции в отдельности и в общем;
- проведение эксперимента;
- разработка рекомендаций по повышению ресурса лопаток турбин ГТД;
- внедрение результатов работы в производство;
- обеспечение новых функционально-ориентированных свойств.

Представленная структурная схема (рисунок 2.19) обеспечивает понимание последовательности происходящего процесса, указывает основные стадии его выполнения и направления для решения поставленных целей, определяет взаимосвязи между каждой стадией или набором технологических операций, направленных на повышение ресурса лопаток турбин при выполнении мероприятий по восстановлению и изготовлению данных деталей.

2.8. Выводы

Проведенные исследования позволили разработать синтез технологического обеспечения ОУО лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода, и установление основных особенностей и условий данного процесса, а именно:

1. Установлено, что разрушение поверхности пера лопатки возникает в основном вследствие совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия газового потока. В качестве особенностей, в разрушении можно выделить следующее:

- на входной кромке, ниже ее срединной части (ближе к бандажной полке), зарождается зона развития разрушения защитного покрытия с перспективой распространения вглубь и в сторону бандажной полки;

- на выходной кромке, выше ее срединной части, в области переходной зоны задней кромки с бандажной полкой, зарождается зона развития сильного разрушения защитного покрытия и основного металла с перспективой распространения в сторону нижней части передней кромки;

- корытце пера имеет переменные по сложности и мощности зоны разрушения защитного покрытия.

2. Составлена классификация ФОП, с помощью которой можно обеспечить выполнение одного из промежуточных этапов синтеза специальной технологии повышения ресурса лопаток турбин ГТД. Разработаны гипотетические структурные варианты ФОП, с возможностью выбора вариаций специальных покрытий (свойства, геометрия) и материалов для их нанесения как основы способа повышения ресурса лопаток турбин ГТД на базе функционально-ориентированного подхода. Составлены математические выражения, отображающие процессы нанесения различного вида покрытий. Выбран и

исследован морфологический подход в качестве основы для синтеза технологического процесса.

3. Разработан метод процесса подготовки детали, процесса формирования модульного ФОП, процесса нанесения покрытия и чистовой обработки поверхностей с покрытием (без него) на базе принципа разноуровневой равноэффективной защиты. Это позволяет получать ФОС покрытия и формировать соответствующее технологическое обеспечение. ОРРЗ является интеллектуальным и ресурсным показателем свойств ФОП, которое наносится на лопатку.

4. Разработан подход в составлении целевой характеристики обрабатываемой детали и составлен базовый вариант ориентированной классификации лопаток турбин. Разработан способ функционально-ориентированного деления лопаток турбин на составные части (элементы, зоны и т.д.), что обеспечивает при проектировании технологического процесса способность выбирать, планировать и реализовывать технологические воздействия на высоких уровнях прецизионности (приложение Б).

5. Создан алгоритм реализации технологического процесса, направленного на повышение ресурса лопаток турбин, который позволяет выполнять подготовку поверхности пера лопаток как бывших в эксплуатации, так и новых, как для нанесения традиционных покрытий, так и ФОП. Сам процесс повышения ресурса лопаток турбин, который использует данный алгоритм, приобретает возможность универсальной реструктуризации с ориентацией на начальные условия (вид лопатки, материал лопатки, форма лопатки, особенности эксплуатации и т.д.).

7. Разработана структурная схема обеспечивающая понимание последовательности происходящего процесса, способная указать основные стадии его выполнения и направления для решения поставленных целей по определению взаимосвязи между каждой стадией или набором технологических операций, направленных на повышение ресурса лопаток турбин при выполнении мероприятий по восстановлению и изготовлению данных деталей.

РАЗДЕЛ 3

**СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИНТЕЗА
ПРОЦЕССА ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК
ТУРБИН ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

3.1. Структура стадий технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода

Цель проводимого исследования заключается в обеспечении синтеза процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин для повышения их

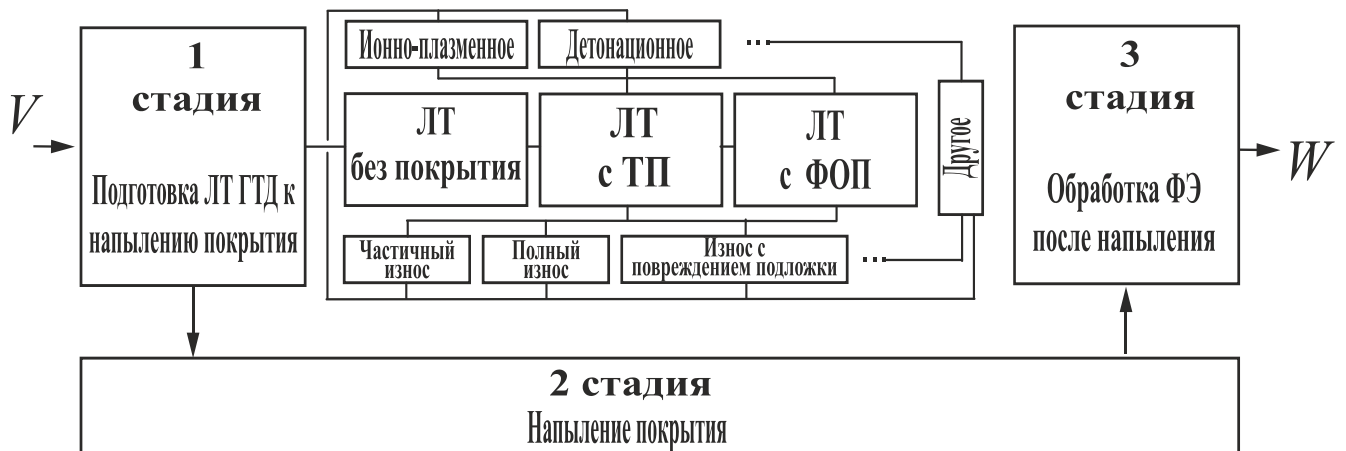


Рисунок 3.1. Основные стадии структуры технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин

ресурса. В связи с чем, на базе изученных особенностей разрушения и применяемых методов повышения качества, создаётся структура технологического процесса, направленного на обеспечение ФОС лопаткам турбин

В данной части исследования будет рассматриваться процесс синтеза структурно-технологического обеспечения технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин (рисунок 3.1) [23, 29, 34, 35]. Подробно

будут рассматриваться все три стадии с наборами основных технологических операций из общей структуры технологического процесса.

Для визуального отображения последовательности выполнения каждой стадии технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин составлена структурная схема процесса, которая изображена на рисунке 3.2.

Структура 1-й стадии технологического процесса, представленного на

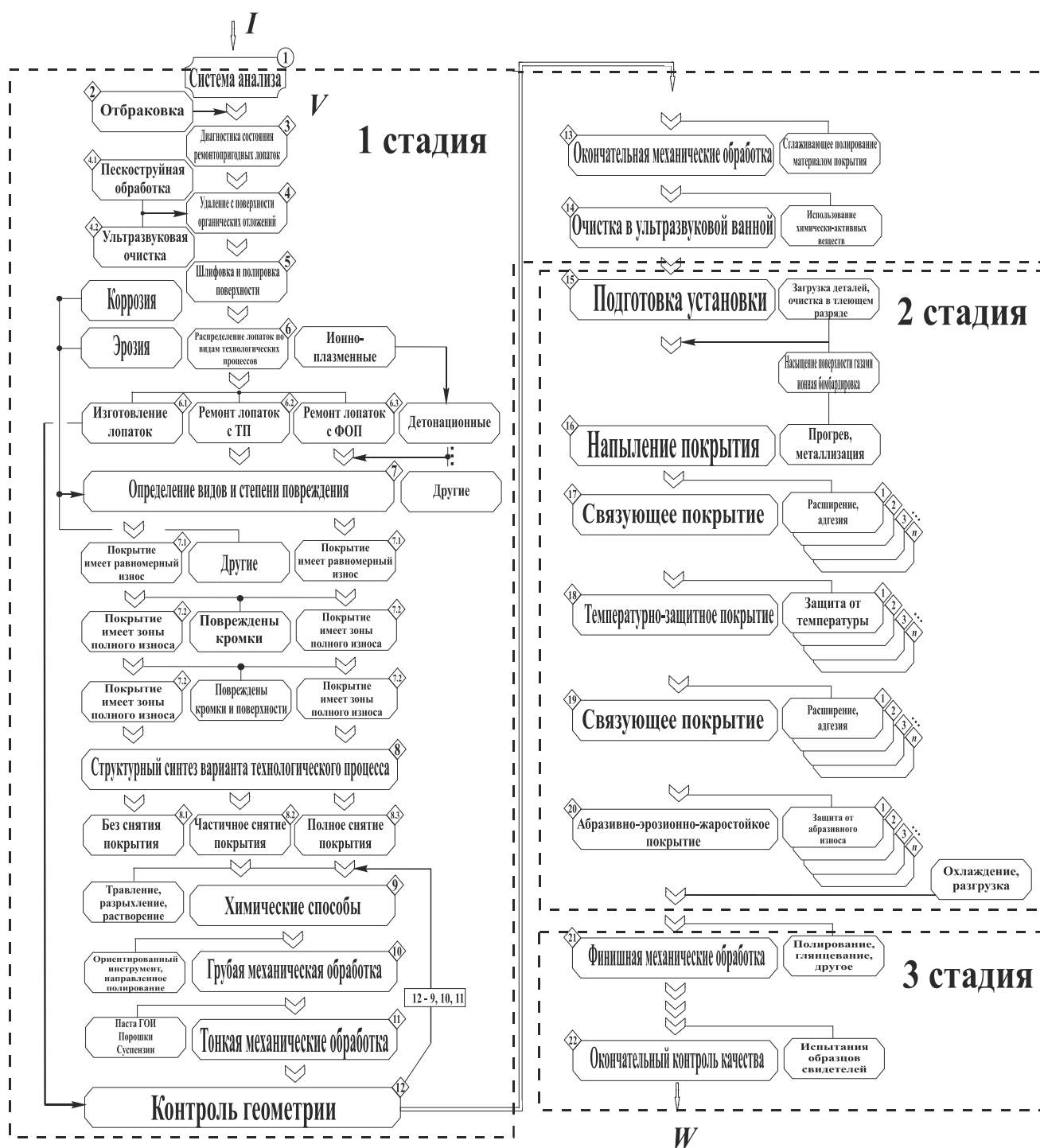


Рисунок 3.2. Структурная схема типового технологического процесса нанесения ФОП на лопатки турбин

рисунке 3.2, строится по общим принципам создания данного типа структур [119]. В зависимости от начальных условий (данных системы анализа о существующих проблемах/запросах и возможностях технологий) структура каждой стадии будет ориентироваться под конкретный пример результатов эксплуатации любого возможного ГТД. Соответственно, наборы технологических операций (методов, способов и т.д.) должны ориентированно составляться. Например, на базе интеллектуального подбора (морфологического синтеза).

1-я стадия технологического процесса будет иметь набор операций, направленных на оценку пригодности лопаток турбин к проведению ремонта (для лопаток бывших в эксплуатации) с последующей подготовкой поверхности и подбора перечня технологических операций. Операции полирования должны выполняться с различным подходом в выборе абразивных свойств инструмента, усилий нажима на поверхность, скорости вращения инструмента, продолжительности, схем движения и т.д.

Данная стадия может выполняться в двух вариантах:

- первый вариант – это выполнение подготовки поверхности пера новых лопаток турбин ГТД. Данный процесс будет охватывать технологические операции, связанные с выбором метода нанесения покрытия, выполнением предварительной обработки (предварительное полирование), контролем геометрии поверхности пера, далее контроль состояния реальной поверхности, окончательная чистовая обработка (окончательное сглаживающее полирование);

- для лопаток, бывших в эксплуатации, процесс подготовки поверхности более трудоемкий, здесь происходит оценка состояния поверхности пера лопатки, основанная на изучении мощности множества разрушений, их особенности и характеристики, возможности осуществления восстановительных работ (оценка ремонтпригодности), съем отложений и остатков старых покрытий (химические и механические способы), предварительное полирование, контроль геометрии, оценка характеристики реальной поверхности, чистовое полирование.

После достижения соответствия характеристик поверхности пера лопаток по требованиям метода нанесения защитного покрытия (ионно-плазменный,

детонационный, другой) выполняется 2-я стадия технологического процесса – это нанесение ФОП, которая заканчивается предварительным полированием поверхности покрытия и контролем геометрии и характеристик поверхности защитного покрытия.

3-я стадия технологического процесса связана с приданием поверхности пера лопатки, с нанесённым на нее защитным ФОП, характеристик с минимальными показателями шероховатости путем последовательной минимизации абразивной способности инструмента (глянцевание и т.д.). Данная стадия заканчивается контролем в комплексе состояния лопатки турбины.

В реализации всех наборов технологических операций всех 3-х стадий данного технологического процесса можно дополнительно осуществить улучшение некоторых составляющих [21, 23, 24], а именно:

- предложить подход в повышении эффективности подготовки поверхности пера лопаток турбин;
- предложить метод совершенствования процесса заполировки изношенных покрытий лопаток бывших в эксплуатации;
- предложить метод последовательной обработки поверхностей с целью придания минимальных показателей шероховатости.

3.2. Сущность и особенности процесса обработки поверхностей пера лопаток турбин для нанесения защитных покрытий

С целью создания методов и подходов полирования поверхности пера лопаток турбин, необходимо изучить сущность самого процесса обработки. Такая работа проведена и рассмотрена в трудах [134, 135, 136].

В процессе обработки поверхности пера лопатки турбины для нанесения защитного покрытия [108] следует обратить внимание на некоторые начальные условия построения процесса, которые, в сущности, будут определять структуру и набор технологических операций.

Перечень общих начальных условий, позволяющих структурировать последовательность осуществления процедуры построения процесса, может иметь



Рисунок 3.3. Общие условия построения технологического процесса обработки поверхности детали

состав из некоторых основных факторов, которые на начальном уровне укажут направление изучения конкретных множеств свойств, действий и условий. Данный перечень отображен на рисунке 3.3.

Здесь перечислены:

- условия обработки поверхностей пера лопатки (C_m), ориентирующие технолога на свойства жаропрочных материалов лопатки (никелевых, кобальтовых, титановых, легированных, металлокерамических и др.) без покрытия [1, 2, 110, 115, 116, 132].

- условия обработки поверхности (C_l), ориентирующие технолога на свойства защитных покрытий пера лопатки (способ нанесения, толщина слоя, применяемый материал, геометрия слоя, свойства, традиционное покрытие, ФОП и др.) [1, 2, 120, 121, 123, 127].

- условия (C_d), ориентирующие на особенности одновременной обработки сложной структуры поверхности или материалов с различными свойствами

систем (металл-покрытие, металл-покрытие традиционное, металл-покрытие функционально-ориентированное) и др. [127].

Множество данных условий может быть представлено следующим математическим отображением [14, 72, 41]:

$$E = \{C_m, C_l, C_d, \dots, C_n\} \quad (3.1)$$

где E – общий объём множества условий для разрабатываемого процесса; C_m – множество условий, ориентирующих технолога по средствам свойств основного материала; C_l – множество условий, ориентирующих технолога по средствам свойств защитных покрытий; C_d – множество условий, ориентирующих технолога по средствам сложной структуры поверхности или материалов с различными свойствами систем; C_n – мощность многовариантного кортежа условий, управляющих выбором решения.

Также данные условия можно отобразить множеством кортежей элементарного типа $(c_{m_j}, c_{l_j}, c_{d_j}, \dots, c_{n_j})$, характерных, например, для какого-либо j – ого иерархического уровня деления свойств поверхности (пространства), для которой подбираются варианты решений.

Такое множество элементарных кортежей условий, свойств поверхности (пространства) j – ого иерархического уровня деления можно записать следующим образом [14, 72, 41, 127]:

$$E = \left\{ \left(c_{m1j}, c_{l1j}, c_{d1j}, \dots, c_{n1j} \right), \left(c_{m2j}, c_{l2j}, c_{d2j}, \dots, c_{n2j} \right), \dots, \left(c_{mnj}, c_{lnj}, c_{dnj}, \dots, c_{nnj} \right) \right\} \quad (3.2)$$

В свою очередь, особенность ФОТ требует учитывать необходимость ориентирования при выборе технологических решений на уровне глубины технологии, и, на примере множества условий, ориентирующих технолога по средствам свойств основного материала (C_m), можно представить элементарный кортеж j – го иерархического уровня данных условий следующим образом [14, 72, 41, 127]:

$$\left. \begin{aligned}
 c_{m1j} &= \{c_{11}, c_{12}, c_{13}, \dots, c_{1v_1}\}; \\
 c_{m2j} &= \{c_{21}, c_{22}, c_{23}, \dots, c_{2v_2}\}; \\
 c_{m3j} &= \{c_{31}, c_{32}, c_{33}, \dots, c_{3v_3}\}; \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 c_{mnj} &= \{c_{n1}, c_{n2}, c_{n3}, \dots, c_{nv_n}\}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где $c_{m1j}, c_{m2j}, c_{m3j}, \dots, c_{mnj}$ – порядки множеств элементарных условий, возникающих на j – ом уровне свойств основного материала;

$c_{ji} - i - e$ элементарное подмножество начальных условий j – го уровня глубины изучения свойств основного материала;

$v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ – мощность множеств каждого из $c_{m1j}, c_{m2j}, c_{m3j}, \dots, c_{mnj}$ порядка множеств.

Подобно структурированию условий обработки поверхностей пера лопатки с изучением свойств основного материала пера лопатки (C_m) происходит реализация, изучение, преобразование, деление, объединение C_l и C_d .

Процесс прецизионного изучения множеств и подмножеств начальных условий, организационных связей между ними (прямых и обратных), а также их деление, объединение и классификация, происходит до требуемого уровня глубины технологии [72]. Такое изучение направлено на создание инвариантности [39, 97], как для процесса повышения ресурса лопаток турбин в целом, так и для его составляющих: процесса изучения особенностей эксплуатации лопаток турбин для различных двигателей; процесса разработки способа повышения ресурса лопаток турбин различных двигателей; процесса разработки структурно-конструкторско-технологического обеспечения процесса повышения ресурса деталей и т.д. В этом и заключается особенность придания типизации создаваемому технологическому процессу.

Модель подбора решений представлена на рисунке 3.4. Здесь пунктиром выделена гипотетически существующая область вариантов множеств начальных условий. Модель, опирающаяся на вычисление полусуммы теоретически возможных показателей (величин) воздействий, ресурсов (модулей, коэффициентов и т.д.) следующих множеств (условий): C_m – множество условий,

ориентирующих технолога по средствам свойств основного материала; C_l – множество условий, ориентирующих технолога по средствам свойств защитных покрытий; C_d – множество условий, ориентирующих технолога по средствам сложной структуры поверхности или материалов с различными свойствами

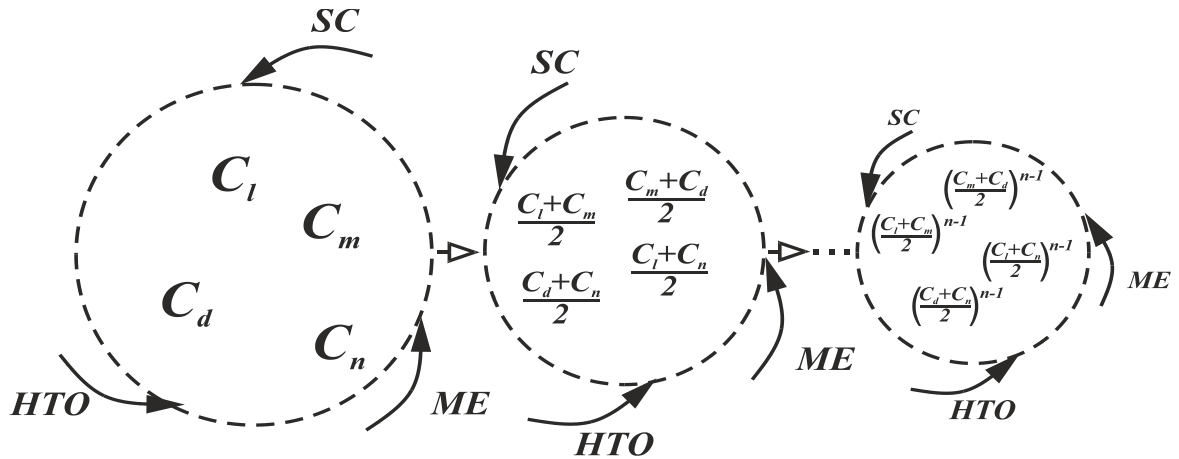


Рисунок 3.4. Модель выбора решения по обработке поверхности пера лопатки турбины

систем; C_n – мощность многовариантного кортежа условий, управляющих выбором решения; SC – внешнее условие, связанное с наличием химической коррозии; ME – условие механической эрозии; HTO – условие высокотемпературного окисления.

Такой процесс оперирования начальными условиями должен происходить до предела функций, т.е. стремиться к максимальной точности изучения и выбора.

Поле композиций технологических решений на уровне микро-, макро- и даже нано- структур, образующееся в результате изучения начальных условий, а именно выполнения математических операций, можно представить в виде следующего выражения [72]:

$$S_{t(i+1)} = C_m \cap C_l \cap C_d \cap C_n \quad (3.4)$$

где $S_{t(i+1)}$ – технологическое решение $(i+1)$ - го уровня глубины технологии формируемое пересечением множеств начальных условий для любого единичного участка поверхности обрабатываемой детали.

Учитывая тот факт, что в результате технического прогресса происходят изменения в эксплуатационных условиях, технологиях и т.д., существует прямая

вероятность возникновения новшеств в производстве и условиях эксплуатации, и поэтому условия ориентиры также изменяют вид, мощность, размерность, степень, т.е. станут новыми или будут являться прогнозируемыми. Этот вывод можно отобразить в виде следующего выражения [72]:

$$E_p = \bigcap_{j=1}^{c_v} C_{nj} \quad (3.5)$$

где E_p – перспективно новый объем условий; C_{nj} – j -е множество условий n – го уровня исследования свойств обрабатываемой среды (поверхности); c_v – мощность подмножества перспективно новых начальных условий.

С целью более подробного определения сущности происходящих процессов при обработке поверхностей пера лопаток, имеющих свойства на примере, указанном выше, существует необходимость рассмотреть ряд вопросов, а именно:

- подбор и изучение абразивных способностей материалов, применимых для обработки пера лопаток турбин;
- изучение спектра применяемых инструментов для обработки лопаток турбин;
- изучение возможности создания и внедрения способа и устройства для обработки пера лопатки турбины, например, полировальника ориентированной абразивной способности (данное перспективное направление в проводимом исследовании рассматривается как предложение о необходимости проведения дальнейшего исследования);
- изучение особенностей обработки жаропрочных сплавов на никелевой (кобальтовой и др.) основе (в системах метал, метал/покрытие, покрытие);
- разработка структуры и наборов технологических операций;
- изучение некоторых особенностей данного технологического процесса.

Результатом реализации указанной последовательности станет совершенствование структуры процесса обработки лопатки турбин с применением выбранных решений. Что необходимо для обеспечения разноуровневой равноэффективной готовности поверхности к нанесению защитного покрытия на 1-й стадии технологического процесса и в дальнейшем

разноуровневой равноэффективной защиты поверхности (3-я стадия технологического процесса) к эксплуатации в условиях совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия.

Также, для более качественного подбора решений, следует обратить внимание на тот факт, что качество поверхностного слоя (реальной поверхности) во многом определяет износостойкость детали. Само же качество поверхности – это, безусловно, совокупность физических, химических, а лучше сказать, комплексных свойств обработанной поверхности, в нашем случае пера лопатки турбины ГТД.

Условно комплекс приобретаемых свойств после обработки (подготовки) можно разделить на [53, 54]:

- геометрические свойства или характеристики поверхности;
- физико-механические свойства или характеристики поверхности.

Из общего перечня можно выделить некоторые свойства (характеристики), которые в первую очередь должны быть приданы поверхностям (частям, элементам, зонам и т.д.) лопатки турбины, ориентируясь на неравномерно действующие эксплуатационные нагрузки с целью функционального ориентирования, процесса обработки пера лопатки [75, 126]. Конкретнее, технолога на этапе выбора решений должен интересовать вопрос возможности обеспечения качественных свойств на уровне микро- и макрогеометрии.

Лопатки турбин газотурбинных двигателей в современном производстве изготавливаются по различным технологиям. В качестве материала в основном используются (использовались) сплавы на никелевой основе (ВЖМ1, ВЖМ8, ВЖЛ20, ЖС6К, ЖС30М, ЖС32, ЖС36, ЖС40, ЖС47 и т.д.), при этом, в большинстве случаев, поверхности пера лопаток подвергаются процедуре повышения ресурса за счёт нанесения защитных покрытий мощным энергетическим воздействием, например, применяется ионно-плазменное напыление [75, 77], но, несмотря на это, при эксплуатации лопаток турбин происходит их специфическое разрушение.

С учетом свойств основного материала, свойств материала покрытия, специфики разрушения пера лопатки, обработка (полировка) поверхности пера лопатки турбины будет иметь несколько вариантов исполнения:

- подвергающиеся обработке поверхности пера лопатки (функциональные части) изготовлены из никелевого (другого) жаропрочного (термостойкого) сплава, поэтому обработка будет производиться исключительно никелевого (другого) сплава опираясь, на начальные условия, возникающие, например, на фоне свойств сплава;

- подвергающиеся обработке поверхности пера лопатки (функциональные части) изготовлены из никелевого жаропрочного (термостойкого), сплава имеют защитные покрытия (электронно-лучевое испарение, ионно-плазменное напыление, детонационное напыление, и др.), поэтому обработка будет производиться исключительно самого покрытия с учётом начальных условий возникающих, например, на фоне свойств покрытия;

- полное снятие (выполировка) выполняется только покрытий, либо 1-го, 2-го, 3-го, ..., n – го слоев покрытия;

- подвергающиеся обработке поверхности пера лопатки (функциональные части) изготовлены из никелевого (другого) жаропрочного (термостойкого) сплава, имеют защитные покрытия, и обработка, при наличии неоднородностей разрушения, будет производиться одновременно и покрытия, и основного металла, с учётом начальных условий, возникающих, например, на фоне свойств покрытия и металла (комбинированная обработка).

Подбор и изучение абразивных способностей материалов, применимых для обработки пера лопаток турбин, имеет некоторые особенности, определяющиеся следующими условиями:

1. Свойства материала лопатки (никелевый сплав, материал покрытия).
2. Свойства и характеристики полировального инструмента и химически активных веществ [96].
3. Процесс перехода от начальных характеристик поверхности пера (поверхностного слоя) к запланированным [88].

4. Особенности реализации наборов технологических операций [79, 83, 89, 90, 94].

5. Особенности материально-технического обеспечения процесса обработки лопаток турбин.

Так, например, при выборе паст и суспензий (смазочно-охлаждающих жидкостей) [25, 135], необходимо изучать условия, которые будут сопровождать весь процесс (наличие различных химически-активных вставок и жидкостей, степень вязкости основы и т.д.). При их приготовлении процентное соотношение микропорошка (тонкого микропорошка) и основы (1:5, 1:3, 1:1 и т.д.) должно определяться начальными условиями, работающими на перспективу в придании требуемых свойств поверхности металла и свойств покрытия [111].

Придание поверхности требуемых (повышенных) параметров качества достигается постепенным снижением зернистости до минимально возможных пределов применяемых материалов [98, 100, 101, 102, 104].

При изучении вопроса выбора инструмента для полирования, предлагается выполнять технологическую операцию с помощью полировального круга, инструмента, выполненного из определенного материала, способного с одной стороны обладать достаточной прочностью, а с другой обладать эластичностью, легкостью и способностью удерживать абразивную композицию. Материалом для изготовления полировальных кругов может служить войлок, фетр, резина, силикон, полимерные композиции, ткани и др.

Выполнение технологических операций на завершающем этапе полирования выполняется с применением полировальных порошков, имеющих высокие показатели в однородности размеров (абразивных характеристик) зерен материалов [136]. Также следует учитывать, тот факт что пасты, изготовленные из мягких микропорошков (окиси железа, хрома, венской извести, талька, крокуса, маршаллита и др.) [50, 51, 56, 61] являются пастами, оказывающими на обрабатываемую поверхность комплексное химико-механическое воздействие.

Начальными условиями в применении или, наоборот, в ограничении применения той или иной пасты являются экономические показатели, такие как

стоимость и в целом возможность приобретения необходимого количества полировальных паст. Кроме того, например, полировальные пасты, содержащие оксид хрома, которому присвоен высокий класс токсичности, при масштабном применении на предприятиях требуют создания особых условий для персонала, что повлечет за собой финансовые вложения.

Окончательное решение по составу паст и суспензий, их свойствам, соотношению компонентов, должно быть в первую очередь сформировано на фоне существующих начальных условий, но окончательно это возможно только опытным путём для конкретных случаев.

Особенности использования инструментов и материалов при выполнении операций обработки поверхностей в технологических процессах, базирующихся на функционально-ориентированном подходе, в дальнейшем требуют большего изучения с целью повышения их эффективности.

Параллельно нужно обратить внимание на необходимость создания функционально-ориентированного инструмента для выполнения точных операций на различных уровнях глубины, а его создание – это отдельная ветвь (работа) в научных исследованиях (в данном исследовании проектирование такого инструмента не рассматривается, рассматривается его общее применение).

Наряду с этим традиционные инструменты, которые применяются для обработки поверхностей, могут полноценно обеспечивать требуемые свойства поверхностям. В данном исследовании полирование поверхностей пера лопаток предлагается выполнять с помощью полировального круга – инструмента, выполненного из определенного материала, способного с одной стороны обладать достаточной прочностью, а с другой обладать эластичностью, легкостью и способностью удерживать абразивную композицию. Материалом для изготовления полировальных кругов может служить войлок, фетр, резина, силикон, полимерные композиции, ткани и др.

Обработка поверхностей лопатки турбины должна выполняться в течение нескольких последовательных технологических операций [137, 138, 139, 140]. 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, а 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. Глянцевание (припуск – 0,0005 ... 0,001 мм), $R_z = 0,025 \dots 0,032$ мкм.

Для снижения погрешности на обработку реальной поверхности пера лопатки выбор припусков на обработку можно просчитать с применением формулы по расчёту коэффициентов уточнения [72],

$$\left. \begin{aligned} K_e^R &= k_1^R k_2^R \dots k_n^R = \prod_{i=1}^n k_i^R, \\ K_e^h &= k_1^h k_2^h \dots k_n^h = \prod_{i=1}^n k_i^h, \\ K_e^\Delta &= k_1^\Delta k_2^\Delta \dots k_n^\Delta = \prod_{i=1}^n k_i^\Delta, \\ K_e^T &= k_1^T k_2^T \dots k_n^T = \prod_{i=1}^n k_i^T; \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

где $K_e^R, K_e^h, K_e^\Delta, K_e^T$ – единые коэффициенты уточнения параметров реальной поверхности обрабатываемой детали, соответственно высоты неровностей профиля, глубины слоя дефекта, суммарного отклонения расположения поверхности и допуска по размеру;

$K_i^R, K_i^h, K_i^\Delta, K_i^T$ – коэффициенты уточнения i -х параметров реальной поверхности, а именно всех соответствующих параметров.

Здесь:

$$\left. \begin{aligned} K_e^R &= \frac{R_{z0}}{R_{zn}}, & k_i^R &= \frac{R_{z(i-1)}}{R_{zi}}; \\ K_e^h &= \frac{h_0}{h_n}, & k_i^h &= \frac{h_{(i-1)}}{h_i}; \\ K_e^\Delta &= \frac{\Delta_{\Sigma 0}}{\Delta_{\Sigma n}}, & k_i^\Delta &= \frac{\Delta_{\Sigma(i-1)}}{\Delta_{\Sigma i}}; \\ K_e^T &= \frac{T_{A0}}{R_{An}}, & k_i^T &= \frac{T_{A(i-1)}}{R_{Ai}}; \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где T_{A0}, T_{An}, T_{Ai} – допустимые параметры размера заготовки, детали (реальной поверхности с i -м технологическим процессом или его частью (операция, переход), соответственно [38];

$R_{z(i-1)}$ – высота микрогеометрии поверхности на предшествующей части технологической операции;

$h_{(i-1)}$ – глубина микрогеометрии поверхности (слоя) на предшествующей части технологической операции;

$\Delta_{\Sigma(i-1)}$ – результирующие отклонения и различия расположения и форм поверхностного слоя предшествующей части технологической операции.

Коэффициенты уточнения величины ориентируемые, их цифровые отображения могут иметь различное значение, т.к. ориентируются в основном на способы механического воздействия при обработке.

В ходе данной работы принято решение считать, что наиболее оптимальными значения коэффициентов уточнения для процессов полировки различных поверхностей лопатки турбины будут следующие значения:

- механическая обработка поверхности с нанесённым защитным покрытием – $k_i \geq 2,5 \dots 4,0$;
- предварительная заполировка поверхности (покрытия) – $k_i = 2,0 \dots 2,5$;
- окончательная заполировка поверхности (покрытия) – $k_i = 1,5 \dots 1,8$;
- зеркальная заполировка поверхности – $k_i = 1,2 \dots 1,5$.

При выполнении операции по механической обработке поверхности лопаток турбин ГТД (с покрытием, без покрытия) в виде полирования? на участке воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность происходят различные процессы [136], и для лопатки турбины? изготовленной из никелевого сплава и

имеющей традиционное защитное покрытие? наиболее характерными будут следующие из возможных:

1. Химические реакции, обусловленные наличием в полировальных материалах активных вставок (кислоты, жиры и т.д.)
2. Абразивное резание [26, 43, 48, 65].
3. Пластическая деформация.
4. Температурная нагрузка.
5. Механическое повреждение (сколы, выбоины, растрескивания и т.д.) защитного покрытия [46].

При выполнении всего комплекса (технологического процесса) обработки поверхности, перечисленные выше факторы возникают или протекают как единое целое.

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

- частота вращения полировальника – ≤ 2800 об/мин;
- удельное давление для предварительного полирования – $5 \dots 15$ кг/см²;
- удельное давление для глянцеваания – $2 \dots 5$ кг/см².

Кроме этого, при полировании, операции обработки необходимо осуществлять с постепенным уменьшением зернистости абразивного материала. Такой подход в целом будет способствовать повышению ресурса поверхности лопаток турбин на различных уровнях, а именно:

- на уровне обеспечения хорошей адгезии материалов на границе сплав – связующее покрытие (связующее покрытие – термозащитное покрытие, термозащитное покрытие – связующее покрытие, связующее покрытие – абразивозащитное покрытие);

- на уровне повышения качества поверхности лопатки с нанесённым верхним покрытием (замедлит процесс нивелирования поверхности под механическим воздействием, предотвратит налипание расплавленных механических частиц песка и т.д.) и др.

3.3. Совершенствование процесса чистовой обработки лопаток турбин газотурбинных двигателей

В целом сам процесс производства (ремонта) лопаток турбин трудоёмкий, имеет массу технологических операций высокой точности, в связи с чем, обеспечивается по всем направлениям, для придания производимым деталям высокой степени качества и стабильности в совершенствовании изготовления.

В данном исследовании это достигается путём применения функционально-ориентированных технологий [72] для интенсификации обработки поверхности лопаток турбин, изготовленных из жаропрочных материалов с (без) защитными покрытиями повышенной твёрдости перед и после нанесения защитного покрытия (модулей).

В связи с чем, в этой части исследования основной целью будет являться изучение процесса совершенствования обработки пера лопаток турбин, а именно выполнения их полирования, с учётом некоторых особенностей, таких как:

- полированию подвергаются поверхности пера лопаток (функциональные элементы), из никелевого (другого) жаропрочного (термостойкого) сплава;
- полированию подвергаются поверхности пера лопаток (функциональные элементы), из никелевого (другого) жаропрочного (термостойкого) сплава и имеющие защитные покрытия (традиционные, функционально-ориентированные);
- полированию (выполировка) подвергается только покрытие (однослойное, многослойное, модульное и т.д.);
- полированию подвергаются поверхности пера лопаток (функциональные элементы), из никелевого (другого) жаропрочного (термостойкого) сплава и имеющие защитные покрытия (обработка выполняется при наличии неоднородностей разрушения одновременно и покрытия, и основного металла).

Процесс полирования, изучаемый в работе, направлен на повышение геометрической точности интересующих некоторых поверхностей (участков, зон) пера лопаток турбин, которые будут обрабатываться до или после нанесения защитного покрытия с применением функционально-ориентированного подхода [72, 75, 125].

Учитывая, что каждая технологическая операция или её часть (переход, проход), по сути, является законченным процессом, в результате которого обрабатываемая поверхность приобретает расчётные параметры (шероховатость, волнистость, наклеп, остаточное напряжение и т.д.), следует обратить внимание на некоторое условие. Например, на то, что степень качества обработанного изделия напрямую зависит от уровня модернизации (совершенства) технологического процесса. Речь идёт о придании типизации технологическому процессу, основанному на принципах функционально-ориентированных технологий [72]. Целью типизации является возможность применения данного технологического процесса для повышения ресурса лопаток турбин различных типов ГТД, применяемых на различных видах техники. И поэтому, при рассмотрении самой сущности проектируемого в данной работе процесса полирования, следует учитывать начальные условия, определяемые следующими происходящими явлениями на поверхности обрабатываемой детали [134]:

- реакции химически-активных веществ (кислот, парафинов, воды и др.) на поверхности обработки;
- резание или диспергирование тонкого слоя реальной поверхности при обработке;
- пластическое деформирование микро- и макрорельефа поверхности.

Также, для улучшения производительности и качества процесса полирования в работе предлагается, сориентировать качество поверхности получаемой на финишных переходах, на необходимость повышения требований к регламентам процесса обработки на предшествующих переходах [54, 72]. Данный способ может быть создан по принципу снятия максимального припуска с поверхности заготовки на предшествующей операции (переход, проход). Данный

принцип необходим для упрощения и повышения эффективности процесса обработки за счет придания минимальных по допуску характеристик обрабатываемой поверхности на предшествующем переходе, где процесс обработки более как экономически, так и технически приемлем. Одним словом, обеспечение условий, рассматриваемых в [54, 72], будет реализовано за счёт придания требуемых параметров качества поверхности именно на предшествующих переходах путём увеличений времени обработки на 5 ... 15%, т.к. здесь точность операций менее затратная. При таком подходе качество поверхности на финишном переходе может быть улучшено до пределов 35 ... 45%.

Возвращаясь к типизации проектируемого процесса, следует учитывать, что для выбора технологического решения по обработке поверхности пера лопатки необходимо ознакомиться с некоторыми начальными условиями, которые будут ориентировать технолога в пространстве величин и особенностей технологии.

Среди условий можно выделить следующее:

- аналитические данные о специфике выполнения обработки поверхностей пера лопатки турбины двигателя;
- приоритеты в процессе повышения эффективности полирования лопатки турбины двигателя;
- связь между аналитическим и статистическим подходом в сравнение припусков на обработку поверхностей лопатки турбины двигателя.

В свою очередь условия для выбора величины припуска будут зависеть от:

- требуемого качества для каждого вида (типа) лопатки турбины двигателя;
- параметров реальной поверхности каждой лопатки турбины двигателя;
- сложности геометрии поверхностей лопатки турбины;
- другого.

Изучим более подробно применение принципа снятия максимального припуска для совершенствования чистовой обработки лопаток турбин газотурбинных двигателей.

Главной задачей данного принципа является то, что при выполнении полирования на каждой предшествующей операции (проходе, переходе) припуск на обработку должен иметь такое значение, которое обеспечит придание параметров, R_a ориентированных на качества допусков по размерам значения.

В свою очередь среднеарифметические значения шероховатости R_a поверхностей пера лопатки турбины для каждого вида обработки имеют некоторый разброс или предел, как нижний, так и верхний. Также следует учитывать, что исходная шероховатость при эксплуатации будет изменяться до эксплуатационной шероховатости в связи с процессом нивелирования.

Верхние и нижние пределы микрогеометрии для поверхностей пера лопатки турбины выбраны и распределены между видами операций полирования в следующем диапазоне:

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. Глянцевание (припуск – 0,0005 ... 0,001 мм), $R_z = 0,025 \dots 0,032$ мкм.

Учитывая сформировавшийся объём работы, необходимо понимать, каким образом возможно реализовать запланированный процесс, а именно каков объём готовой продукции, т.е. реализованных операций по обработке поверхности, выражаемых производительностью.

Производительность, как величину можно отобразить для четырёх операций по обработке поверхности в виде следующей формулы [72]:

$$P_{Ta} = \frac{1}{t_{o1} + t_{o2} + t_{o3} + t_{o4}} \quad (3.8)$$

где P_{Ta} – технологическая производительность полирования поверхностей лопатки турбины;

$t_{o1}; t_{o2}; t_{o3}; t_{o4}$ – основное время полирования поверхностей лопатки турбины для каждой из четырёх операций.

Если, например, считать, что временные показатели $t_{o1}; t_{o2}; t_{o3}; t_{o4}$ в некоторой степени, равны, то формулу (3.8) можно записать в следующем виде:

$$P_{Ta} = \frac{1}{4t_o} \quad (3.9)$$

Оперируя непосредственно предлагаемыми величинами (в процентном соотношении), увеличивая время полировки на предшествующей операции (проходе, переходе) и снижая на последующем, расчётная формула (3.9) будет иметь вид:

$$P_{Tb} = \frac{1}{(1+0,15)t_{o1} + (1+0,15)t_{o2}(1-0,35) + (1+0,15)t_{o3}(1-0,35) + t_{o4}(1-0,35)} \quad (3.10)$$

где P_{Tb} – перспективная производительность процесса полировки поверхностей лопатки турбины.

Величины, указанные в выражении (3.10) имеют следующие значения: 0,15 – коэффициент увеличения времени выполнения предшествующей операции на 15 %, коэффициент 0,35 – уменьшение продолжительности полирования на 35%.

Действуя по аналогии преобразования выражения (3.8) в выражение (3.9), выражение (3.10) отобразит перспективную производительность в следующем виде:

$$P_{Tb} = \frac{1}{3,29t_o} \quad (3.11)$$

Учитывая полученные результаты в выражениях (3.9) и (3.11) относительная производительность созданного процесса повысится на 17,6 % как показано в выражении (3.12)

$$P_{Tb} = \left(\frac{P_{Ta}}{P_{Tb}} - 1 \right) 100\% = 17,6\% \quad (3.12)$$

Учитывая возможное изменение количества операций технологического процесса по полировке поверхности, создаваемое различными условиями, можно в общем виде представить относительную производительность в следующем виде:

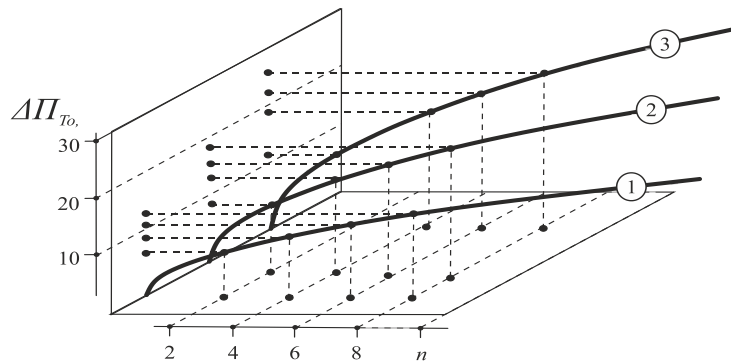
$$\Delta P_{T0} = \left[\frac{n}{(1+k_1) + (1+k_1)(1-k_2)(n-2) + (1-k_2)} - 1 \right] 100\% \quad (3.13)$$

где $\Delta\Pi_{T_0}$ – отображение величины относительной производительности в процентном соотношении;

n – количество операций полирования поверхностей пера лопатки;

k_1 – коэффициент увеличения продолжительности полирования на предшествующей операции (переходе, проходе);

k_2 – коэффициент уменьшения продолжительности полирования на всей технологической операции.



Расчет (3.13) будет объективен в случае если $n \geq 2$, а

Рисунок 3.5. График уровней $k_1 < k_2$ производительности

На графике (рисунок 3.5)

отображена перспектива в увеличении производительности чистовой обработки поверхности пера лопатки, в зависимости от перераспределения временных показателей на предшествующих и финишных операциях (переходах, проходах), которые отображаются в виде коэффициентов, а именно:

- график 1 – при $k_1 = 0,1$; $k_2 = 0,2$;
- график 2 – при $k_1 = 0,1$; $k_2 = 0,25$;
- график 3 – при $k_1 = 0,1$; $k_2 = 0,3$.

Данное графическое отображение зависимостей степени производительности от коэффициентов временного перераспределения подтверждает то, что принцип снятия максимального припуска может повысить эффективность технологического процесса совершенствования отделочно-упрочняющей обработки пера лопатки, на базе функционально-ориентированных технологий.

При внедрении данного принципа в качестве инструмента технологических решений, можно добиться повышения производительности в пределах от 5% до 25%. И это не является пределом. Дополнительно для компенсации ограничений можно, например, осуществить внедрение в проектирование технологического

процесса обработки лопаток турбин некоторых принципов системности сетевого планирования и управления [109], обеспечивающих оптимизацию процедуры создания технологий и реализации технических заданий, опираясь главным образом на принципы функционально-ориентированных технологий [72].

3.4. Особенности процесса полирования поверхностей пера лопаток турбин газотурбинных двигателей

Учитывая то, что особенности эксплуатации различных видов газотурбинных двигателей (ТВ2-117, ТВ3-117, ВК-2500, ГТЭС-2,5, ГТД-1000Т и др.) могут существенно отличаться, можно утверждать о необходимости создания универсальных технологий (процессов), обеспечивающих повышение ресурса деталей, работающих в сложных условиях.

Большинство традиционных технологий производства, ремонта и повышения ресурса лопаток турбин стремятся придать требуемые характеристики целиком всей детали, с учётом даже того, что полное их разрушение (покрытия, основного металла, комплексное) происходит не на всей поверхности, а только в определённых участках (зонах) [3, 16, 17]. Это связано с эксплуатационным воздействием действующих функций, в локальных участках поверхности, близкое к критическому по всем показателям (время, мощность, природа воздействий и т.д.), что приводит к явной неоднородности повреждений.

Для повышения ресурса лопаток турбин в данном исследовании рассматривается способ, основанный на нанесении защитного ФОП. С этой целью предлагается рассмотреть возможность применения функционально-ориентированных технологий и изучить особенности процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин, а точнее его части в виде выбора

технологического решения по полированию плоскости пера до и после нанесения защитного покрытия.

Для образца исследования выберем лопатку турбины, выполненной из жаропрочного никелевого сплава, например ЖС6К (ХН77ТЮР), устанавливаемой в реактивной двухступенчатой турбине компрессора двигателя ТВ3-117.

Условия работы лопаток сложные. Максимальная температура газа на входе в турбину компрессора двигателя ТВ3-117, может достигать 990°C , максимальная температура газа на выходе из этой турбины может достигать 650°C , ко всему этому, необходимо прибавить наличие большой концентрации механических элементов в виде пыли в газовой смеси.

Не стоит оставлять без внимания проблему появления твердых спекшихся пылевых отложений (размер частиц пыли до 1 мкм) на поверхностях сопловых и рабочих лопаток турбины ГТД-1000 (танки семейства Т-80). Конечно, наличие инерциальной системы очистки воздуха (около 97% очистки), вибрационной системы очистки отложений обеспечивает поддержание ресурса двигателя, но все же такая проблема существует, т.к. при температурном и механическом воздействии происходит нивелирование поверхности, что напрямую способствует налипанию песчаных расплавов [36].

В результате всех перечисленных факторов эксплуатации защитное покрытие лопаток турбин, наносимых традиционным способом, разрушается, и повреждения могут иметь следующий вид (рисунок 3.6). Штрихами на данном рисунке обозначены зоны переходных процессов разрушения (износа). Каждый

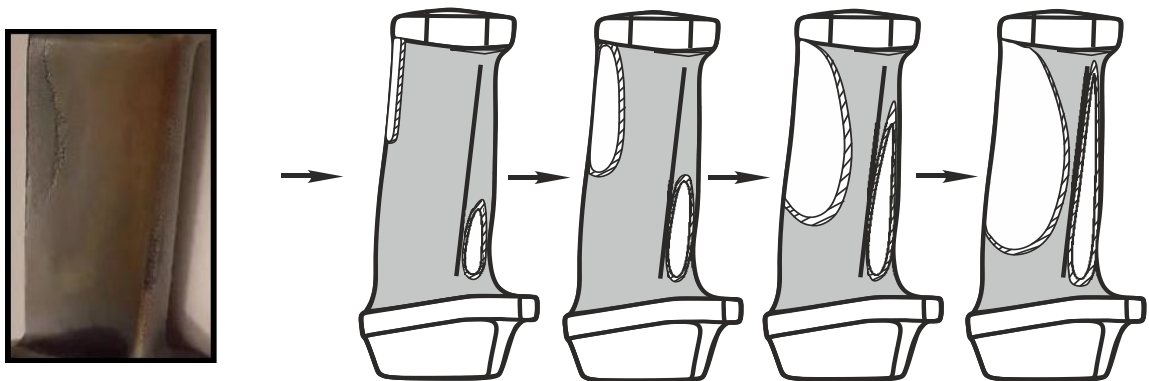


Рисунок 3.6. Последовательность разрушения пера лопатки турбины

такой случай возникновения повреждений требует выполнения наборов технологических операций (ремонта) по восстановлению лопатки перед напылением защитных покрытий. Здесь следует учитывать, что технологические решения обработки поверхности перед очередным нанесением защитного покрытия (ФОП, традиционного) должны ориентироваться на некоторые условия, описывающие последствия эксплуатационных воздействий, а именно (для данного варианта):

- защитное покрытие не разрушено полностью по толщине слоя;
- защитное покрытие разрушено полностью по толщине слоя в верхней части выходной кромки, в срединной части входной кромки;
- развивающаяся зона разрушения защитного покрытия от верхней части выходной кромки к нижней части входной кромки (диагонально).

Несмотря на тот факт, что направление движения газового потока происходит от входной к выходной кромке, развитие области разрушения происходит:

- на входной кромке от «центра температурной нагрузки» (между первой и второй третью высоты входной кромки) в сторону хвостовика и бандажной полки;
- в области выходной кромки от её верхней части к нижней части входной кромки (к хвостовику диагонально по корыту). Так же на поверхности корыта развиваются (прогрессируют) отдельные зоны разрушения защитного покрытия сложной геометрической формы (преобладают овалы и эллипсы).

На рисунке 3.6 видно, что при полировании поверхности в определённый момент механическое воздействие полировальника будет оказываться на зону, где полировке будет подвергаться одновременно и покрытие, и основной металл. При изучении именно этого момента технологической операции необходимо учитывать условие, которое указывает на особенность процесса, а именно разность показателей микротвёрдости материалов. Например, показатель микротвёрдости защитных покрытий (нитрид титановое, нитрид циркониевое и др.) в среднем может составлять $H = 21 \dots 30$ ГПа, а тот же показатель для сплава

на никелевой основе Ж6СК (ХН77ТЮР), применяемый в производстве лопаток турбин ГТД ТВ3-117, находится в пределах $H = 1,2 \dots 1,4$ ГПа.

В исследовании предлагается изучить особенности полирования и разработать технологическое решение процесса полирования поверхностей пера лопатки турбин для нанесения защитного ФОП. Создание такого процесса основывается на выборе решения, по средствам изучения условий, исходя из характеристик действующих эксплуатационных функций, свойств материалов, назначения изделий и т.д.

В работе для наглядности выбрана лопатка турбины, изготовленная из сплава Ж6СК (например ГТД ТВ3-117), с нанесённым защитным покрытием с микротвёрдостью $H = 21 \dots 30$ ГПа. Перечисленные характеристики и есть некоторые условия для выбора решения. С этой целью предлагается построить процесс следующим образом:

1. Изучить начальные условия, а именно особенности износа слоя (слоев) защитного покрытия.
2. Изучить специфику обработки абразивным инструментом поверхности лопатки.
3. Подготовить решения (варианты схем) выполнения полирования материалов с разными характеристиками.

Решая данные задачи необходимо отметить следующее. При обработке поверхности возможно возникновение ситуации, когда основной металл при полировании будет выполировываться сильнее в отличии от материала покрытия, имеющего повышенную (более чем в 20 раз) микротвёрдость. Данное явление возникает в связи с ориентированием процесса полирования на удаление именно материала покрытия, для чего необходимо удельное давление в 2,0 и более раз большее, на которое не рассчитан основной металл, находящийся в подлежащей зоне на границе сплав-покрытие.

В связи с чем, необходимо обеспечить:

- оптимизацию процесса обработки лопаток турбин с поверхностями имеющими различные свойства;

- обеспечения максимальной схожести параметров реальной поверхности материалов с различными свойствами;
- концентрацию воздействия полировального инструмента на зону поверхности с нанесенным покрытием.

Для этого предлагается два решения по обработке поверхности пера лопатки.

Первое, что может быть применено, это выполировка только материала покрытия путём направленного воздействия. Т.е. абразивный инструмент в момент воздействия на участок (зону) поверхности пера основное взаимодействие осуществляет с материалом покрытия и основным металлом в пропорциональном распределении по размерам пятна контакта (25% контакт с основным материалом лопатки, 75% контакт с материалом покрытия).

Для выполнения данной операции можно предположить несколько способов. Первый способ обработки поверхности деталей газотурбинного двигателя предлагался в работе [80].

В данном способе опорного полирования обеспечивается пропорциональное придание требуемых характеристик поверхности детали и в исследовании предлагается на данный момент взять его за основу, с ориентированием на особенности поверхностей пера лопатки турбины.

В тоже время в опорном полировании есть свои особенности, например, процесс изменения свойств полировального круга вследствие обратного функционально-ориентированного воздействия на него обрабатываемой поверхности. Износ поверхности полировальника при продолжительном использовании будет неравномерным, например, в случае использования схемы опорного полирования двух материалов.

В конечном счёте, необходимо будет увеличивать силу воздействия из-за износа (также обусловленного перекосом) той части полировальника, которая соприкасается с более прочным материалом. В этом случае, в общем, будет происходить неравномерный износ полировальника, вследствие наличия с одной стороны неоднородности свойств обрабатываемой поверхности, и с другой

стороны единообразия свойств рабочей поверхности полировального инструмента. Поэтому, в дополнение к способу полирования [80], в исследовании предлагается процесс полирования поверхности пера лопатки, в целях оптимизации, дополнить ещё одним вариантом схемы и примером обработки поверхности с применением ориентированного полировального инструмента.

В случае применения способа направленного воздействия или опорного полирования, который рассматривался в работе [80], полирование лопатки турбины может быть выполнено в двух схемах. На рисунке 3.7 показана первая схема установочного движения полировального круга с направлением вращения круга перпендикулярно движению.

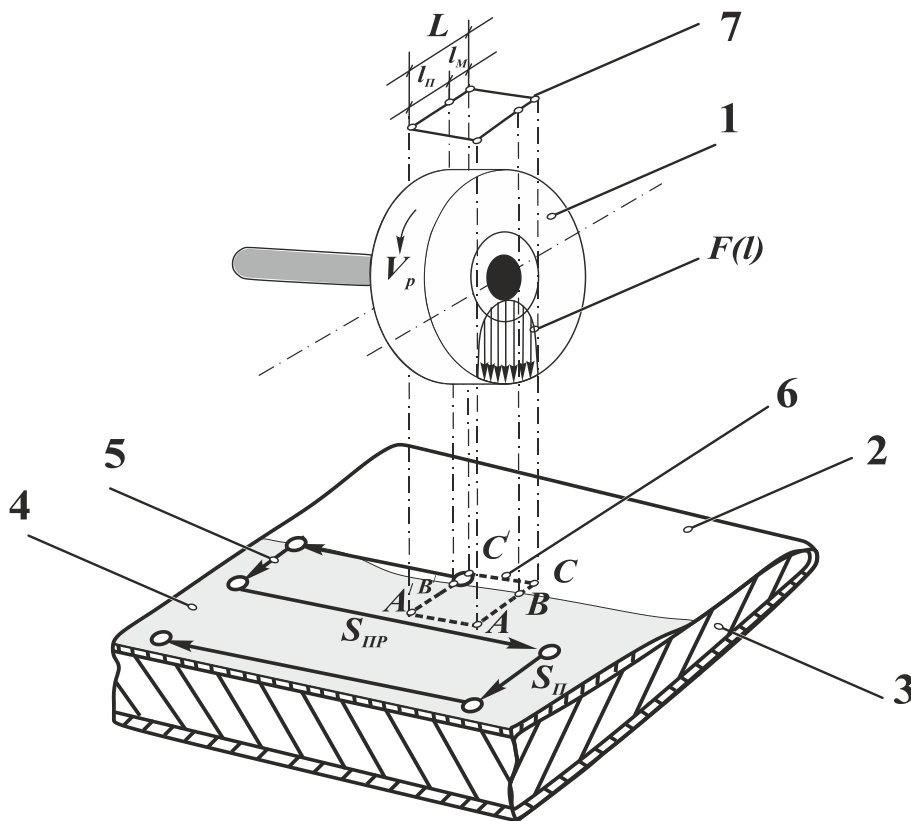


Рисунок. 3.7. Схема полирования покрытия корыта направленным воздействием с ориентированием продольной оси полировального круга по подаче s_o .

На данном рисунке для указания объектов и действий используются следующие обозначения: 1 – полировальный круг на эластичной связке (полиуретан, каучук, силикон и т.д.); 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; S_{II} – поперечная подача; S_{II} – продольная подача; V_P – скорость резания; $F(l)$ – распределение силового

воздействия полировальника на поверхность пера лопатки; 7 – проекция воздействия полировальника для указания размеров зон; S_{II} – поперечная подача; S_{II} – продольная подача; V_P – скорость резания; $F(l)$ – распределение силового

воздействия по пятну контакта; L – длина пятна контакта в данной плоскости; l_{II} – 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 3.6. В данных случаях абразивный инструмент в момент воздействия на участок (зону) поверхности пера основное взаимодействие осуществляет с материалом покрытия в зоне A, A', B', B (75%) и основным металлом в зоне B', C', C, B (25%), удельное давление в указанных зонах должно быть в отношении 2:1, т.е. давление на материал покрытия в два раза выше, чем на материал лопатки. Это обусловлено характеристикой материалов для случая, где микротвердость материала покрытия $H = 21 \dots 28$ ГПа, а тот же показатель для сплава на никелевой основе (ЖС6К, ХН77ТЮР и др.) составляет $H = 1,1 \dots 1,3$ ГПа..

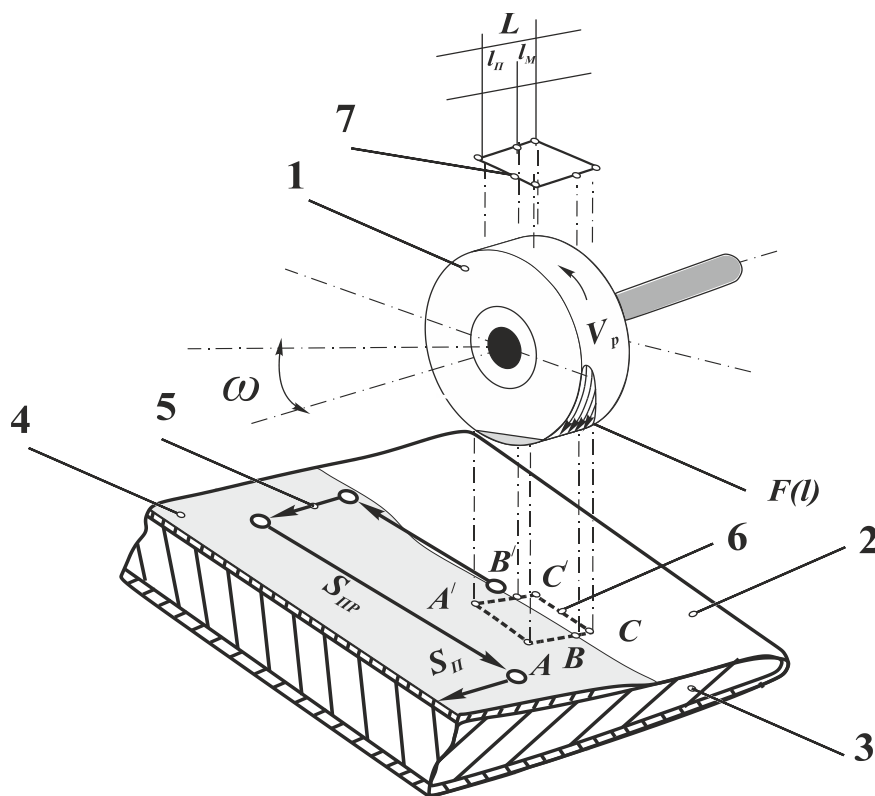


Рисунок. 3.8. Схема полирования покрытия корыта направленным воздействием с ориентированием продольной оси полировального круга перпендикулярно подаче s_o и перекосом ω .

На рисунке 3.8 показана вторая схема установочного движения полировального круга с направлением вращения круга параллельно движению. На данном рисунке для указания объектов и действий используются следующие обозначения: 1 – полировальный круг на эластичной связке (полиуретан, каучук, силикон и т.д.); 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; S_{II} – поперечная подача; S_{III} – продольная подача; V_P – скорость резания; $F(l)$ – распределения силового воздействия по пятну контакта; L – длина пятна контакта в данной плоскости; l_{II} – длина пятна контакта на покрытии; l_M – длина пятна контакта с материалом лопатки; ω – угол наклона продольной оси полировального круга относительно обрабатываемой поверхности пера лопатки; A, A', B', C', C, B – пятно контакта полировальника с обрабатываемой поверхностью. Схема полирования спинки пера аналогична схеме, представленной на рисунке 3.8. В данных случаях абразивный инструмент в момент воздействия на участок (зону) поверхности пера основное взаимодействие осуществляет с материалом покрытия в зоне A, A', B', C

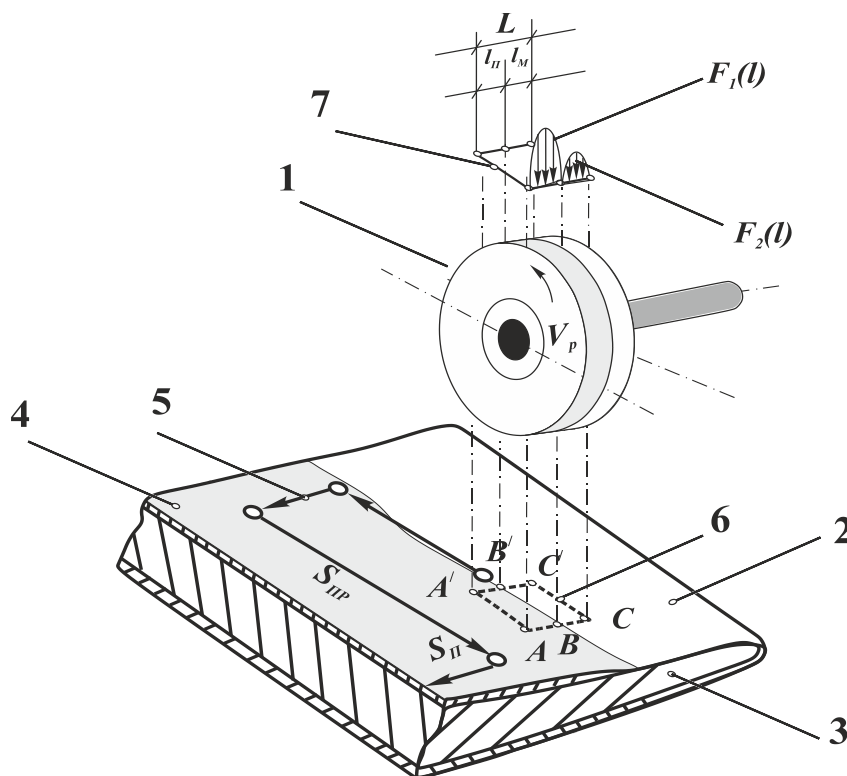


Рисунок. 3.9. Схема полирования покрытия корыта полировальником с функционально-ориентированными свойствами с ориентированием продольной оси полировального круга перпендикулярно подаче s_o .

(75%) и основным металлом в зоне B', C', C, B (25%).

В качестве еще одной операции процесса полирования поверхностей пера лопаток турбин (рисунок 3.9) можно предложить использование полировальника с функционально-ориентированными свойствами (ПФОС). Данное направление (применяемые шлифматериалы, величина диска, размер зерен, степень твердости,

связующее вещество, класс неустойчивости, структура, скорость вращения и т.д.) в этом исследовании не раскрывается в полной мере, а предлагается как основа для выполнения дальнейших исследований. На рисунке 3.9 для указания объектов и действий используются следующие обозначения: 1 – полировальный круг с функционально-ориентированными свойствами; 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 $F_2(l)$ – распределение 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; ω – угол наклона продольной оси полировального круга относительно обрабатываемой поверхности пера лопатки; A, A', B', C', C, B – пятно контакта полировальника обрабатываемой поверхностью. Схема полирования спинки пера аналогична схеме представленной на рисунке 3.9. В данных случаях абразивный инструмент в момент воздействия на участок (зону) поверхности пера основное взаимодействие осуществляет с материалом покрытия в зоне A, A', B', B (75%) и основным металлом в зоне B', C', C, B (25%) за счет механических свойств полировального круга, матрица которого может быть изготовлена из различных эластичных материалов (полиуретан, силикон, каучук, эпоксидные и полиэфирные смолы) с добавлением различных абразивных присадок.

Перечисленные способы позволяют придать поверхности требуемые технологией параметры, даже при учете наличия особенностей в виде одновременной обработки различных по свойствам материалов.

По результатам проведенных исследований определено следующее:

1. В данной части работы изучены особенности разрушения поверхности пера лопаток (покрытий), которые выражаются в появлении зон (участков), где прослеживаются разрушения поверхности покрытия и основного металла тела пера лопатки.

2. Рассмотрены и исследованы подходы в обработке поверхности пера лопатки турбины, состоящей из различных по свойствам материалов с целью ее подготовки к нанесению покрытия.

3. В ходе исследования предложены варианты схем полирования поверхности пера лопаток с учетом их материального состава, где различные материалы имеют отличающиеся показатели твердости.

4. Разработаны рекомендации по обеспечению приблизительного сходства параметров (шероховатость, волнистость и т.д.) обработанной поверхности из различных материалов способом опорного полирования или с применением специального инструмента.

3.5. Выводы

В результате проведенных исследований получено следующее:

1. Результаты изучения начальных условий, определили особенности, на которые обращается особое внимание при подготовке поверхности пера лопаток турбин, к нанесению защитного покрытия. Рассмотренный вариант модели подбора решений на основании начальных условий, указывает на то, что процесс создания структуры каждой стадии технологического процесса подготовки поверхности управляемый, а сам процесс типовой.

2. Изучена и определена физическая сущность процесса подготовки поверхностей пера лопатки турбины. В ходе определения установлено, что процесс воздействия полировального инструмента на поверхность пера есть составляющая множества различных по природе (назначению) факторов. Здесь, в процессе исследования, установлено наличие: химических процессов, возникающих в результате взаимодействия материалов покрытия и пера лопатки

при полировании, абразивное резание, диспергирование, пластичное деформирование, воздействие переменной температуры, появление механических разрушений поверхностного слоя и т.д. В общем, в пятне контакта данные факторы могут в комплексе оказывать воздействие с переменной степенью мощности, которая в свою очередь может определяться возможными режимами полированиями, параметрами и т.д.

3. Для улучшения производительности и качества процесса полирования в данном исследовании предлагается принцип снятия максимального припуска с поверхности заготовки на предшествующей операции (переход, проход). Данный принцип упрощает и повышает эффективность процесса обработки за счет придания минимальных по допуску характеристик обрабатываемой поверхности на предшествующем переходе, где процесс обработки более как экономически, так и технически приемлем. Данный подход позволяет повысить производительность процесса подготовки поверхности до 18% по сравнению с общепринятыми способами.

4. В качестве основного способа выполировки остаточных следов и слоев покрытия с поверхности пера лопатки турбины предложен способ опорного полирования, и как дополнительный способ – использование функционально-ориентированного полировального инструмента. Схемы и принцип использования полировального инструмента на фоне изученных начальных условий позволят обеспечить обработку и придание поверхности выполненную из различных по свойствам материалов (из двух, трех и т.д.) максимальную схожесть параметров шероховатости.

5. Создана основа для разработки метода совершенствования функционально-ориентированного материального обеспечения процесса повышения ресурса лопаток турбин с целью формирования направления для последовательного и системного подбора материальных, энергетических, и информационных ресурсов (потоков), что обеспечивает типизацию создаваемого процесса повышения ресурса лопаток турбин и может быть применено для любых возможных видов ГТД (приложение В).

РАЗДЕЛ 4**КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГТД****4.1. Основы метода нанесения функционально-ориентированных покрытий
на лопатки турбин**

Повышение ресурса деталей на основе нанесения защитных покрытий, это один из множества способов улучшения качества и надежности [3,7,71]. При осуществлении таких процессов возникает немалое количество разных проблем, обусловленных особенностями эксплуатации производимой или восстанавливаемой детали.

В помощь технологам при реализации процессов данного направления вступают прогрессивные технологии, обеспечивающие улучшение свойств деталей, например, за счёт применения защитных ФОП [72, 73, 75, 91, 131, 133].

Среди существующих на данное время покрытий можно обобщенно выделить наиболее известные, такие как металлические, интерметаллидные, композиционные, комплексные, комбинированные. Все эти типы покрытий могут состоять как из одного слоя, так и из нескольких слоев (модулей) [84, 85, 103].

Также как и перечень указанных типов покрытий, довольно широкое применение нашли способы для их нанесения [1, 128], например, такие как ионно-плазменное напыление, химическое и физическое осаждение (HT-CVD, PVD), электроискровое легирование, наплавка и т.д.

Для последовательности в процессе исследования еще раз рассмотрим общие виды разрушений:

1. Локальные зоны износа (покрытия, основного материала) лопатки турбины.

2. Неравномерные коррозионные и эрозионные, а также иные сложные разрушения реальной поверхности лопатки.

3. Снижение прочности поверхностного слоя контактирующего под нагрузкой.

4. Изменения характеристик материалов покрытия и основного металла под действием температурных диффузионных процессов.

Разнородные по силе, продолжительности и природе эксплуатационные воздействия на поверхности пера (реальная поверхность, материал покрытия и

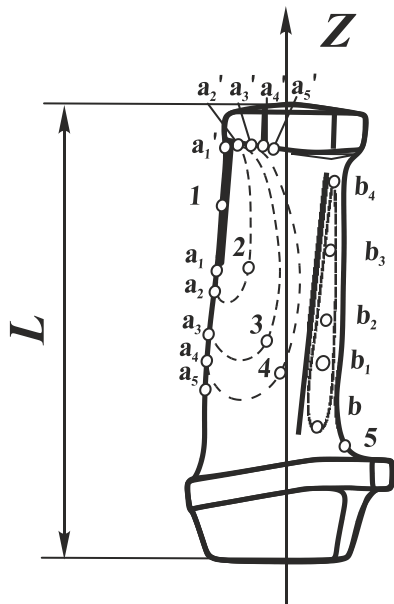


Рисунок 4.1. Схема разрушения поверхности пера лопатки турбины

основной сплав) в общем можно разделить на температурные, механические, химические, комплексные и т.д. Схема разрушения поверхности пера лопатки турбины представлена на рисунке 4.1 (вариант).

Для того, чтобы лучше понять процесс разрушения, рассмотрим его последствия, изучив поверхность лопатки турбины прошедшей определённый срок эксплуатации.

На рисунке 4.1 видно несколько поверхностей, на которых происходит разрушение в виде плоских и объёмных геометрических форм (линий, эллипсов и т.д.). Здесь обозначено: 1, 2, 3, 4, 5 – направление прогрессирующего разрушения корыта; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a'_1, a'_2, a'_3, a'_4, a'_5$ – зоны последовательного разрушения общей зоны a ; b, b_1, b_2, b_3, b_5 – направление разрушения покрытия в общей зоне b . На кромках распространение разрушения покрытия происходит одновременно в разных направлениях, так, начало полного разрушения покрытия и основного металла на выходной кромке пера имеет вид широкой линии, далее повреждение покрытия расширяется до поверхности корыта, и так разрушение

происходит до поверхности, охватывающей входную кромку. Дополнительно на поверхности входной кромки просматривается разрушение покрытия в области, имеющей форму неправильного эллипса (область по решению технолога может увеличиваться, уменьшаться, изменять направление, форму и т.д.). Такой геометрический набор характерен только для данного случая, обусловленного видом лопатки, материалом самой лопатки, материалом покрытия, методами нанесения покрытия, продолжительностью эксплуатации и т.д.

Перейдем к подходу и принципам нанесения ФОП лопаток турбины ГТД. Множество эксплуатационных функций воздействуют на лопатку при ее использовании, при этом нагрузки действуют не равномерно. Любая поверхность, участок, зона воздействия удельных напряжений имеет конкретные

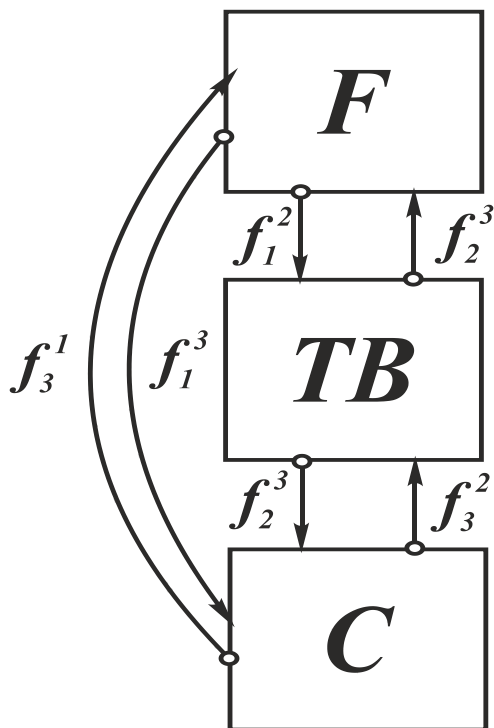


Рисунок 4.2. Модель взаимосвязей f_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия $ТВ$ и свойства $С$ лопатки турбины ГТД

топологические характеристики, как и функция, оказывающая на нее воздействие. При данных обстоятельствах для того, чтобы обеспечить ФОС поверхностям лопатки турбины, важно установить соответствия, изучив и отрегулировав взаимосвязь между действующими факторами сил F , набором технологических воздействий, способных придать требуемые свойства $ТВ$ и совокупность требуемых свойств $С$ изделия. Модель взаимосвязей представлена на рисунке 4.2.

Указанная взаимосвязь между перечисленными факторами должна заключаться в: подобии, идентичности, аналогии, соответствия, адекватности, эквивалентности и т.д. [72]. ФОП реализуются, основываясь на данных связях [32]. Фактически замкнутый цикл взаимосвязей

и отношений в указанной модели создает

платформу для создания технологии и покрытий.

С учетом выше рассмотренного можно определить перечень основных требований к свойствам ФОП для лопаток турбин:

1. Свойства с переменным ориентированием (равномерные, неравномерные, градиентные и т.д.) в проекции действия функции на реальной поверхности или по свойствам состава поверхностного слоя пера лопатки.

2. Свойства со ступенчатым ориентированием (по направлению, по форме, по размеру и т.д.) в проекции действия функции на реальной поверхности или по свойствам состава поверхностного слоя пера лопатки.

3. Свойства с зонально изменяющимся ориентированием (зоны, микро зоны, макро зоны и т.д.) в проекции действия функции на реальной поверхности или по свойствам состава поверхностного слоя пера лопатки.

4. Свойства со специальным ориентированием в проекции действия функции на реальной поверхности или по свойствам состава поверхностного слоя пера лопатки.

Создаваемые ФОП на фоне переменных показателей, как по структуре действующих функций, так и по их параметрам должны обеспечивать следующие качественные показатели детали:

1. Увеличение ресурса эксплуатации в сложных (расчётных) условиях эксплуатации.

2. Увеличение жизненных циклов детали за счёт обеспечения возможности неоднократного восстановления.

3. Разноуровневая равноэффективная защита поверхности детали с применением различных видов покрытий для обеспечения равномерного износа.

4. Перспективность применения лопаток турбин, основанная на наличии специальных свойств и мер полезности.

4.2. Конструкторское и технологическое обеспечение нанесения функционально-ориентированных покрытий

Процесс нанесения защитных покрытий для лопаток турбин ГТД на базе функционально-ориентированного подхода можно обеспечить с помощью следующих методов:

1. Нанесение ФОП способом ионно-плазменного напыления [75, 77, 125].
2. Нанесение ФОП способом детонационного напыления.
3. Другие способы.

В данном исследовании для примера предлагается использовать метод ионно-плазменного напыления нитрид циркониевого ФОП, для нанесения абразива-эрозионно-жаростойкого покрытия (АЭЖП). Данный процесс рассмотрим более подробно.

На рисунке 4.3. представлен процесс последовательного разрушения защитного покрытия и основного металла лопатки турбины (позиция 0) и

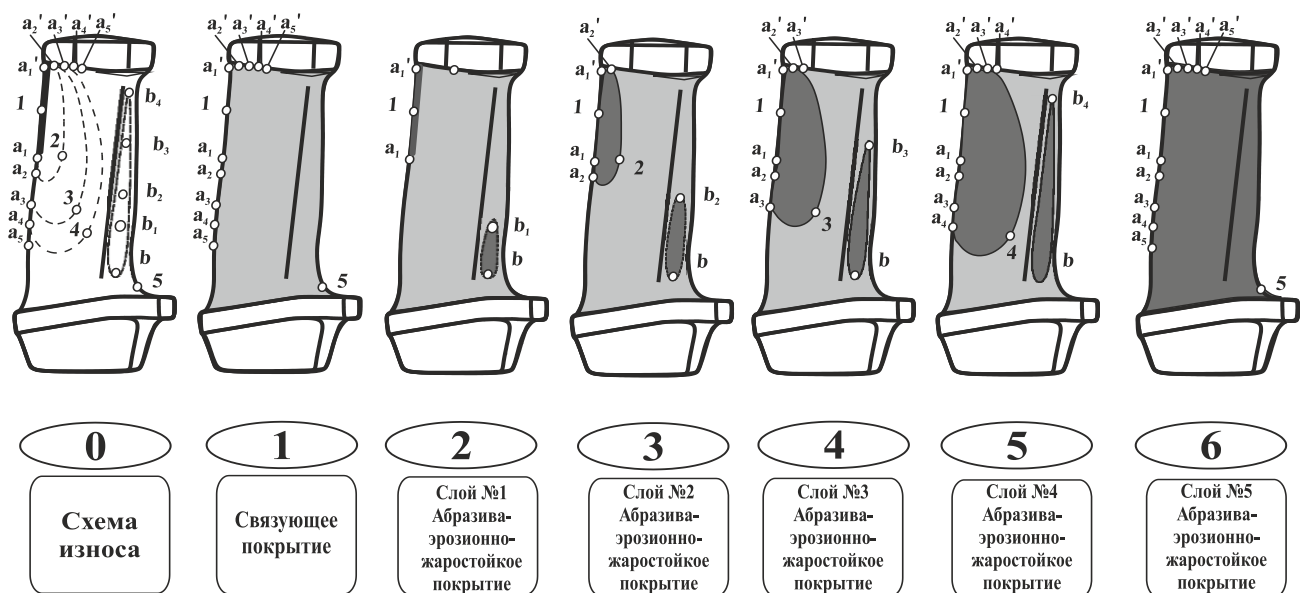


Рисунок. 4.3. Схема последовательности нанесения ФОП

параллельно показан вариант схемы нанесения защитного нитрид циркониевого ФОП.

На данной схеме (позиция 0) видно несколько поверхностей, на которых происходит разрушение в виде плоских и объёмных геометрических форм (точек, линий, эллипсов и т.д.). Можно определить, что для данного случая разрушению подвержены два функциональных элемента: входная кромка и выходная кромка, а также происходит прогрессия разрушения по корытцу. На кромках распространение разрушения покрытия происходит одновременно в разных направлениях, так, начало полного разрушения покрытия и основного металла на выходной кромке пера имеет вид широкой линии $a_1 - I - a_1'$, далее повреждение покрытия расширяется до поверхности корыта $a_2 - 2 - a_2' - a_1' - I - a_1 - a_2$ и так разрушение происходит до поверхности, обозначенной как $a_5 - 5 - a_5' - a_4' - a_3' - a_2' - a_1' - I - a_1 - a_2 - a_3 - a_4 - a_5$ (зона a может расширяться в сторону входной кромки). Дополнительно на поверхности входной кромки просматривается 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.). Такой набор особенностей разрушений и последовательности нанесения АЭЖП характерен только для данного случая, обусловленного различными характеристиками лопатки и условиями эксплуатации.

На основании рассмотренных особенностей воздействий, многослойное ФОП будет формироваться посредством поочередного нанесения каждого слоя (модулей для многомодульных покрытий) по указанным пунктирным линиям границ последовательного разрушения (рисунок 4.3. позиция 0) в зоне a и зоне b . После нанесения покрытия на указанные зоны происходит нанесение покрытия на всю поверхность пера лопатки. Принципы [72], которые обеспечат требуемые свойства ФОП, могут иметь следующее отображение и значения:

- первое из них определяет вид технологического воздействия или свойство пера лопатки, которое нужно выполнить или обеспечить в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции, [72]

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} : F &\rightarrow TB ; \\ \varphi_{12} : TB &\rightarrow C ; \\ \varphi_{13} : C &\rightarrow F , \end{aligned} \right\} , \quad (4.1)$$

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

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

φ_{13} – отображение (преобразование) свойств C в технологические воздействия TB ;

- второе определяет пространственное положение, в котором нужно реализовывать технологические воздействия и где будут обеспечены необходимые свойства пера лопатки, [72]

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} : G(F) &\rightarrow G(TB) ; \\ \varphi_{22} : G(TB) &\rightarrow G(C) ; \\ \varphi_{23} : G(C) &\rightarrow G(F) , \end{aligned} \right\} , \quad (4.2)$$

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

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

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

- третье отображение определяет, сколько видов, типов или вариантов технологических воздействий нужно реализовать на изделие в процессе его изготовления и при этом обеспечить множество свойств, [72]

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{31} : M(F) &\rightarrow M(TB); \\ \varphi_{32} : M(TB) &\rightarrow M(C); \\ \varphi_{33} : M(C) &\rightarrow M(F), \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

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

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

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

Учитывая то, что одной из основ нанесения специального ФОП является принципиальное ориентирование технологических воздействий на обрабатываемую поверхность, важным фактором при создании покрытия является необходимость использования экранирующих шаблонов, способных обеспечить топологическое распределение свойств и размерностей каждому слою.

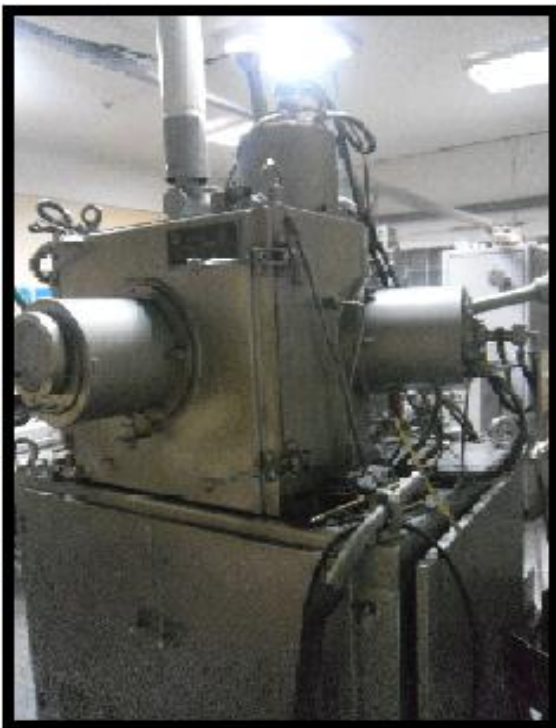


Рисунок. 4.4. Установка ННВ 6.6.-И1

Данные шаблоны также разрабатываются на основании выражений (4.1), (4.2) и (4.3).

Реализация процесса нанесения ФОП возможна за счёт применения специально созданных промышленных установок, например:

1. Установка ННВ 6.6.-И1, прошедшая определённую доработку с целью модернизации. На ее базе осуществляется нанесение ионно-плазменных ФОП (рисунок 4.4.).

2. Специально разработанная и сконструированная детонационная установка и др.

Следует также учесть, что используемые традиционные установки для нанесения защитных покрытий должны пройти определенные процедуры модернизации и совершенствования для приобретения возможности формировать покрытия с ФОС на деталях сложной (специфической) геометрии.

4.3. Процесс подготовки поверхностей пера лопатки турбины к нанесению защитного покрытия

Для обеспечения готовности поверхности лопатки турбины к нанесению специального защитного покрытия может применяться множество единичных методов или целых комплексов. В данной работе за основу предварительной подготовки поверхности к непосредственному нанесению покрытия предложено использовать метод ультразвуковой обработки. Данный метод достаточно эффективно работает при выполнении очистки лопаток турбин от различного рода загрязнений.

Основой метода ультразвукового воздействия с целью очистки поверхности является применение установок, в составе которых используется ультразвуковой колебательный контур. Частотный диапазон колебаний электромагнитных волн, применяемых в установке, находится в пределах от 16 кГц до $10^9 \dots 10^{13}$ Гц, т.е. верхний предел указанных частот находится на уровне гиперзвуковых волн общего спектра существующих электромагнитных колебаний. Обобщая приведённую выше информацию и исследование, рассматриваемое в [38], можно сказать, что применение ультразвука при выполнении обработки поверхности практически обосновано. В связи с этим, можно сказать, что дальнейшая работа в области исследования ультразвуковых колебательных процессов, с целью выполнения подготовки поверхности лопатки турбины к нанесению защитных

покрытий, имеет достаточный интерес и перспективу в направлении совершенствования.

В данном исследовании предлагается выполнить обработку лопаток турбины в специально спроектированных и сконструированных ультразвуковых ваннах. Указанная установка представлена на рисунке 4.5. На базе данной установки, возможно осуществлять комплексную обработку лопаток турбин, где для возбуждения ультразвуковых колебаний применяется генераторная установка УЗГ 3-4 с преобразователями ПСМ 2,5-18.

Ванные ультразвуковой очистки (рисунок 4.5.) сконструированы специально для выполнения очистки лопаток турбин ГТД. Для обеспечения процесса очистки (обезжиривания) подготавливается химически активная жидкость, имеющая рабочую температуру в пределах от 50 до 60 °С. Состав жидкости: натрий трехзамещенный фосфорнокислый – 30-40 г/л, сода техническая (натрия карбонат) – 20-30 г/л, ОП-7 (ОП-10) – 4 г/л.

В качестве дополнения к процессу обезжиривания целесообразно выполнять обработку поверхностей, применяя при этом последовательно «Нефрас С2-80/120, С3-80/120» ТУ 38.401-67-108-92 и ректификат спирта этилового.



Рисунок. 4.5.
Ультразвуковая установка для обработки лопаток

С целью повысить эффективность процесса обработки в ультразвуковой ванне, было подготовлено специальное кассетное устройство для комплексного размещения набора лопаток турбины. Положения установки лопаток турбин в устройстве крепления имеют многоуровневый формат. На первом уровне устанавливаются рабочие лопатки ступеней турбины, на втором и третьем предусмотрена установка лопаток соплового аппарата турбины.

Результативность производственного процесса обработки лопаток турбин ультразвуком может быть рассчитана на уровне цикловой производительности и имеет следующее математическое отображение:

$$P_{\text{ц}} = \frac{\iiint_V dx dy dz}{(t_o + t_p) \iiint_{V_0} dx_0 dy_0 dz_0} \quad (4.4)$$

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

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

$\iiint_{V_0} dx_0 dy_0 dz_0$ – элементарный объем одной рабочей позиции;

t_o – основное время ультразвуковых воздействий;

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

Учитывая данные о высоте загрузки ультразвуковой ванны, наличие разрушения образца-свидетеля (алюминиевая фольга), который подтверждает работу ультразвукового воздействия и его особенности (характеристики), выбирается время выполнения обработки ультразвуком лопаток турбин.

На основании произведенных испытаний процесса обработки с образцами-свидетелями сделан вывод, что качественная очистка поверхности лопаток турбин соответствует продолжительности, при которой 90 % поверхности индикатора в виде листа алюминиевой фольги подверглось разрушению.

В качестве примера можно рассмотреть следующее, если высота загрузки ванны лопатками турбины будет составлять $H = 0,2$ м, то можно рассчитать время обработки. Указанный временной интервал составит 6 мин.

Требуемая продолжительность ультразвукового воздействия при обработке на лопатки турбины можно определить, используя следующую формулу:

$$t_s = T(D), \quad (4.5)$$

где t_s – требуемая продолжительность ультразвукового воздействия;

$t(D)$ – продолжительность воздействий в зависимости от уровня расположения по высоте деталей.

Предложенный к рассмотрению выше график 4.6. построен с ориентированием на условие, при котором разрушение образца-свидетеля (алюминиевой фольги) произошло практически до 90% по уровню химически активного вещества, находящегося в ванне на протяжении определенного времени воздействия ультразвука.

Опираясь на проведенные испытания ультразвуковой обработки, появилось четкое определение возможностей данной установки. Выявлено, что при достижении уровня разрушения алюминиевой фольги в 90% происходит удаление с обрабатываемой поверхности лопаток турбин остатков загрязнений (пленок различной природы). В этом случае применение графика 4.6 можно считать теоретически и практически обоснованным.

На следующем рисунке 4.6. представлены результаты воздействия ультразвуковых колебаний и химически активной среды на поверхность алюминиевой фольги при испытании ультразвуковой ванны. В качестве



а)

б)

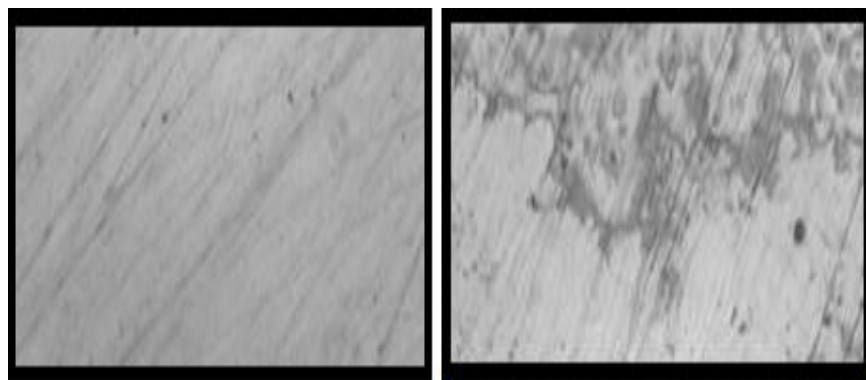
в)

Рисунок 4.6. Алюминиевая фольга после ультразвуковой обработки (расстояние до поверхности магнитострикционной головки 0,1 м, частота колебаний 18 кГц): а – до обработки, б – обработка 60 с, в – обработка 120 с

начальных условий для проведения опыта был выбран уровень загрузки в 0,1 м, частота электромагнитных колебаний 18 кГц.

На вышеуказанном рисунке отображено следующее: рис. 4.6,а – поверхность фольги не подвергшаяся обработке; 4.6,б – длительность электромагнитного воздействия составила 60 секунд; 4.6,в – длительность электромагнитного воздействия составила 120 секунд.

Следующим этапом изучения возможностей и определения целесообразности применения при обработке поверхности лопаток турбин ультразвуковой установки стал этап изучения последствий воздействия ультразвуковых волн и химически активной среды непосредственно на поверхность лопаток.



а)

б)

Рисунок 4.7. Полированные поверхности, материал ЖС6К (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 этой целью было выполнено исследование результатов работы ультразвуковой установки на лопатки турбины, выполненные из жаропрочного сплава на никелевой основе ЖС6К.

Результаты исследования отображены на рисунке 4.7, где на прошедших полирование (глянцевание)

поверхностях заготовок из указанного выше сплава, при увеличении в $\times 150$ раз можно увидеть следующее: 4.7,а – поверхность без ультразвукового воздействия; 4.7,б – электромагнитное воздействие (18 кГц) осуществлялось продолжительностью в 120 секунд с уровнем загрузки в 0,1 м.

Опираясь на полученные результаты обработки можно опять же утверждать, что выполнение ультразвуковой обработки лопаток турбин перед технологической операцией по нанесению специального, защитного ФОП является основной и наиболее эффективной для очистки поверхности перед применением ионно-плазменного напыления. В случае невозможности выполнить ультразвуковую обработку лопаток турбин или невозможности выдержать предложенные в данном исследовании режимы, качество нанесенного ФОП не

будет соответствовать заложенным в данной работе перспективам повышения ресурса деталей.

4.4. Структура типового технологического процесса нанесения покрытий на лопатки турбин

При создании различного рода технологических процессов уровень сложности, многовариантности, эффективности будет зависеть от требований, запросов, возможностей, обеспечения одним словом начальных условий и т.д.

В связи с этим, для изучения особенностей создания технологического процесса, направленного на повышение ресурса лопаток турбин ГТД в данном исследовании предлагается рассмотреть процесс синтеза его структуры [81].

Основываясь на трудах, изложенных в [72], можно утверждать, что сам процесс напыления специального ФОП на поверхность лопатки турбины с применением ионно-плазменной установки – это реализация функции φ при преобразовании N множества входных потоков информации, времени, материальных ресурсов $V = \{V_k\}$ в множество продуктов технологии $W = \{W_m\}$. Такую последовательность можно описать выражением $\varphi : \{V_k\} \rightarrow \{W_m\}$.

Для того чтобы представить на начальном этапе сущность создаваемого процесса необходимо учесть тот факт, что технологические операции – это некая совокупность действий одного процесса $T = \{t_1, t_2, \dots, t_s\}$ и связей (отношений) между ними $A = \{a_1, a_2, \dots, a_x\}$. Далее можно составить математическое отображение самой структуры технологического процесса, которое будет представлением множества множеств T и A , и иметь следующий вид:

$$Str_T = \{T, A\}, \quad (4.6)$$

где Str_T – структура технологического процесса;

T – множество технологических операций (подпроцессов);

A – множество связей (отношений).

Создание структуры технологического процесса для нанесения защитных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбины является важной процедурой. Сформированная структура технологического процесса или же сам процесс будет реализовывать свое предназначение по преобразованию заготовок в изделия по установленному алгоритму. Разработка алгоритма также является важной задачей при проектировании технологического процесса. Алгоритм, разработанный для реализации технологического процесса, можно сказать, является универсальной основой системы управления, процесса повышения ресурса изделий. Универсальность его заключается в том, что каждый его шаг, часть или весь алгоритм в целом может быть реализован различными способами, методами, операциями, технологиями и т.д.

В продолжение исследования и формирования структуры технологического процесса следует определиться с таким понятием как отношения (связи), которые упомянуты выше. Их сущность и возникновение уровня соответствий можно определить на основе трудов [70].

Математические функции, предлагаемые для представления отношений – это подход, который основывается на исследовании зависимости самой функции от существующей переменной, т.е. математические функции применяются для описания отношений между частями (элементами) процесса со строго определенными взаимоотношениями.

Отношения пространственного характера описывают и определяют масштабы и пространственное положение (взаимное положение) структурной единицы (единиц) технологического процесса.

Отношения временного характера формируют правильную (эффективную) хронологическую последовательность. Кроме данных основ при формировании структуры и алгоритма технологического процесса следует опираться также на изучение (применение) отношений на уровне теории множеств и т.д.

С целью лучшего восприятия действий по формированию структуры технологического процесса нанесения защитных покрытий на лопатки турбины можно рассмотреть некоторый абстрактный объект (схема) $G(T, A)$, где T – множество технологических операций; A – множество отношений. Понятийный аппарат, способы применения графов и т.д. при построении структуры технологического процесса более подробно изложены в [70].

На рисунке 4.8 отображен абстрактный объект в виде схемы представляющей структуру типового технологического процесса нанесения защитного покрытия на лопатки турбины ГТД.

На данном рисунке отображено множество технологических операций t_1, t_2, \dots, t_{10} , где 10 – установленное количество технологических операций. Изображенные стрелки обозначены как a_1, a_2, \dots, a_x , где x – множество связей между технологическими операциями технологического процесса. Интерпретация ребер может иметь следующий вид $a_y = a_i^j$, где i – любая выполняемая технологическая операция, а j – любая планируемая технологическая операция.

Предложенная на рисунке 4.8 схема технологического процесса нанесения защитных вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбины применима для любого технологического процесса (с любой структурой), связанного с повышением ресурса указанных деталей, т.е. является универсальным.

Манипуляции при выборе способов и методов реализации технологического процесса могут проводиться в следующем диапазоне перечня технологических операций:

- выполнение подготовки (очистки) поверхности лопатки турбины воздействием энергии тлеющего разряда t_3 ;
- газовое насыщение поверхности лопатки турбины t_4 , (элемент A (рисунок 4.8));

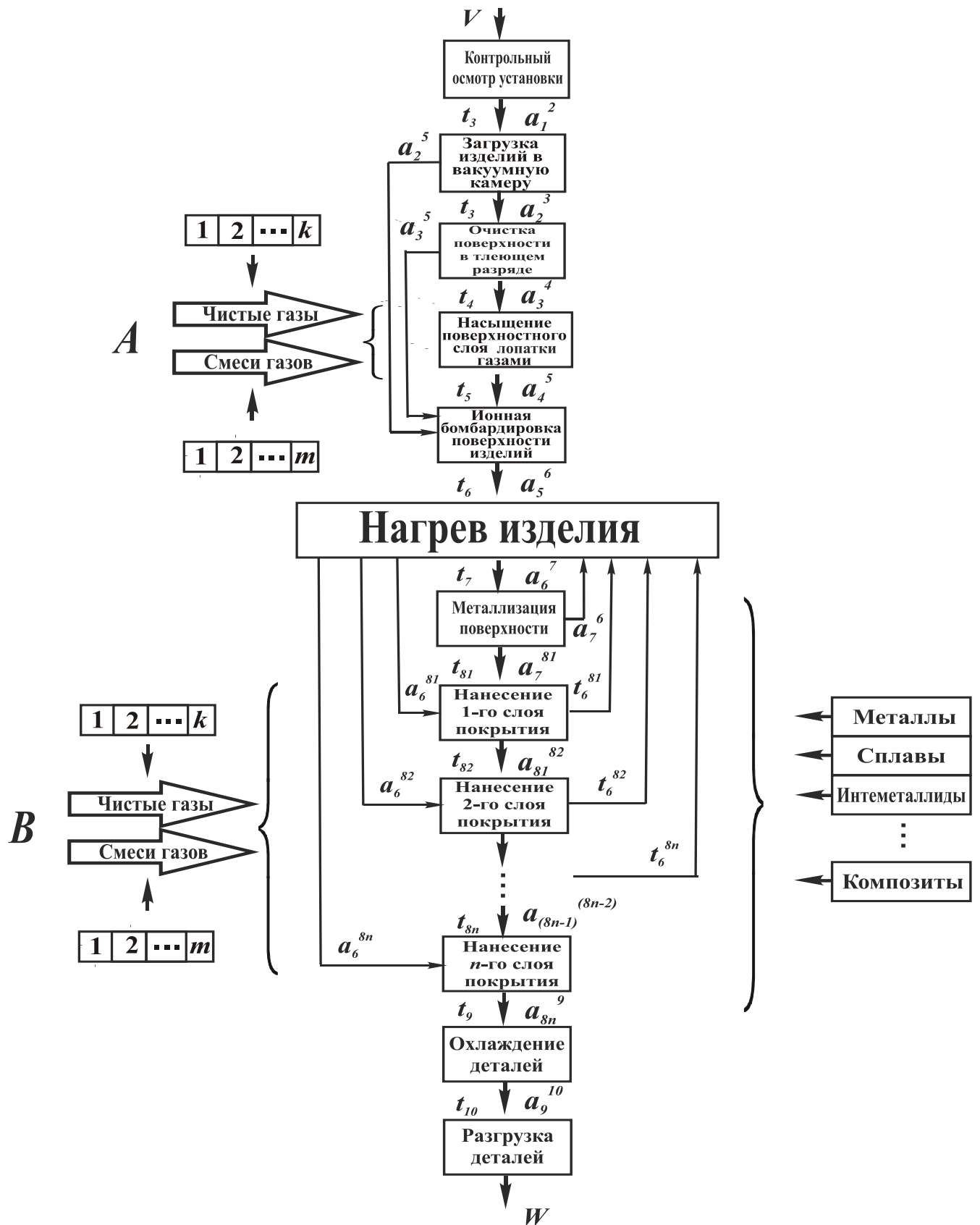


Рисунок 4.9. Схема типового технологического процесса обработки лопатки турбины

- насыщение поверхности лопатки турбины металлами (металлы однородного состава, сплавы, интерметаллиды, керметы, и т.д.) с выбором соответствующего катода (набора катодов);

- послойное нанесение защитного покрытия с вариацией материалов катодов и газов (газовых смесей) (элемент *B* (рисунок 4.8)).

Создавая необходимый набор параметров технологического процесса нанесения защитных вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбины, можно спроектировать необходимый набор вариантов технологических процессов повышения ресурса деталей.

Также, с целью добиться повышения технологичности и уровня качества обрабатываемых деталей, необходимо рационально выполнять уже непосредственно синтез существующих вариантов технологических процессов, которые наиболее продуктивны в направлении повышения ресурса лопаток турбин путем нанесения защитных ионно-плазменных покрытий.

Для восприятия данных выводов проведена следующая работа.

Рассматривая абстрактное отображение процесса проектирования технологии, в виде схемы, представленной на рисунке 4.9, можно данную работу разделить на этапы.

На первом этапе технологический процесс будет состояться из технологических операций, условно обозначенных множеством $t_A = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$, на втором этапе технологический процесс будет состояться из технологических операций, условно обозначенных множеством $t_B = \{t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}\}$.

Исследуем некоторые особенности формирования структуры технологического процесса.

Один из вариантов структуры первого этапа технологического процесса обработки деталей рассматривается на рисунке 4.9. Здесь указано: на рисунке 4.9,а – структура технологического процесса с полным составом операций, на рисунке 4.9,б – сокращенный вариант, на рисунке 4.9,в – элементарный вариант.

Рассмотренные на рисунке 4.9 варианты первого этапа технологического процесса дают понимание действий по формированию комплекса

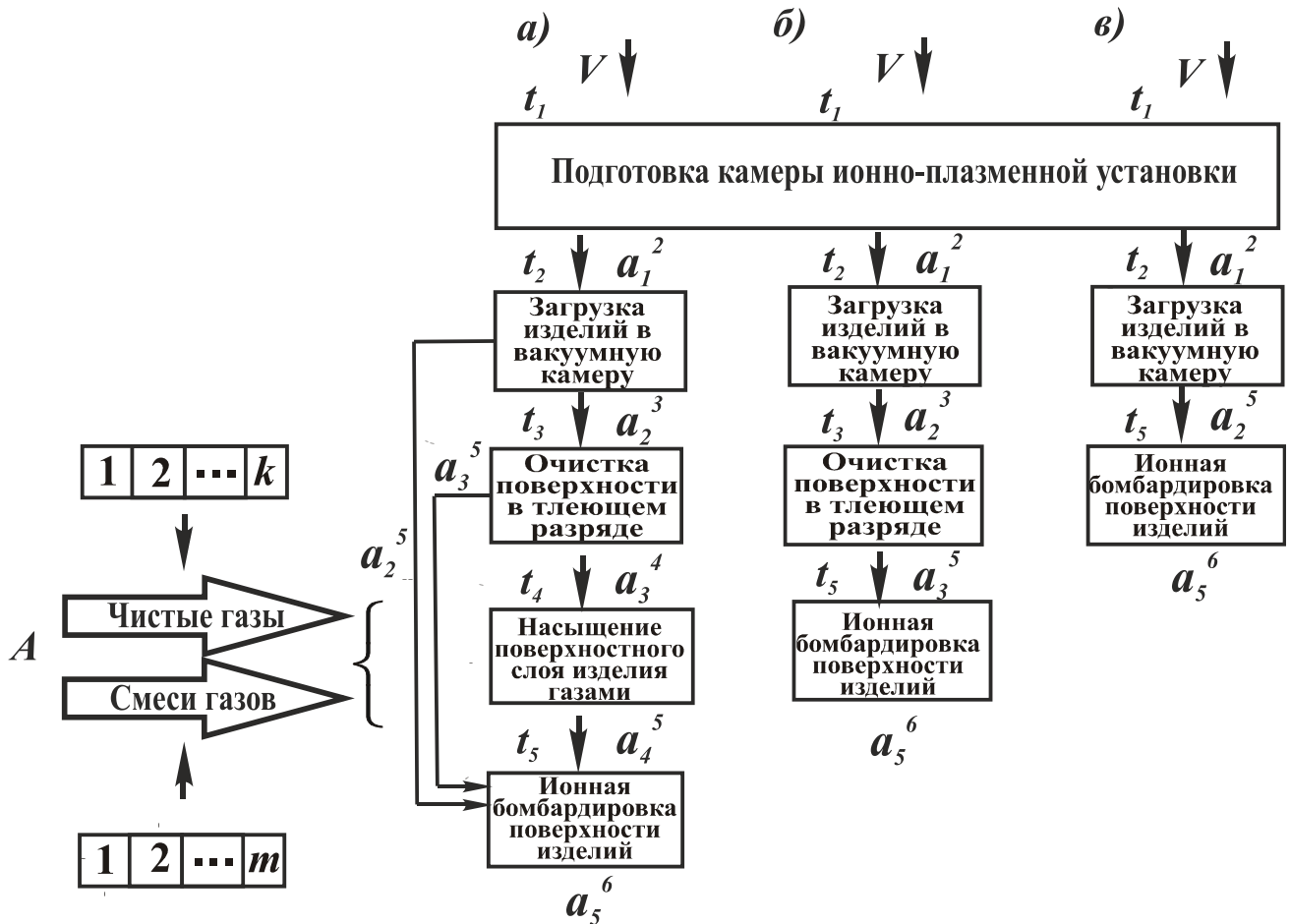


Рисунок 4.9. Структурные варианты 1-го этапа технологического процесса обработки лопатки турбины (изделия) в вакуумной ионно-плазменной установке:

а – полный вариант, б – вариант сокращенный; в – вариант элементарный технологических задач, направленных на подготовку лопаток турбин к повышению ресурса за счет нанесения ионно-плазменных покрытий.

Далее, для осуществления процесса нанесения защитного покрытия вводится в действие второй этап технологического процесса обработки в вакуумной ионно-плазменной установке.

Типы покрытия, наносимые в данных условиях, следующие:

- однослойные;
- многослойны;
- модульные;

- многомодульные.

В зависимости от применяемого материала (природы компонентов) и их композиций покрытия могут быть:

- керамические;
- металлические;
- композиционные.

Учитывая сложность условий эксплуатации в данном исследовании предлагается нанесение защитного покрытия, состоящего из нескольких слоев АЭЖП.

Также возможно применение многомодульного покрытия, состоящего например из:

1. Модуль связующего покрытия.
2. Модуль температурозащитных жаростойких покрытий.
3. Модуль связующего покрытия.
4. Модуль абразива-эрозионно жаростойких покрытий.

На рис. 4.10 показана полная структура второго этапа технологического процесса обработки лопатки турбины в ионно-плазменной установке.

Этот вариант структуры дает возможность выполнить послойное нанесение однослойных, многослойных покрытий для формирования абразива-эрозионно жаростойкого ФОП.

Также стоит учесть, что в случае нанесения многомодульного ФОП количество технологических операций увеличится. Кроме этого, при нанесении какого-то одного вида покрытия, необходимость построения полновариантной структуры технологического процесса отсутствует. Подводя итог исследования, можно сделать вывод, что разработанная структура технологического процесса нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий универсальна по своей природе, а значит, позволяет выполнять синтез технологических решений для построения процесса обработки ориентированного на предполагаемые (изученные) условия эксплуатации.

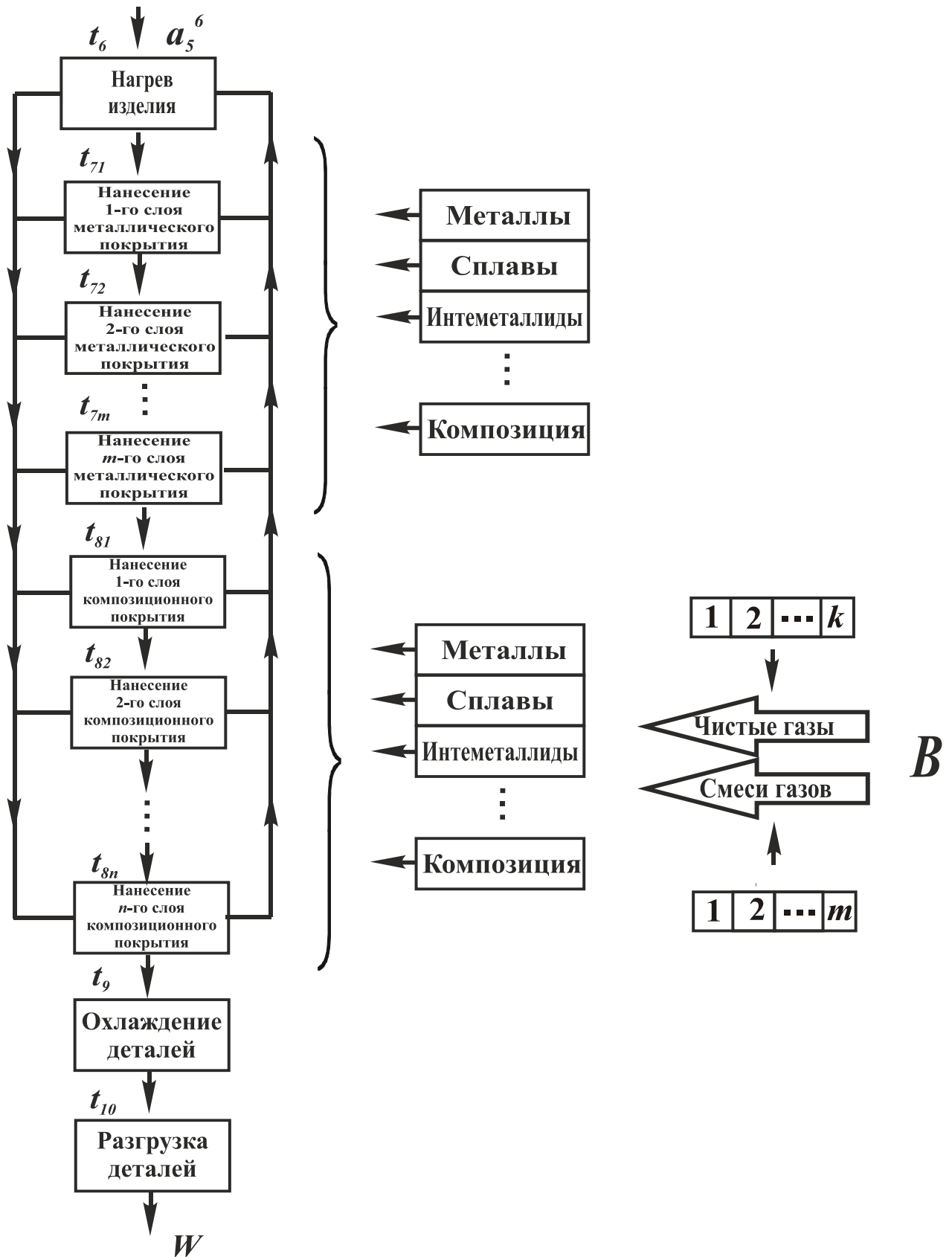


Рисунок 4.10. Структурный вариант полного состава операций 2-го этапа технологического процесса обработки изделия (лопатки турбины) в вакуумной ионно-плазменной установке

4.5. Структура конструкторско-технологического обеспечения технологического процесса нанесения ионно-плазменного защитного покрытия

С целью предотвращения появления повреждений, обеспечения ремонтпригодности лопаток прошедших эксплуатацию, продления сроков эксплуатации и т.д., разработаны и внедрены в машиностроение различные методы повышения ресурса данных деталей [1, 44, 49, 118].

В качестве примера можно рассмотреть применение вакуумной ионно-плазменной установки или применение детонационной установки для нанесения защитных покрытий. Наряду с этим, учитывая, что применение данных технологий связано с использованием дорогостоящих материалов и энергетических ресурсов, вполне объективно будет провести исследования и разработать подход с целью повышения технико-экономических показателей. Одним из вариантов решения проблемы является возможность увеличения численности заготовок, подвергающихся одновременному напылению защитных покрытий в камере вакуумной ионно-плазменной установки. Непосредственно при реализации такого подхода необходимо иметь ввиду следующие начальные условия:

- пропускная способность камеры ионно-плазменной установки;
- рациональное позиционирование лопаток в камере ионно-плазменной установки;
- пространственные связи в расположении каждой лопатки;
- кинематическая схема движения обрабатываемых лопаток турбин в момент нанесения защитного покрытия (предотвращение появления теневых следов). С этой целью проведена следующая работа.

Учитывая, что в данном исследовании повысить производительность и улучшить экономические показатели предлагается за счёт увеличения пропускной

способности камеры установки, изучения пространственных связей между заготовками, проектирования кинематических схем движения лопаток в процессе обработки, предлагается провести следующие исследования:

- определить рациональный предел количества лопаток в камере установки;
- составить пространственные схемы размещения лопаток турбин в камере установки;
- определить связи и отношения в пространстве камеры установки между обрабатываемыми деталями;
- определить основу для создания условий нормального функционирования установки для получения качественного единообразного покрытия.

Изучим особенности процесса определения пределов концентрации лопаток турбин в камере на вращающемся приводе. Выполнить данную задачу, учитывая, что определяется как рациональный предел количества (мест установки лопаток), так и множество возможных вариантов пространственного размещения лопаток в камере установки, можно с использованием следующего выражения:

$$\lambda = \frac{\iiint_v dx dy dz}{\iiint_{v_0} dx_0 dy_0 dz_0}, \quad (4.7)$$

где λ – максимальная концентрация позиций для установки лопаток;

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

$\iiint_{v_0} dx_0 dy_0 dz_0$ – элементарный объем одной позиции для установки лопатки.

Также следует учесть то, что при проектировании и конструировании камеры ионно-плазменной установки рациональный предел количества точек размещения лопаток турбин будет сориентирован требованиями к показателям цикловой производительности Π_{II} камеры для нанесения защитного покрытия. Продолжительность T_{II} одного цикла процесса напыления защитного покрытия рассчитывается на начальном этапе.

Если определены начальные условия $P_{ц}$ и $T_{ц}$, используя формулу 4.7 определяется рациональный максимум количества обрабатываемых одновременно лопаток λ . Дальнейшим шагом в случае проектирования и конструирования установки можно, воспользовавшись следующей формулой, определить внутренний размер (объем) камеры ионно-плазменной установки. Для определения такого объема используется выражение

$$V = P_{ц} T_{ц} V_0 . \quad (4.8)$$

Для увеличения показателя объема обработанных деталей при установленных пространственных параметрах камеры ионно-плазменной установки можно использовать следующие условия:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \rightarrow \max , \\ V_0 \rightarrow \min . \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

Кроме перечисленных выше начальных условий, есть также проблемная сторона данного процесса, обуславливаемая рядом причин:

- в ряде случаев возможно возникновение неравномерностей слоя покрытия из-за взаимного наложения проекций лопаток, размещенных на вращающемся вспомогательном оборудовании в момент напыления покрытия, между катодом и анодом;

- ограничения в вариантах плотности (удельной плотности) обрабатываемых одновременно лопаток турбин в ионно-плазменной установке, для этого используется следующая формула $P = 1/\lambda$.

Изучим возможность смоделировать (спроектировать, сконструировать) вспомогательное оборудование камеры ионно-плазменной установки при условии выполнения структурирования мощности множеств, точек размещения лопаток турбин в камере для обработки.

Структурирование мощности множеств – процесс, основывающийся в начале на возникновении множеств точек размещения \mathcal{E} , потом на появлении множеств отношений (связей, соответствий и т.д.) a . Такая совокупность может быть представлено в виде следующего выражения:

$$Str = \{\varepsilon, a\}, \quad (4.10)$$

где Str – структура точек размещения вспомогательного оборудования вакуумной камеры;

ε – множество точек размещения вспомогательного оборудования;

a – множество отношений в множестве ε .

Указанные множества ε и a отображаются в следующем виде:

$$\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_v\} \quad (4.11)$$

где ε_η – η -й элемент множества ε ;

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_{v_i}\} \quad (4.12)$$

где a_η – η -е отношение между элементами множества ε .

Важным условием для определения структуры точек размещения вспомогательного оборудования камеры ионно-плазменной установки является нахождение свойств и показателей множеств величин ε и a .

Для решения задачи, связанной с определением структуры точек размещения вспомогательного оборудования камеры ионно-плазменной установки, необходимо определиться с основой (последовательностью) такого процесса, которая может опираться на синтез структурных преобразований. Реализация такого решения может иметь следующую последовательность.

Формирование начинается с формирования подструктур первого уровня абстракции (элементарных структур первого класса), далее совокупность данных подструктур формирует структуру второго уровня абстракции (структуру второго класса), далее третий класс и т.д., до структурной формы i -го класса.

При таком подходе определение мощности множеств точек размещения может быть представлено следующей формулой:

$$\lambda = \prod_{k=1}^i \lambda_k \quad (4.13)$$

где λ_{jk} – мощность множества элементов подсистемы k -го класса;

i – количество классов подсистем на множестве точек размещения вспомогательного оборудования камеры ионно-плазменной установки.

Непосредственно для структурного формирования цикловая производительность может быть рассчитана, исходя из выражения:

$$\Pi_{\text{ц}} = \frac{\prod_{k=1}^i \lambda_k}{T_{\text{ц}}} \quad (4.14)$$

Вариант структуры точек размещения вспомогательного оборудования камеры ионно-плазменной установки можно отобразить следующим выражением:

$$\text{Str} = \{\text{Str}_1, \text{Str}_2, \dots, \text{Str}_p\}, \quad (4.15)$$

где Str_k – структура подсистем k -го класса вспомогательного устройства вакуумной камеры установки.

Формула, отображающая комплексную форму структурирования точек размещения, может иметь вид:

$$\text{Str} = \bigcup_{v_p} \dots \bigcup_{v_2} \bigcup_{v_1} y_n \quad (4.16)$$

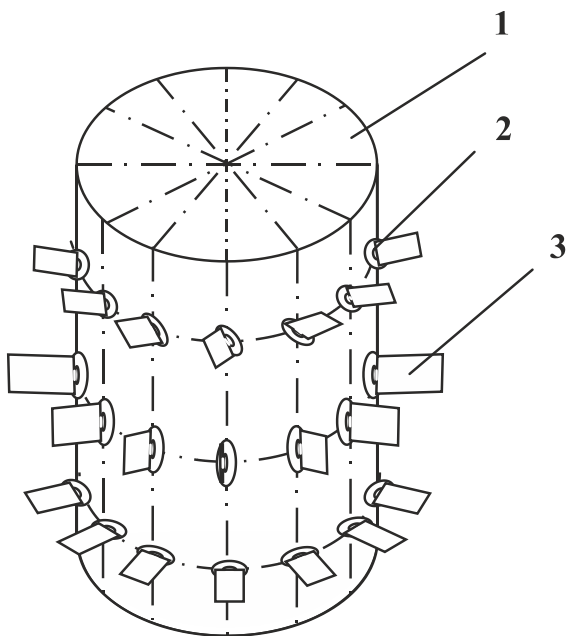


Рисунок 4.11. Модель вспомогательного оборудования вакуумной камеры

Далее изучим пространственные структурные варианты точек размещения вспомогательного оборудования камеры ионно-плазменной установки. В выражении (4.10.) отображается процесс формирования пространственной структуры точек размещения вспомогательного оборудования камеры установки. Здесь, отношения между множествами связей (соответствий) a во множестве точек размещения ε является неизвестной.

Решение в данном случае может основываться на различных вариантах схем пространственных структур, имеющих

подобия геометрических фигур (рисунок 4.11). [117]. Здесь указано: 1 – вспомогательное оборудование камеры; 2 – точка установки детали; 3 – лопатка турбины.

На базе классических форм структуры, ориентируясь на начальные условия (технология, покрытие, форма обрабатываемой детали и т.д.), могут быть смоделированы другие, более сложные (комплексные) пространственные модели структур вспомогательного оборудования камеры.

Следует также учитывать, что схема движения лопатки (лопаток) турбин, установленных на вспомогательном оборудовании камеры ионно-плазменной установки будет, происходить в пространстве различной размерности (декартова система координат). Преобразование трасс движения будет выполняться по этим же законам.

Оптимизация процесса выбора наиболее применимой (выгодной) пространственной схемы происходит в процессе изучения всех множеств возможных вариантов таких схем.

Из изложенного выше следует, что рассмотренные основы проектирования и конструирования вспомогательного оборудования камеры ионно-плазменной установки создают позитивные условия для повышения производительности и улучшения экономических показателей процесса повышения ресурса лопаток турбин ГТД за счет увеличения количества одновременно обрабатываемых деталей.

Подводя итог можно определить, что в ходе исследования решены следующие вопросы:

- разработаны требуемые варианты количественного соотношения деталей в камере ионно-плазменной установки;
- разработаны требуемые структуры расположения точек размещения деталей на вспомогательном оборудовании;
- исследованы связи и соответствия между расположениями точек размещения в камере установки;

- разработана основа подхода проектирования и конструирования вспомогательного оборудования камеры ионно-плазменной установки для нанесения функционально-ориентированного покрытия.

4.6. Выводы

Работа, выполненная в данном исследовании, дала следующие результаты:

1. Анализ особенностей нанесения защитных покрытий с применением функционально-ориентированного подхода дает возможность обеспечить работоспособность лопаток в условиях сложного эксплуатационного воздействия за счет равномерности износа защитного покрытия (покрытий) по всей поверхности лопатки турбины.

2. Представленные виды покрытий (математические и структурные модели) обеспечивают выполнение процесса синтезирования свойств функциональных элементов лопаток турбин. Это дает возможность реализовать процесс совершенствования свойств деталей.

3. Ориентирование технологических воздействий, свойств функциональных элементов лопаток на условия эксплуатации дает возможность повысить характеристики, составляющие эксплуатационный потенциал лопаток турбин.

4. Изучены возможности технологий и технологического обеспечения, позволяющего наносить специальные защитные покрытия (ФОП) на лопатки турбин. Установлена зависимость между видом установки и начальными условиями (архитектура детали, вид ФОП, пространственные схемы движения детали и т.д.), которая дает возможность выполнить выбор подходящего технологического обеспечения.

5. Определено, что наиболее эффективным является метод ультразвуковой обработки лопаток турбин с целью их очистки от загрязнений.

6. Разработана структура типового технологического процесса нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности деталей.

7. Проведенные исследования позволяют проектировать и конструировать эффективное оборудование и улучшать экономические показатели за счет возможности увеличить количество одновременно обрабатываемых деталей.

РАЗДЕЛ 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. РЕКОМЕНДАЦИИ. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. Особенности совместного абразивно-эрозионного и температурного разрушений пера лопаток турбин

Лопатки турбин ГТД работают в достаточно специфических (сложных) эксплуатационных условиях. В большинстве случаев их ресурс зависит от степени мощности (сложности, неравномерности) совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Сложность функциональных воздействий приводит к возникновению неравномерности разрушений на поверхности пера лопаток турбины. Гипотетически, учитывая то, что функции ступеней и турбин одного ГТД predeterminedены при их разработке и конструировании, разница в особенностях разрушения прослеживается не только между единичными поверхностями пера одной лопатки турбины, но и по

функциональным частям пера на уровне ступеней одной турбины, на уровне различных видов турбин одного двигателя. Таким образом, разрушения лопаток турбин в зависимости от принадлежности к соответствующей ступени или турбине одного двигателя будут обусловлены следующим:

1. Соответствующее (последовательное) изменение местоположения зон разрушений.
2. Увеличение (уменьшение) степени разрушения поверхности.
3. Различия в параметрах (характеристиках) разрушений в зависимости от местоположения лопатки в двигателе.

Применение защитных покрытий из монометаллов, интерметаллидов, керамики, композиционных материалов и др. рассматривается и изучается в различных научных трудах [5, 44, 57]. Здесь же изучаются их свойства, возможности, особенности износа и разрушения и методы обработки и нанесения покрытий. В некоторых источниках [44] приводятся данные о пределах толщины наносимых покрытий, где для авиационных турбин допустимая толщина, например, составляет 120 мкм, а для наземных установок до 240 мкм. Или, например, приводится перечень существующих защитных покрытий, наносимых традиционным путем, среди них: СДП-1, СДП-2, ВСДП-5, ВСДП-11 и т.д. Изучаются особенности легирования защитных покрытий редкоземельными материалами (Y, Hf, Ta, Re и др.) и использование при нанесении данных покрытий барьерных слоев для снижения диффузионного эффекта.

В данном исследовании, как указывалось выше, будет проведена работа по проектированию процесса напыления только АЭЖП (нитрид циркония), а изучение износа покрытия при условии, что его толщина составляет 80 мкм. Результаты исследований процесса неравномерного разрушения слоев покрытия указывают на то, что степень неравномерности имеет показатель два и более. Такие особенности последствий эксплуатации прослеживаются на всех ступенях и турбинах ГТД.

Комплексный подсчет результатов исследования разрушений поверхности пера лопатки турбины изложен в таблице 5.1. Данные, представленные в таблице,

взяты из результатов исследования разрушения лопатки первой ступени турбины компрессора двигателя модели ТВЗ-117 с защитным покрытием толщиной 100 мкм. В качестве прибора для измерения толщины использовался прибор К-5.

Точки диагностики состояния защитного покрытия корыта пера лопатки выбирались по диагонали, проходящей от пересечения выходной кромки и бандажной полки к пересечению входной кромки с полкой замковой части. Диагностика толщины покрытия выполнялась по трем равноудаленным друг от друга точкам на каждом из двух направлений.

Таблица 5.1. Показания измерений толщины изношенного защитного покрытия корыта пера лопатки первой ступени турбины ТВЗ-117 (по диагонали).

Точки промеров	Номера измерений					Среднее значение толщины, мкм	Средний износ, мкм
	1	2	3	4	5		
	Толщина покрытия, мкм						
1	0	1	0	1	0	0,4	99,6
2	20	22	21	20	20	20,6	79,4
3	75	70	70	70	70	71,0	29,0

Вычисления с использованием результатов анализа, приведенного в таблице 5.1, указывают на то, что коэффициент неравномерности износа защитного покрытия на поверхности корыта пера лопатки турбины составляет:

$$\gamma_1 = \frac{H_{\max}}{H_{\min}} = \frac{99,6}{29,0} = 3,4 ; \quad (5.1)$$

H_{\max} и H_{\min} – максимальное и минимальное значение среднего износа по поверхности корыта пера лопатки.

Аналогичным образом производится анализ состояния защитного покрытия входной кромки пера лопатки (возможных зон износа лопаток турбин различных типов ГТД), имеющей выраженную область разрушения. Точки диагностики состояния защитного покрытия входной кромки пера лопатки, в этом случае,

могут выбираться по вертикали, проходящей от пересечения входной кромки и полки замковой части полки к пересечению входной кромки с бандажной полкой.

Изучение особенностей разрушения защитного покрытия лопаток турбины в зависимости от ступени турбины

Для проведения исследования изменений состояния защитного покрытия в зависимости от принадлежности лопатки к ступени турбины (1-я ступень, 2-я ступень, ..., n -я ступень) необходимо исследовать особенности преобразования (изменения) толщины покрытия на функциональных частях лопатки, установленных в разных ступенях.

Исследования проводились с использованием 10 лопаток каждой ступени турбины компрессора ГТД ТВЗ-117. Показатели инструментального исследования состояния защитного покрытия лопаток турбин различных ступеней, проведенные с использованием толщиномера К-5 представлены в таблице 5.2.

В строке состояния защитного покрытия, таблица 5.2., указывается среднее значение толщины поврежденного покрытия. Последняя строка таблицы 5.2. указывает на степень износа покрытия, в случае, если его толщина составляла 100 мкм.

Анализируя проведенные расчеты и полученные результаты, можно сделать вывод, что степень разрушения защитного покрытия напрямую зависит от принадлежности лопаток к той или иной ступени турбины в связи с изменениями температурных показателей (температура на входе в первую ступень турбины компрессора может достигать 950°C , а во второй ступени снижаться до 650°C) и сепарации механических частиц в тракте. В большинстве случаев максимальные разрушения и повреждение тела лопатки турбины происходит в первой ступени турбины компрессора. В последующем разрушение покрытия и основного металла тела лопатки уменьшаются (отсутствуют). В отдельных случаях имеет место увеличение разрушений лопаток последних ступеней турбин (свободных турбин) в связи с использованием материалов для изготовления лопаток меньшей жаропрочности в отличие от сплавов применяемых для лопаток первых ступеней.

Коэффициент неравномерности износа защитного покрытия корыта лопаток различных ступеней турбины (для турбины с двумя ступенями), с учетом показателей, отображенных в таблице 5.2, будет составлять:

$$\gamma_{2a} = \frac{H_1}{H_2} = \frac{38,2}{30,1} = 1,3 ; \quad (5.2)$$

H_1 и H_2 - максимальное и минимальное среднее значение состояния защитного покрытия по поверхности корыта пера лопатки турбины в зоне a , в зоне b –
 $\gamma_{2b} = 1,3$

Таблица 5.2. Показания измерений толщины изношенного защитного покрытия корыта пера лопатки турбины (по ступеням).

Номер лопатки	Номер ступени турбины компрессора			
	1		2	
	Максимальная остаточная толщина покрытия, мкм			
	Зона a	Зона b	Зона a	Зона b
1	61	51	71	71
2	61	61	72	71
3	62	61	72	72
4	62	61	72	72
5	62	62	72	72
6	62	62	72	72
7	62	62	72	72
8	62	62	72	72
9	62	62	62	62
10	62	62	62	62
Средняя толщина	61,8	61,6	69,9	69,8
Средний износ	38,2	38,4	30,1	30,2

На основании проведенных исследований можно определить процессы, происходящие в отношении защитного покрытия, а именно:

- разрушение защитного покрытия каждой лопатки одной ступени турбины имеет определенные особенности, выраженные в неоднородности форм разрушения;

- неоднородность разрушений формируется по определенной закономерности, ориентируясь на номер ступени турбины (назначение турбины).

5.2. Способ формирования ФОС покрытия пера лопаток различных ступени турбины

Проведенные исследования подтверждают тот факт, что процесс воздействия эксплуатационных функций на поверхностный слой приводит к возникновению особенностей разрушения функциональных элементов лопаток турбин, а именно:

- разрушение защитного покрытия каждой лопатки одной ступени турбины имеет определенные особенности, выраженные в неоднородности форм разрушения;

- неоднородность разрушений формируется по определенной закономерности, ориентируясь на номер ступени турбины (назначение турбины).

В данном исследовании предлагается повысить ресурс лопаток турбин ГТД на базе нанесения ФОП, [72] а именно:

1. Ориентирование свойств защитного покрытия по поверхности пера лопатки турбины.

2. Ориентирование свойств покрытий лопаток различных ступеней турбины (турбин).

Применение такого подхода обеспечит:

1. Предотвращение износа (разрушения) жаропрочного сплава тела лопатки, работающей в условиях воздействий сложных эксплуатационных функций (температурные воздействия, механические воздействия, химические воздействия, комплексные воздействия).

2. Повышение эксплуатационного потенциала лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода.

3. Повышение степени ремонтпригодности и способности многократного использования как детали турбины ГТД.

4. Минимизацию ресурсных затрат на обработку поверхностей лопаток турбин в процессе восстановления за счет пропорционального износа защитного покрытия в межремонтном периоде.

Напыление ФОП по требованиям технологии [72, 75] должно выполняться на базе особых принципов ориентации технологических воздействий.

В таблице 5.3. указываются некоторые пространственные характеристики покрытия, например, необходимое количество слоев ФОП, где толщина ориентируется на соответствие свойств покрытия номеру ступени турбины (турбин).

Таблица 5.3. Матрица структуры ФОП пера лопатки (по номеру ступени турбины).

Номер ступен и	Количество слоев покрытий в зонах	Толщина покрытия в зависимости от номера, мкм					Общ. толщина покрытия, мкм	Мин. толщ на покрыт ия, мкм	Коеф. γ_1	Коеф. γ_{2i}
		1	2	3	4	5				
1	4 (a)	22,0	21,4	21,4	20,0	35,2	120,0	35,2	3,4	-
	4 (b)	22,0	21,4	21,4	20,0					-
2	4 (a)	16,5	16,5	16,2	16,0	27,1	92,3	27,1	3,4	1,3
	4 (b)	16,5	16,5	16,2	16,0					1,3

В таблице 5.3 обозначено следующее: γ_1 – коэффициент неравномерности износа корыта пера лопатки, γ_{2i} – коэффициент неравномерности износа данной лопатки относительно предыдущей в зависимости от номера ступени i турбины.

5.3. Алгоритм технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин с применением ФОП

Технологический процесс повышения ресурса лопаток турбин ГТД состоит из трех стадий. (рисунок 5.1). Обеспечение свойств покрытия, наносимого в процессе II стадии, основывается на данных, указанных в таблице 5.3. Количество наносимых слоев ориентируется на номер ступени турбины, в которой установлена лопатка.

На рисунке 5.1. [140] изображена схема процесса нанесения ФОП на лопатки турбины. Здесь, на II стадии технологического процесса, производится определенный перечень технологических операций, а именно: полирование,

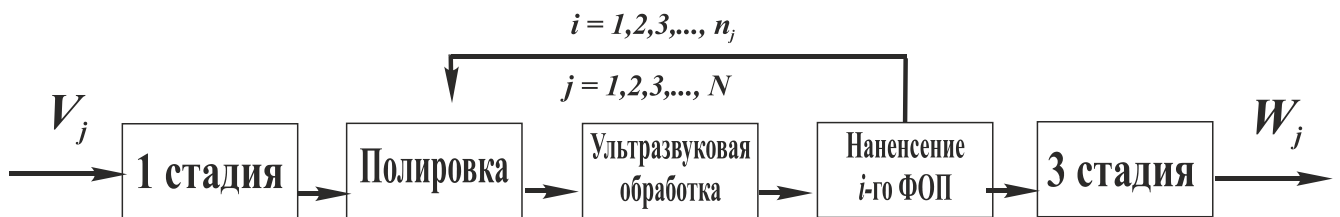


Рисунок 5.1. Схема технологического процесса нанесения ФОП на лопатки турбины

обработка поверхностей в ультразвуковой установке, нанесение i -го ФОП. Также, учитывая, что каждая турбина в зависимости от назначения может иметь одну из особенностей, выраженную многоступенчатостью (каскадностью) для каждой ступени предполагается формирование n_j покрытий для N ступеней лопаток

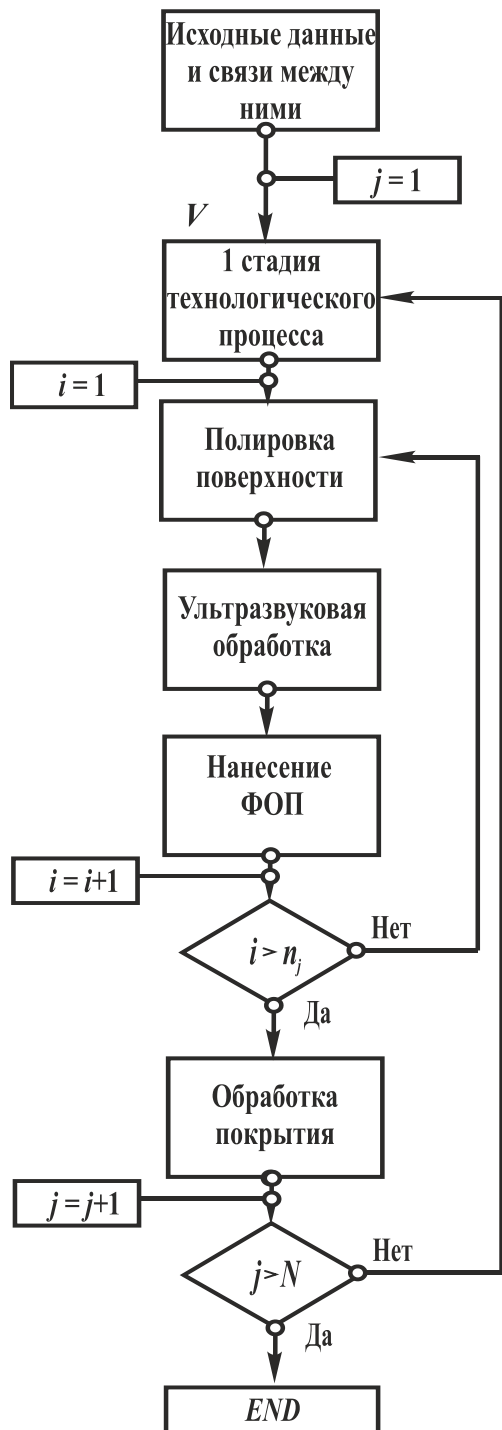


Рисунок 5.2. Алгоритм технологического процесса нанесения ФОП

нанесению защитного покрытия [27, 62, 69, 70].

На схеме стрелками указаны прямые и обратные связи между технологическими операциями комплексного технологического процесса нанесения защитного покрытия на лопатки турбин. При этом необходимо учитывать необходимость выполнения перед каждым i -м процессом нанесения ФОП технологические операции полирования и очистки в ультразвуковой установке поверхностей с нанесенным специальным покрытием (слоем, модулем) для достижения требуемой степени адгезии и когезии материалов тела лопатки и покрытий.

Далее, на рисунке 5.2. [140] отображен алгоритм технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин с применением ФОП.

Реализация процесса нанесения ФОП, как видно из алгоритма, имеет некоторые особенности, представленные как обратные циклы напыления n_j слоя (модуля) покрытия на лопатки каждой ступени турбины и покрытий на N ступени лопаток той же турбины.

I стадия процесса нанесения ФОП включает в себя технологические операции, связанные с подготовкой поверхности пера лопаток (новых, бывших в эксплуатации) к

II стадия процесса нанесения ФОП – это стадия непосредственного формирования пространственной архитектуры и ориентированных свойств поверхности пера лопатки турбины путем нанесения n_j покрытий на лопатки.

III стадия процесса нанесения ФОП – это процесс обработки непосредственно последнего слоя покрытия с выбором соответствующего способа обработки [2, 28, 35, 40, 55, 58, 69, 79].

5.4. Синтез типового технологического процесса подготовки поверхности пера лопаток турбины

Известно, что лопатки турбин при эксплуатации претерпевают критические воздействия, а именно:

- защитное покрытие имеет зоны износа только слоя самого покрытия;
- защитное покрытие имеет зоны полного разрушения, а также имеются зоны разрушения тела лопатки в области кромок лопатки турбины;
- защитное покрытие имеет зоны полного разрушения, а также имеются зоны разрушения тела лопатки в области кромок и поверхностей других функциональных элементов (пера лопатки).

Учитывая, что при восстановлении лопаток турбин разрушение защитного покрытия будет иметь свои особенности, построение структуры технологического процесса также должно ориентироваться на данные аргументы.

На рисунке 5.3 представлена структура технологического процесса нанесения защитного покрытия на лопатки из никелевых сплавов с использованием ионно-плазменных установок.

Структура синтеза технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин (рисунок 5.3) содержит перечень следующих технологических операций:

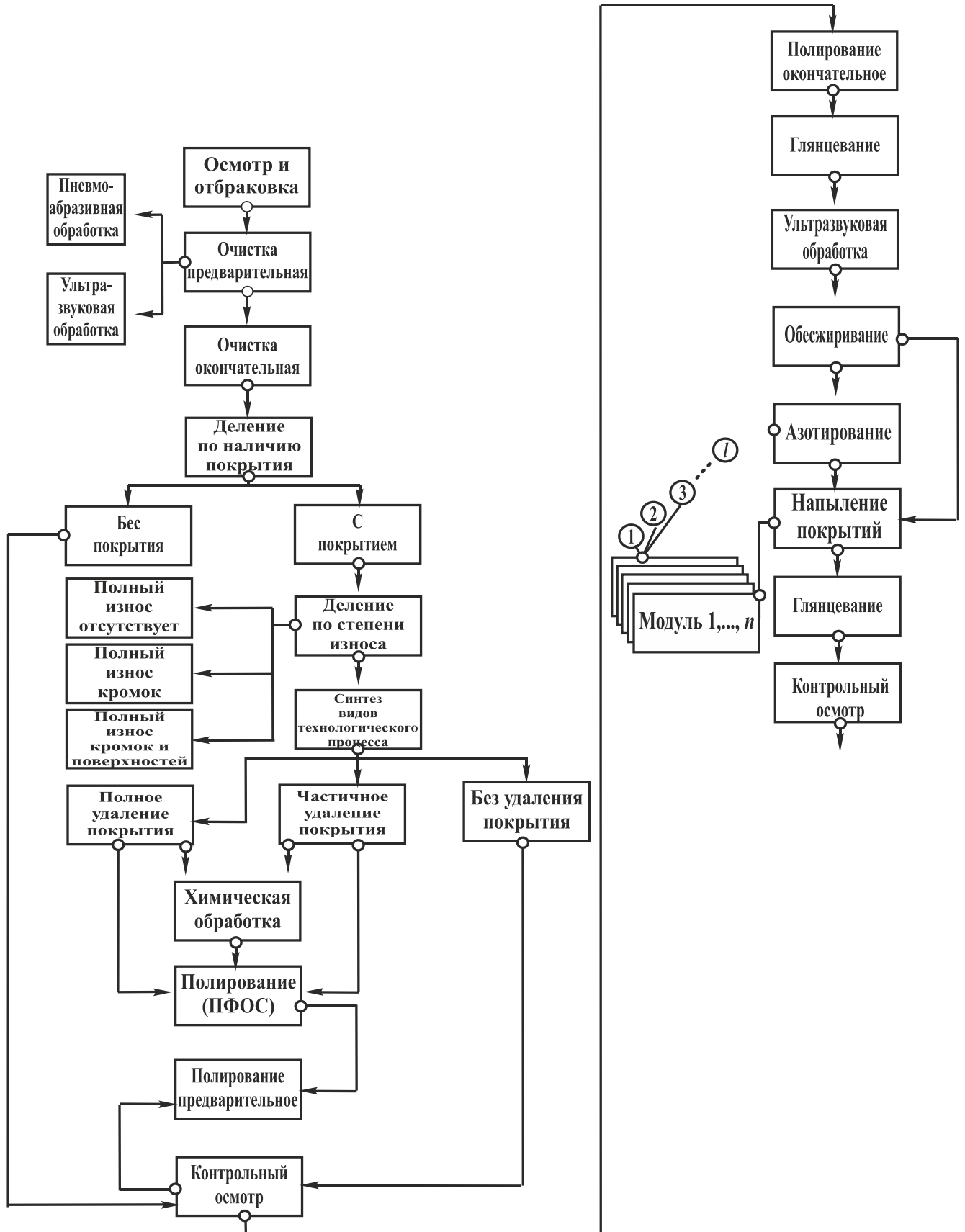


Рисунок 5.3. Структура типового технологического процесса обработки лопаток турбин ГТД с нанесением ионно-плазменных покрытий

1. Проведение технического осмотра лопаток турбин с целью определить детали, пригодные для проведения ремонта (восстановления).

2. Подготовка поверхности пера лопаток после эрозионно-коррозионного воздействия и горения топлива (налипания частиц песка, сажи и т.д.). Методы, которые могут применяться для этих целей, различны, а именно:

2.1. Пневмо-абразивная обработка поверхностей мелким электрокорундом (карбидом кремния).

2.2. Использование ультразвуковой установки.

3. Обработка поверхности с целью удаления мелких механических повреждений от коррозионно-эрозионного воздействия.

4. Распределение лопаток по состоянию (наличию) защитного покрытия:

4.1. Лопатки турбин не имеющие защитного покрытия отбираются в партию для последующего изучения состояния реальной поверхности (контроля геометрии).

4.2. Лопатки с защитным покрытием (ФОП, традиционное, и др.).

5. Определение состояния защитного покрытия:

5.1. Защитное покрытие имеет зоны износа только слоя самого покрытия,

5.2. Защитное покрытие имеет зоны полного разрушения, а также имеются зоны разрушения тела лопатки в области кромок лопатки турбины.

5.3. Защитное покрытие имеет зоны полного разрушения, а также имеются зоны разрушения тела лопатки в области кромок и поверхностей других функциональных элементов (пера лопатки).

6. Синтез технологического процесса (структуры технологического процесса) с учетом степени (состояния, наличия, и т.д.) защитного покрытия и применяемых для его съема методов (объема работы) выполняется в следующем объеме:

6.1. Необходимо выполнить полное удаление поврежденного защитного покрытия.

6.2. Необходимо выполнить зональное (частичное) удаление защитного покрытия.

6.3. Покрытие в результате эксплуатации имеет равномерный износ, покрытие отсутствует в связи с тем, что лопатка турбины находится в процессе изготовления. Контроль геометрии.

7. Применение химического способа обработки поверхности (травление, разрыхление, растворение).

8. Обработка поверхности полированием (применение ориентированного полировальника).

Технологическая операция, связанная с полированием, производится в некоторых случаях одновременно различных материалов. Т.е. при наличии защитного покрытия на восстанавливаемой лопатке в некоторых зонах поверхности пера полировальный инструмент будет в момент воздействия иметь пятно контакта с поверхностью покрытия и с поверхностью основного металла тела лопатки турбины.

9. Предварительное полирование пера лопатки турбины, которое проводится с целью придания поверхности лопатки турбины единообразного состояния по показателю параметра шероховатости $R_a = 0,4 \dots 0,16$ мкм, после выполнения полирования способом направленного воздействия и контроля геометрии.

10. Повторный промер параметров геометрии.

11. Окончательное полирование элементов пера лопатки турбины, которое проводится с целью придания поверхности лопатки турбины единообразного состояния по параметрам шероховатости $R_a = 0,100 \dots 0,063$ мкм

12. Грубое глянцеование поверхностей, состоящих из различных материалов до параметров шероховатости $R_a = 0,050 \dots 0,032$ мкм. Процессы, происходящие в момент выполнения данной технологической операции, представляют комбинацию химических, термических и микропластических процессов.

13. Обработка (чистка) лопаток турбин с использованием ультразвуковой установки для снятия возможных загрязнений (окислов) с функциональных частей. Этот процесс выполняется с помощью ультразвуковой обработки в специальных ваннах. В качестве обеспечения процесса обработки используется

ультразвуковая установка УЗГ 3-4 и преобразователи ПМС 2,5-18 с химически активными веществами.

14. Обработка поверхности пера лопатки, применяя при этом последовательно «Нефрас С2-80/120, С3-80/120» ТУ 38.401-67-108-92, эфир и ректификат спирта этилового.

15. Насыщение газами поверхности пера лопатки (азотирование). Данная технологическая операция проводится с целью придания специального состояния фазам и структурам материала лопатки после их эксплуатации. Процесс азотирования может быть выполнен следующими методами:

15.1. Азотирование в тлеющем разряде.

15.2. Азотирование с использованием энергии вакуумно-дугового разряда.

16. Технологическая операция напыления защитного покрытия с использованием вакуумной ионно-плазменной установки типа ННВ 6.6-И1.

16.1. Подготовка поверхности пера лопатки, применяя ионное травление в газовом разряде.

16.2. Ионная бомбардировка и прогрев обрабатываемой поверхности пера лопатки.

16.3. Нанесение защитного покрытия. В процессе нанесения защитного покрытия могут использоваться различные материалы и соответственно их композиции. Таковыми могут быть однослойные, многослойные, одноэлементные, композиционные и др. Наиболее эффективно используются покрытия с функционально-ориентированными свойствами, способные обеспечить повышение ресурса в условиях функционального воздействия [72].

17. Глянцевание поверхности нанесенного защитного покрытия. Данная операция является комбинацией химических и механических преобразований поверхности покрытия. Показатель шероховатости будет находиться в пределах $R_a = 0,040 \dots 0,020$ мкм.

18. Технологический контроль результатов нанесения защитного покрытия и состояния элементов пера лопатки.

Структурная схема, разработанная с целью повышения ресурса лопаток турбин ГТД, делает процесс нанесения защитного покрытия универсальным. С использованием структуры данного типа можно построить процесс подготовки (обработки) поверхности с последующим нанесением защитного ФОП на выбранные для восстановления и повышения ресурса типы лопаток турбин. Также данная структура, ориентируясь на начальные условия (состояние лопаток, наличие покрытия на них, возможности технологического обеспечения и т.д.), способна обеспечить при построении процесса нанесения покрытий рациональность в выборе конкретных вариантов технологических операций.

5.5. Экспериментальные исследования процесса нанесения защитного ФОП на лопатки турбины

Реализация II стадии технологического процесса в данном исследовании основывается на разработанном алгоритме, отображенном на рисунке 5.2. Технические характеристики (параметры) защитного покрытия указаны в таблице 5.3. II стадия технологического процесса включает в себя ряд операций, а именно:

- обработка поверхности лопатки турбины (полировка), находящейся в различном состоянии (покрытие отсутствует, покрытие новое, покрытие, имеющее износ) на подготовленном полировальном станке с применением специального полировальника (полировальника с ориентированными свойствами) или способом направленного воздействия;

- обработка лопаток турбин в ванной установки для ультразвуковой обработки (рисунок 4.5);

- нанесение ФОП с применением вакуумной ионно-плазменной установки ННВ 6.6-И1 (рисунок 4.4) с использованием экранирующих шаблонов и напылением многоэлементных, многокомпонентных, композиционных покрытий.

Чистовая обработка поверхности (полирование) выполняется на подготовленном для данной операции станке с использованием специальных полировальников и паст. Шероховатость поверхности при этом должна составлять $R_a = 0,06 \dots 0,08$ мкм. Напылению защитного покрытия на лопатки турбины предшествовали операции, связанные с очисткой поверхности в ультразвуке в течении 10 мин.

Нанесение покрытия на лопатки осуществлялось с использованием ионно-плазменной установки ННВ 6.6-И1 (рисунок 4.4). Для нанесения различных покрытий (модулей) применялись специально подобранные катоды. Количество



Рисунок 5.4. Общий вид катода для ННВ 6.6-И1

катодов, используемых одновременно в вакуумной ионно-плазменной установке составляет три единицы. Общий вид катода отображен на рисунке 5.4.

Процесс нанесения защитного покрытия на лопатки турбины выполняется в соответствии с шагами (циклами) алгоритма (рисунок 5.2) в следующей последовательности:

- установка лопаток турбины в камеру ионно-плазменной установки, подготовка рабочей среды;
- ионное травление поверхности лопаток турбин (рабочая среда имеет давление $2,6 \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$ Па);

- ионная бомбардировка поверхности пера лопатки, нагрев (напряжение смещения находится в пределах 1000 ... 1400 В, продолжительность операции не менее 120 с);

- металлизация поверхности пера лопатки (60 с);

- послойное нанесение защитного покрытия, при этом ток дуги на катодах составляет 90 ... 100 А; напряжение на подложке 150 ... 300 В (работают все катоды); разреженность рабочей среды в камере до $1,1 \cdot 10^{-1}$ Па; количество покрытий (модулей), толщина и время нанесения слоев указано в таблице 5.4;

- охлаждение и извлечение устройства крепления;

- технологический контроль результатов обработки.

Таблица 5.4. Структура слоев функционально-ориентированного покрытия пера лопатки турбины с учетом двух ступеней.

Номер ступени	Количество зональных слоев покрытий	Длительность металлизации, с	Толщина и длительность напыления нитрид циркониевых покрытий в зависимости от номера покрытия на лопатке (1 мкм за 90 с)							
			1		2		3		4	
			мкм	с	мкм	с	мкм	с	мкм	с
1	4 (a)	60	22,0	1980	21,4	1926	21,4	1926	20,0	1800
	4 (b)	60	22,0		21,4		21,4		20,0	
2	4 (a)	60	16,5	1485	16,5	1485	16,2	1458	16,0	1440
	4 (b)	60	16,5		16,5		16,2		16,0	

После нанесения 4-х функционально-ориентированных слоев в зоне *a* и зоне *b* (рисунок 4.1):

- в первой ступени выполняется нанесение одного общего слоя на поверхность пера лопатки толщиной 35,2 мкм в течении 3168 секунд;

- во второй ступени выполняется нанесение одного общего слоя на поверхность пера лопатки толщиной 27,1 мкм в течении 2439 секунды.

Последовательность нанесения защитного покрытия для выбранного примера представлена на рисунке 4.3.

В случае создания на поверхности лопатки турбины ФОП его структура формируется с использованием данных таблицы 5.4. После напыления каждого слоя выполняются следующие технологические операции: полирование и обработка в ультразвуковой установке.

Для каждого отдельного случая сплав катодов (монометаллы, интерметаллиды, композиции и т.д.), количество слоев, толщина слоев, газовые смеси и т.д. подбираются индивидуально по результатам проведенных исследований особенностей эксплуатации и эксплуатационных воздействий. Нанесение ФОП выполняется в строгом соответствии особым принципам ориентации технологических воздействий.

Результатом данной части диссертационного исследования является нанесенное защитное ФОП на лопатку турбины ГТД. Учитывая, что при нанесении ФОП используются дорогостоящие материалы, происходит затрата энергии, а перед этим происходит прецизионное изучение особенностей эксплуатации и повреждений, разрабатываемая структура технологического процесса и его алгоритм имеют сложную (ветвистую) архитектуру, можно утверждать, что стоимость реализации процесса нанесения ФОП для лопаток турбин несколько возрастет. Однако рост стоимости будет заметен только на фоне сравнительного анализа, проведенного между стандартными (традиционными) подходами и подходом на базе функционального ориентирования процесса напыления защитного покрытия на лопатки турбины. А, как видно из обзора повреждаемости и существующих способов повышения ресурса, традиционные способы не дают те показатели качества детали и ту меру полезности, которые достигаются при применении функционально-ориентированных технологических подходов. Но, несмотря на это, существует, как и говорилось ранее, некий процент удорожания технологического процесса, в отличии от традиционного подхода.

Стоимость процесса с применением функционально-ориентированного подхода по экономическим показателям будет превышать на 12 - 13 % традиционный, но учитывая предварительно проведенные расчёты можно сказать,

что при использовании ФОП повышение ресурса лопаток турбин происходит в некоторых случаях более чем на 50%. Кроме этого ФОП придает такие свойства лопаткам турбины, при которых возможно их трехкратное использование, так как на фоне разноуровневой равноэффективной защиты поверхностей происходит равномерный единовременный износ. Это лишает необходимости проведения ремонта, т.к. основной металл лопатки не подвергается коррозионно-эрозионному разрушению. Следовательно, увеличение возможного эксплуатационного ресурса лопаток турбин ГТД в 2 - 4 раза даст довольно высокий показатель экономии средств на технологические затраты при проведении капитальных ремонтов двигателя в целом.

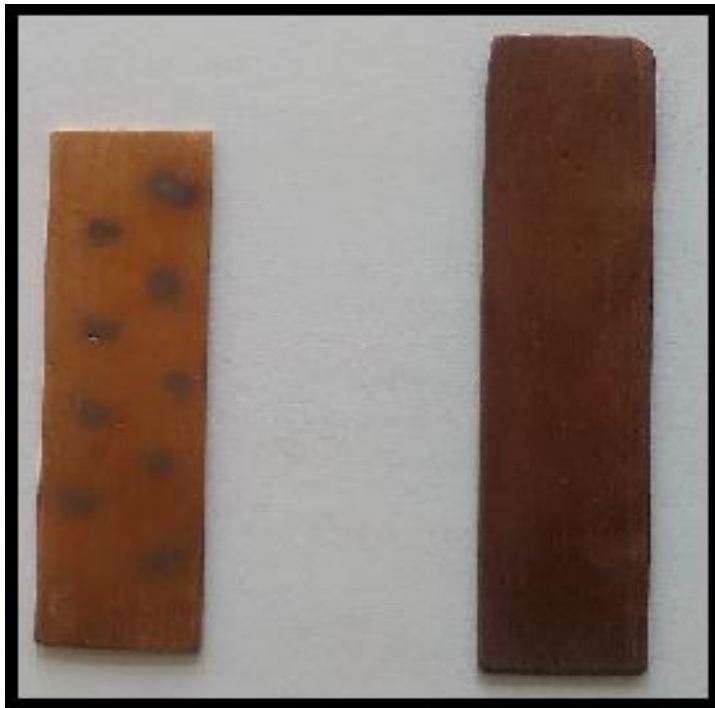
5.6. Изучение сравнительных характеристик разрушений лопаток турбин при экспериментальном термомеханическом воздействии

С целью получения сравнительных характеристик результатов совместного абразиво-эрозионного и температурного эксплуатационного воздействия на защитное покрытие пера лопатки проведен ряд экспериментальных работ.

В ходе этих работ изучались следующие зависимости:

1. Зависимость, которая существует между толщиной защитного покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при абразивном воздействии.
2. Зависимость, которая существует между толщиной покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при совместном абразиво-эрозионном воздействии.
3. Зависимость, которая существует между толщиной покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при высокотемпературном воздействии.

4. Анализ закономерности степени износа покрытия от его толщины по результатам совместного абразивно-эрозионного и температурного воздействия. Определение на базе полученных статистических данных необходимой толщины покрытия в зонах проекции действия эксплуатационной функции и по перу в



а)

б)

Рисунок 5.5. Образцы свидетели с зонами износа

нанесено специальное защитное покрытие.

В эксперименте предполагается использование 3-х и более образцов-свидетелей (рисунок 5.5,а), на которые было нанесено нитрид циркониевое покрытие толщиной 120 мкм. Для воспроизведения действующей эксплуатационной функции абразивно-эрозионного воздействия, использовалась сконструированная установка (рисунок 5.8). Воспроизведение эксплуатационного воздействия осуществлялось с применением абразива М40 (карбид кремния), подаваемого струей сжатого воздуха (давление 0,4 МПа) через устройство распыления (диаметр сопла 3,4 мм). Визуально результаты исследования зависимости, которая существует между толщиной защитного покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при пневмо-абразивном

целом для получения разноуровневой равноэффективной защиты с целью достижения равномерности износа.

Для исследования зависимости, которая существует между толщиной защитного покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при пневмо-абразивном и совместном термомеханическом воздействии проведены некоторые исследования. С этой целью были подобраны образцы-свидетели (рисунок 5.5), на которые было

воздействии, для удобства их восприятия, представлены в виде графика 1 на рисунке 5.6.

При рассмотрении данного графика просматривается прямая зависимость, существующая между толщиной защитного покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при пневмо-абразивном воздействии, от продолжительности эксперимента.

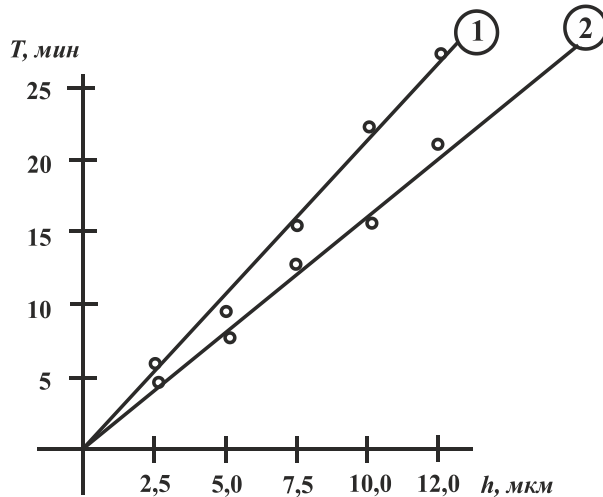


Рисунок 5.6. График износа ФОП: 1 – абразивный износ, 2 – совместный эрозионный и температурный износ



Рисунок 5.7. Общий вид установки для проведения эксперимента

Для изучения зависимости, которая существует между толщиной защитного покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при совместном эрозионном и температурном воздействии на функциональные части пера, также проведены определенные исследования. Эти исследования проводились аналогично с использованием образцов-свидетелей (рисунок 5.5,б), на которые было нанесено специальное защитное покрытие толщиной 120 мкм. При эксперименте предполагается использование 3-х и более образцов-свидетелей. Для воспроизведения действующей эксплуатационной функции использовалась сконструированная установка (рисунок 5.7). Воспроизведение совместного эксплуатационного воздействия осуществлялось с применением абразива М40 (карбид кремния), подаваемого струей сжатого воздуха (давление $0,5 \text{ кг/см}^2$) через

устройство распыления (диаметр сопла 3,4 мм) и кислородно-ацетиленовой аппаратуры, установленных в рабочей камере в виде термоабразивного модуля



(рисунок 5.8). Кислородно-ацетиленовая газовая смесь (пропорция 1:1), подавалась струей в виде пламени через сопло мундштука (диаметр 1,15 мм) газовой горелки ГС-2 со скоростью истечения в пределах 60-100 м/с и температурой 640 °С (до 2000 °С).

Общий вид термоабразивного модуля экспериментальной установки представлен на рисунке 5.8.

Визуально результаты исследования зависимости, которая существует между толщиной защитного покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при совместном абразивно-эрозионном и

Рисунок 5.8. Термоабразивный модуль температурном воздействии, для удобства их восприятия, представлены в виде графика 2 на рисунке 5.6.

При рассмотрении данного графика просматривается прямая зависимость, существующая между толщиной защитного покрытия пера лопатки турбины и степенью его изнашивания при совместном абразивно-эрозионном и температурном воздействии аналогично первому случаю, определяющаяся продолжительностью эксперимента.

Износ защитного покрытия в процессе эксплуатации турбины будет происходить пропорционально по определенному закону, т.е. величины, описывающие данный процесс (операторы и операнды), будут находиться в зависимости друг от друга при постоянных отношениях. Это можно отобразить в виде следующей формулы [140]:

$$A_x = \frac{h_x \gamma_1 \gamma_2}{\operatorname{tg} 0,41^\circ}, \quad (5.3)$$

где A_x – время (продолжительность) работы некоторой лопатки турбины до процесса восстановления (час);

h_x – толщина покрытия в заданной зоне лопатки турбины.

5.7. Основные рекомендации исследования

Проведенные в данной работе исследования дали возможность подготовить следующие рекомендации:

1. При планировании структуры (схемы, алгоритма, состава и т.д.) синтеза отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинных двигателей необходимо ориентироваться на начальные условия (сфера использования, назначение техники, тип турбины, режимы эксплуатации и т.д.), но более точно на действующие эксплуатационные функции. И не столько на сами функции, а больше на их особенности, выражаемые неравномерностью воздействия на функциональные элементы пера лопаток турбин. Результатом таких особенностей является явно выраженная неравномерность повреждений на поверхностях детали в виде эрозии, прогаров и т.д. Такие неравномерные разрушения лопаток турбин могут быть обусловлены пространственной формой лопатки, особенностями эксплуатации ГТД, пространственным расположением в тракте, взаимодействием с сопряженными узлами двигателя, температурной характеристикой рабочего тела, наличием абразивных частиц в газовом потоке и их совместным воздействием. Применяя ФОП можно обеспечить такие свойства, лопаткам турбин, предварительно изучив особенности эксплуатации и создав структуру

технологического процесса, при которых их характеристики в комплексе обеспечат изделию не только требуемый потенциал, но и новые свойства.

2. Технологическое обеспечение процесса обработки поверхности пера лопатки должно формироваться с учетом пространственного размещения лопаток турбин в газовом тракте, т.е. ориентироваться на принадлежность лопатки к определённой ступени турбины (удаление от камеры сгорания) и степень жаропрочности и микротвердости сплава самой лопатки.

3. Применяя ФОП, осуществляется обеспечение требуемого потенциала ГТД путем многократного использования лопаток турбин после ремонта на уровне лопатки одной ступени и на уровне лопаток турбин всего двигателя.

4. Для обеспечения повышения ресурса лопаток турбин и возможности многократного восстановления при ремонте, нанесение ФОП должно ориентироваться на необходимость обеспечить разноуровневую равноэффективную защиту как поверхности одной лопатки, так и групп лопаток каждой ступени различных турбин двигателя.

5. Обеспечение ФОС нанесенным покрытиям осуществляется за счет построения структуры технологического процесса, которая базируется на особых принципах ориентации технологических воздействий для обеспечения свойств покрытиям в соответствии с действующими эксплуатационными воздействиями (эрозионные, температурные, совместные). Нанесение ФОП предлагается выполнять в виде многослойной ступенчатой архитектуры. Следуя особым принципам ориентации технологических воздействий сформированное ФОП обеспечит разноуровневую равноэффективную защиту и равномерный износ.

6. Структура универсального технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода должна состоять из трех стадий.

7. Первая стадия технологического процесса отображает технологические операции до нанесения защитного покрытия на лопатки турбин. Совокупность этих операций направлена на подготовку поверхности лопатки турбин, находившихся в эксплуатации, к процессу нанесения защитного покрытия. В

начале первой стадии выполняется технический осмотр (дефектовка) лопаток турбин с целью определить детали, пригодные для проведения ремонта (восстановления). По окончании проводится обработка восстановленных поверхностей лопаток турбин предварительным глянецованием.

В случае подготовки новых лопаток турбин к нанесению защитного покрытия реализуется первая стадия, которая включает:

- грубое полирование поверхностей пера лопатки турбины;
- технический контроль геометрических размеров пера лопатки турбины;
- тонкое полирование элементов пера лопатки турбины.

Последующим шагом технологического процесса реализуется его 2-я стадия. Данный процесс связан с восстановлением лопатки турбины путем нанесения защитного покрытия с использованием вакуумной ионно-плазменной установки.

На 3-ей стадии технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин выполняются следующие технологические операции:

- повторное тонкое глянецование защитного покрытия;
- технический контроль геометрии всех лопаток турбины.

8. В данном диссертационном исследовании проведена работа по изучению возможности, с целью повышения ресурса лопаток турбин ГТД, применять функционально-ориентированные покрытия. При этом рассмотрен процесс подготовки поверхности пера лопатки к нанесению защитного покрытия путем полирования при условии наличия старых изношенных покрытий. Учитывая, что материалы покрытия и основного сплава тела лопатки турбины имеют разные физические и химические свойства, целесообразно применять способ направленного воздействия или функционально-ориентированный полировальный инструмент. Для этих целей были разработаны схемы трассировки перемещения полировального инструмента при выполнении операции полирования поверхности с различными материалами. Также были разработаны рекомендации по обеспечению сравнительно близких параметров шероховатости реальной поверхности материалов с разными физико-

химическими свойствами при выполнении технологических операций направленного воздействия полировального инструмента в момент обработки поверхности пера лопатки турбины.

9. С использованием математического объекта в виде матрицы структуры ФОП, указанных в таблице 5.3, происходит расчет количества слоев покрытия с выбором толщины каждого слоя, ориентируясь на номер ступени турбины (вид турбины, основной сплав тела лопатки). При этом пространственная архитектура защитного покрытия пера лопатки турбины проектируется в зависимости от изученных условий эксплуатации и особенностей совместных эксплуатационных воздействий (функций). Такой подход дает возможность повысить ресурс лопаток турбин ГТД при учете неравномерности воздействий эксплуатационных функций на уровне одной ступени турбины, различных ступеней одной турбины, на уровне ступеней различных видов турбин одного ГТД.

10. В отличие от традиционного подхода стоимость процесса с применением функционально-ориентированного подхода по экономическим показателям будет превышать первый на 12 – 13 %. Учитывая, например, что стоимость лопаток турбины компрессора (1-я ступень содержит 133 лопатки, 2-я ступень содержит 101 лопатку) двигателя ТВ3-117 составляет 6712730,00 рублей РФ то при реализации ФОП стоимость всех лопаток турбины увеличится на 12,5%. Но, учитывая предварительно проведенные расчёты оценки, можно сказать, что при использовании ФОП повышение ресурса лопаток турбин происходит в некоторых случаях более чем на 50%. Кроме этого ФОП придает такие свойства лопаткам турбины, при которых возможно их трехкратное использование, так как на фоне разноуровневой равноэффективной защиты поверхностей происходит равномерный единовременный износ. Это лишает необходимости проведения ремонта, т.к. основной металл лопатки, не подвергается разрушению. Следовательно, увеличение возможного эксплуатационного ресурса лопаток турбин ГТД в 4 раза даст довольно высокий показатель экономии средств на технологические затраты при проведении капитальных ремонтов двигателя в целом.

5.8. Внедрение результатов работы в производство

Проведенное диссертационное исследование выполнено с целью повышения ресурса лопаток турбин ГТД, а также эффективности процесса их ремонта и обслуживания при восстановлении. Это достигается путем увеличения циклов восстановления за весь период эксплуатации применяя ФОП, наносимые на перо лопатки турбины, реализуемые с учетом принципа обеспечения разноуровневой равноэффективной защиты с целью обеспечения равномерного износа покрытия на лопатках двигателя. Такой подход обеспечивается на базе сформированного технологического обеспечения и ориентированного структурирования схемы технологического процесса с подбором соответствующих технологических операций.

Для внедрения результатов исследования была разработана «Общая методика синтеза технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин авиационных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода» и составлена структура типового технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин ГТД с применением ФОП. Проведены эксперименты по изучению зависимости толщины ФОП лопатки турбины на процесс его износа, в случае воздействия действующих эксплуатационных функций, которые подтвердили рациональность принципа обеспечения разноуровневой равноэффективной защиты лопаток турбин на уровне лопаток турбины одной ступени и лопаток различных комплектов турбин ГТД.

Разработанная «Общая методика синтеза технологического процесса повышения ресурса лопаток турбин авиационных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода» внедрена в следующих организациях:

- ООО «Горловский энергомеханический завод» (Донецкая Народная Республика);

- Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Российская Федерация);

- ОАО «Ейский станкостроительный завод» (Российская Федерация);

- ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (Донецкая Народная Республика);

ООО «Горловский энергомеханический завод» совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ГОУ ВПО «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 турбин авиационных газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода. Результаты работы используются для проектирования технологической оснастки процесса напыления функционально-ориентированных покрытий лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 52000,00 рублей РФ (пятьдесят две тысячи рублей РФ 00 коп.).

Усинский филиал Ухтинского государственного технического университета 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 деталей турбин газотурбинных двигателей и газотурбинных установок, используемых в нефтегазовом комплексе на базе функционально-ориентированного подхода.

Полученные результаты и рекомендации по комплексному повышению ресурса лопаток турбин газотурбинных двигателей и газотурбинных установок, используемых в нефтегазовом комплексе на базе функционально-ориентированного подхода, приняты к использованию 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 деталей машин и систем нефтегазового комплекса».

ОАО «Ейский машиностроительный завод» совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» выполняют научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения.

Разработанная методика и рекомендации «Технологический процесс повышения ресурса лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода», приняты к использованию на ОАО «Ейский машиностроительный завод» для комплексного повышения ресурса лопаток турбин газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 59000,00 рублей РФ (пятьдесят девять тысяч рублей РФ 00 коп.).

Кафедрой «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» проводятся исследовательские работы по созданию и внедрению в производственные процессы предприятий функционально-ориентированных технологий машиностроения.

Исследовательская работа направлена на повышение ресурса лопаток турбин и ГТД в целом путем нанесения защитных функционально-ориентированных покрытий. Для этих целей используется вакуумная ионно-плазменная технология, позволяющая повысить общий эксплуатационный ресурс лопаток турбин, повысить их ремонтпригодность, увеличить количество циклов повторной эксплуатации после восстановления.

Разработанная методика и рекомендации «Технологический процесс повышения ресурса лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода», приняты к использованию в качестве научно-методического обеспечения для чтения курсов лекций по профилирующим предметам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное диссертационное исследование выполнялось с целью создания технологии, способной обеспечить специальные (перспективные) свойства лопаткам турбин газотурбинного двигателя путем нанесения защитного модульного ФОП. Данное покрытие должно повысить эксплуатационный потенциал лопаток турбин, работающих в условиях химических, термических, механических, комплексных эксплуатационных воздействий, неоднородных по своей структуре. Результаты исследования позволили решить ряд вопросов, а именно:

1. В результате анализа особенностей разрушения лопаток турбин определено, что повреждение поверхности пера лопатки в результате неравномерного воздействия эксплуатационных функций имеет различные формы. Данные формы выражаются неравномерностью разрушения защитного слоя и поверхности сплава, из которого изготовлена лопатка турбины (в одной ступени турбины, в различных ступенях). Для решения данного вопроса предложено выбрать метод синтеза функционально-ориентированных технологий. Подход, предлагаемый в данном научном направлении, позволяет придать лопаткам турбины соответствующие специальные характеристики (свойства) соответствующие особенностям условий эксплуатации.

2. Проведен обзор внедренных в производство технологий, позволяющих повышать качество рассматриваемых в данной работе деталей турбин (сопловые лопатки, рабочие лопатки), в результате которого выяснено, что большинство из них направленно на придание улучшенных характеристик функциональным частям лопатки методами, позволяющими обеспечить одинаковые защитные свойства для всей поверхности пера лопатки, без учета функционально-ориентированного воздействия разрушающих факторов. Это принято на производствах и вполне удовлетворяет техническим требованиям при изготовлении деталей. ФОП, которое в данной работе предложено нанести на перо лопатки турбины, имеет многомодульную (каждый может состоять из нескольких слоев) архитектуру с изменяющимися пространственными и техническими (функциональными) характеристиками каждого слоя (модуля).

3. Разработаны общие принципы повышения ресурса лопаток турбины на базе функционально-ориентированного подхода. Изучен и реализован процесс синтеза технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки на базе функционально-ориентированного подхода. Разработаны способы повышения ресурса лопаток турбины на базе функционально-ориентированного подхода. Разработана и предложена к использованию в производственных процессах методика «Технологический процесс повышения ресурса лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода».

4. В ходе работы по совершенствованию технологического процесса нанесения защитного покрытия на лопатки турбин разработан способ для повышения эффективности технологических операций, направленных на подготовку поверхностей (зон) функциональных частей корыта пера лопатки турбины к последующему формированию (построению, нанесению) архитектуры (структуры) ФОП. Подготовлены рекомендации по совершенствованию чистовой абразивной обработки поверхности пера лопатки турбины из сплавов и покрытий, имеющих различные функциональные характеристики. С использованием данных исследований организовывается структура технологического процесса с

универсальным подходом к ресурсному повышению свойств лопаток турбин. Сформирована структура ФОП, обеспечивающая лопаткам турбины специальные свойства при эксплуатации в сложной среде, где воздействие осуществляется неравномерно ни по силе, ни по природе, ни по продолжительности.

5. При разработке подхода, направленного на оптимизацию процесса полирования и подбора технологических операций подготовки сложных по структуре и форме поверхностей для нанесения ФОП, были составлены пространственные схемы движения деталей, схемы трассировки движения полировального инструмента по поверхностям зон пера лопатки турбины при подготовке данной поверхности к нанесению первого слоя ФОП. В качестве рекомендаций предложено использовать способ направленного воздействия полировальника или использования полировальника с ориентированными абразивными свойствами для выполнения обработки поверхности, где пятно контакта полировального инструмента сформировано одновременно на материалах с разными физико-механическими свойствами. Это обеспечивает придание реальной поверхности с различными свойствами равные показатели шероховатости.

6. Изученные основы создания технологических процессов на базе функционально-ориентированного подхода, основы процесса формирования структуры технологического процесса нанесения функционально-ориентированных покрытий на лопатки турбин газотурбинных двигателей, позволили составить классификацию ФОП и разработать варианты схем защитного покрытия для лопаток турбин. Это обеспечило разноуровневую равноэффективную защиту функциональных элементов (участков, зон) пера лопатки турбины и равномерность износа защитного покрытия, находящегося в процессе эксплуатации под неравномерным воздействием эксплуатационных функций.

7. Выполненные исследования позволили произвести анализ и повысить эффективность процесса напыления защитного (модульного) ФОП на лопатки турбин ГТД за счет разработки и проектирования пространственных схем

размещения и движения обрабатываемых деталей на вспомогательном устройстве в камере ионно-плазменной установки.

8. Комплексный анализ результатов исследования особенностей разрушений поверхности пера лопатки турбины позволил определить, что особенности разрушения поверхности пера лопатки могут быть выражены через коэффициент неравномерности, который для единичной лопатки (лопаток ступени одного номера) составляет 3,4, а для лопаток различных ступеней 1,3.

9. Проведенная исследовательская работа позволила сформировать структуру универсального технологического процесса нанесения ФОП на лопатки турбин, при котором возможно их трехкратное использование, так как на фоне разноуровневой равноэффективной защиты поверхностей пера обеспечивается равномерный единовременный износ всего защитного покрытия. Это лишает необходимости проведения ремонта, т.к. основной металл лопатки не подвергается коррозионно-эрозионному разрушению. Следовательно, увеличение возможного эксплуатационного ресурса лопаток рубин ГТД в 4 раза обеспечивает довольно высокий показатель экономии средств при проведении ремонтов двигателя в целом.

10. Внедрение результатов работы диссертационного исследования осуществлялось на (в):

- Горловском энергомеханическом заводе (г. Горловка, Донецкая Народная Республика);
- Ейском станкостроительном заводе (г. Ейск, Российская Федерация);
- Усинском филиале Ухтинского государственного технического университета (г. Усинск, Российская Федерация).
- ГОУ ВПО «ДОННТУ» (г. Донецк, Донецкая Народная Республика).

Экономический эффект от внедрения результатов диссертационного исследования может составить 111000,00 (сто одиннадцать тысяч рублей РФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраимов, Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. - М.: Машиностроение, 1993, - 336 с.
2. Абраимов, Н. В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов: Учебное пособие для авиационных вузов. / Н. В. Абраимов, Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов - М. : Высш. школа, 1998. - 444 с.
3. Абраимов, Н.В Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. / Н.В Абраимов, Ю.С. Елисеев - М.: Интермет Инжинеринг, 2001, - 622 с.
4. Абраимов, Н.В. К вопросу об эффективности многокомпонентных покрытий для жаропрочных сплавов. / Н.В. Абраимов, Ю.П. Шкретов, В.В. Лукина, Е.В. Борщ // Коррозия: материалы, защита. № 10/2005. С. 10 - 13.
5. Абраимов, Н.В. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / Н.В. Абраимов, Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов // Учебник для вузов под ред. Абраимова Н.В. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, - 560 с.
6. Абраимов, Н.В Структурные изменения в алюминидном покрытии на сплаве ЖС32 при баротермической обработке / Н.В. Абраимов, А.М. Терёхин, Ю.П. Шкретов // Коррозия: материалы, защита. № 9. 2008, 23 - 28 с.
7. Авиационно-космические материалы. / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, Н.Е. Калинина и др. - Запорожье: ОАО «Митор Сич», 2007. - 383 с.
8. Александров В. Г. Справочник по авиационным материалам. -М.: Транспорт, 1972. - 328 с.
9. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка материалов в активизированных средах. М., Машиностроение, 1979.
10. Ачимов, А.А. Исследование жаростойкого диффузионного покрытия на лопатках газотурбинных двигателей из жаропрочного никелевого сплава. / А.А. Ачимов, И.М. Толмачев, С.Ю. Удовиченко - Тюмень.: Вестник Тюменского государственного университета, № 7. 2014, - 7с.

11. Бартнев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении. [Текст] / С.С. Бартнев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд. - 1982. - 215с.

12. Барвинок, В.А. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД / В.А. Барвинок, И.Л. Шитарев, В.И. Богданович, И.А. Докукина, В.М. Карасёв // Вестник Самарского Государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). Самара: Издательство "Самарский университет", 2009. – Вып. 3(19). - Ч. 1. - С.11-29.

13. Биркгоф, Г. Современная прикладная алгебра / Г. Биркгоф, Т. Барти. - М.: Мир, 1976. - 400 с.

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

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

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

17. 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.

18. Вавилонский, Э.Б. Основной боевой танк России. Откровенный разговор о проблемах танкостроения / Э.Б. Вавилонский, О.А. Куракса, В.М. Неволин // ЗАО «Типография «РЕПРИНТ», г. Нижний Тагил, 2008. - С 173.

19. Венцель, Е.С. Исследование операций. - М.: Советское радио, 1972. - 552 с.

20. Воскобойников, Д.В., Кесель Б.А. Способ увеличения срока службы моторного масла и повышение надежности трибологической системы ГТД / Д.В. Воскобойников, Б.А. Кесель - Казань: КГУИ, 2015 - 6с.

21. Волчкевич, Л.И. Автоматизация производственных процессов: Учеб. пособие. - М.: Машиностроение, 2005. - 380 с.

22. Гишваров, А.С. Методы испытаний лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию / А.С. Гишваров, Н.М. Давыдов - Уфа: УГАТУ, 2014. - 10 с.

23. Горленко, А.О. Технологическое повышение износостойкости деталей с криволинейными поверхностями трения. Автореферат дис. д-ра техн. наук. - Брянск, 2003. - 31 с.

24. Горленко, О.А. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных показателей деталей машин // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 3. С. 361-368.

25. Грабченко, А.И. 3D методология исследования процессов алмазно-абразивной обработки / А.И. Грабченко, В.А. Федорович, В.И. Аносов // Современные технологии в машиностроении: Сборник научных статей. Том 1. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. С. 64-84.

26. Грановский, Г.И. Кинематика резания. - М.: Машгиз, 1948. - 200 с.

27. Гусакова, Л.В. Повышение эффективности шлифования поверхностей деталей из высоколегированных и жаропрочных материалов изменением конструкции и состава абразивного инструмента. Автореферат дис. канд. техн. наук. - Ростов н/д, 2012. - 18 с.

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

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

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

31. Егоров, М.Е. Технология Машиностроения / М.Е. Егоров, В.И. Дементьев, С.Д. Тишин, В.Л. Дмитриев - М.: Высшая школа, 1965. - 590 с.

32. Егоров, М.Е. Технология машиностроения / М.Е. Егоров, В.И. Дементьев, С.Д. Тишин, В.Л. Дмитриев - М.: Высшая школа, 1965. - 590 с.

33. Елисеев, Ю.С. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов // Учеб. пособие.- М.: Высш. шк., 2002. - 355 с.; ил.
34. Елизаветин, М.А. Технологические способы повышения долговечности машин / М.А. Елизаветин, Э.А. Сатель - М.: Машиностроение, 1969. - 400 с.
35. 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.
36. Ефремов, А.С. История создания первого серийного танка Т-80 с газотурбинной силовой установкой / А.С. Ефремов, М.В. Павлов, И.В. Павлов // Научно-популярный журнал «Вооружение и техника вчера, сегодня, завтра». 2011. Вып. 3(11). - Москва: ПО «Периодика», 2011. - С. 25-32.
37. Железнов, Г.С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе - Старый Оскол: ТНТ, 2011. - 456 с.
38. Журавлев, А.Н. Допуски и технические измерения. - М.: Высш. школа, 1981. - 256 с.
39. Зыков, А. А. Основы теории графов. - М.: Наука, 1986. - 384 с. - ISBN 978-5-9502-0057-1.
40. Ивашко, В.С. Электрохимическая технология нанесения защитных покрытий / В.С. Ивашко, И.Л. Куприянов, А.И. Шевцов - Минск: Навука і тэхніка, 1996. - 375 с.
41. Ивлев, Ю.В. Логика: Учебник. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. - 270 с.
42. Ивченко, Д.В. Эрозийная прочность деталей газовоздушного тракта вертолётных газотурбинных двигателей при эксплуатации в условиях запылённости воздуха. Современное состояние проблемы и путь её решения / Д.В. Ивченко, П.К. Штанько, Н.В. Исаев, И.Ю. Павлов - Запорожье: ЗНТУ, 2004. - 5 с.
43. Инструменты из сверхтвёрдых материалов / Под ред. Н.В. Новикова. - М.: Машиностроение, 2005. - 555 с.

44. Каблов, Е.Н. Теплозащитные покрытия для лопаток турбин высокого давления перспективных ГТД / Е.Н.Каблов, С.А.Мубояджян // ГТТ. 2001. №3. ВИАМ2011-205895.

45. Каблов, Е.Н. Теплозащитные покрытия для лопаток турбин высокого давления перспективных ГТД / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян // Научно-технический журнал «Металлы». 2012. №1. - Москва: ФГБУН РАН, 2012. - С. 5 – 14.

46. Карпинос, Д.М. Новые композиционные материалы / Д.М. Карпинос, Л.И. Тучинский, Л.Р. Вишняков - К.: Высш. школа, 1977. - 312 с.

47. Кеба, И.В. Авиационный газотурбинный двигатель ТВ2-117А. Учебное пособие. М.: «Машиностроение», 1977. - 176с.

48. Кирсанов, С.В. Инструменты для обработки точных отверстий / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе, В.И. Кокарев - М.: Машиностроение, 2005. - 335 с.

49. Коломыцев, П.Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. М.: Metallurgia, 1991. - 236 с.

50. Колесов, И.М. Основы технологии машиностроения: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. - М.: Высш. шк., 2001. - 591 с.

51. Комплексная автоматизация производства в радиоэлектронной промышленности / В.Н. Тилипалов, Л.Н. Алексеев, А.И. Лобановский и др. - М.: Машиностроение, 1990. - 248 с.

52. Копыл, Г.Ф. Основы технологии и оборудование производства микроэлектронных устройств: Учеб. пособие. - К.: Высш. шк., 1992. - 415 с.

53. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн - М.: Наука, 1977. - 832 с.

54. Косилова, А. Г. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т.; под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, Т. 1, 1986. - 656 с.; Т. 2, 1985. - 496 с.

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

56. Кремень, З. И. Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин - СПб.: Политехника, 2007. - 424 с.
57. Крымов, В.В. Производство газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин - М.: Машиностроение // Машиностроение-Полет, 2002. - 376 с., ил.
58. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф. Ильюшенко и др. - Мн.: Бестпринт, 1998. - 212 с.
59. Лесников, В.П. Технология восстановительного ремонта турбинных лопаток ГТД. / В.П. Лесников, В.П. Кузнецов., А.В. Коротких - Е.: УГТУ «УПИ». Авиационно-космическая техника и технология, 2004, № 7(15) - 4с.
60. Лозицкий, Л.П. и др. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей.- М.: Воздушный транспорт, 1992. - 535 с.
61. Локай, В.И. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов / В.И. Локай, М.К. Максимова, В.А. Стрункин // Учебник для вузов. - М.: Машиностроение, 1979. - 620с.
62. Макаров, В.Ф. Влияние режимов глубинного шлифования на устойчивость процесса и предел выносливости деталей из жаропрочных сплавов / В.Ф. Макаров, С.П. Никитин // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2014. Вип. 3 (49). С. 108 - 113.
63. Макин, Ю. Н. Ремонт летательных аппаратов и авиационных двигателей: текст лекций. - М.: МГТУ ГА. Ч. 1. - 1997. - 100 с.
64. Макин, Ю.Н. Ремонт летательных аппаратов и авиационных двигателей. Текст лекций. Часть 2 / Ю.Н. Макин, В.П. Фролов, О.Ю. Макина - М.: МГТУ ГА, 2006.- 78с.
65. Маслов, А.Р. Приспособления для металлорежущего инструмента. - М.: Машиностроение, 2008, - 320 с.
66. Маталин, А.А. Технологии машиностроения. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. - 496 с. с ил.

67. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. - 847 с.
68. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.; Машиностроение, 1974. - 320 с.
69. Мак-Даниель, И. Процессы столкновений в ионизированных газах. – М.: Мир, 1967. - 832 с.
70. Маляренко, А.Д. Современные направления совершенствования технологии обработки высокоточных деталей // 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. 115-123.
71. Мирдель, Г. Электрофизика. - М.: Мир, 1972. - 608 с.
72. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. - Донецк: ДонНТУ, 2009. - 347 с.
73. Михайлов, А.Н. Функционально-ориентированные покрытия для повышения эксплуатационных свойств деталей машин / А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов, Р.М. Грубка, М.Г. Петров - Донецк: ДонНТУ, 2016. - 15 с.
74. Михайлов, А.Н.. Основы синтеза композиционных технологий машиностроения / Е.А. Михайлова, Д.А. Михайлов - Донецк.: ДНТУ, 2011. - 9 с.
75. Михайлов, А. Н. Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационных двигателя на базе функционально-ориентированной технологии / А. Н. Михайлов, Т.В. Хавлин // Международный сборник научных трудов / «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». 2017. №1. - Донецк: ДонНТУ, 2017. С. 84-100
76. Михайлова, Е.А. Некоторые особенности нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние цилиндрические поверхности изделий / Е.А. Михайлова, Д.А. Михайлов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник докладов VII международной научно-технической конференции. Екатеринбург: УрГГУ, 2009. - 395 с. С. 340 - 345.
77. Михайлов, В. А. Повышение структурной надежности вертолетных газотурбинных двигателей / В. А. Михайлов, А. П. Пичко, Т. В. Хавлин,

А. А. Колодяжный, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Гитуни, А. Н. Михайлов // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века. - Донецк: ДонНТУ, 2018. - Т. 2 . - С. 62-66.

78. Михальцев, В.Е. Теория и проектирование газовой турбины / В.Е. Михальцев, В.Д. Моляков // М.: Учеб. пособие по курсу «Лопаточные машины газотурбинных и комбинированных установок. Газовые турбины». Ч. 1, 2: - М.: МГУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 116 С.: ил.

79. 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.

80. Михайлов, А. Н. Особенности полировки лопаток ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий под напыление нового покрытия / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, А.П. Недашковский // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». 2014. Вып.1 (47). - Донецк: ДонНТУ, 2014. - С. 207-212.

81. Михайлов, А.Н. Разработка универсальной структуры технологического процесса напыления покрытий. Синтез структурных вариантов / А.Н. Михайлов, Е.А. Михайлова, Т.Я. Аль-Судани, Д.А. Михайлов // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2010. Вып. 39. С. 136 – 144. ISSN 2073-3216.

82. Михайлов, А. Н. Новые тенденции в повышении ресурса газотурбинных двигателей и установок на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. 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. 43-47.

83. Мосталыгин, Г.П. Технология машиностроения / Г.П. Мосталыгин, Н.Н. Толмачевский - М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.

84. Мрочек, Ж.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных, электродуговых покрытий / Ж.А. Мрочек, Б.А. Эйзнер, Г.В. Марков - Минск: Наука и техника, 1991. – 96 с.

85. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков, А.А. Марков, Л.В. Лаврова, Н.Ю. Бердышев. - К.: Техника, 1992. - 143 с.

86. Ненашев, М.В., Перспективные технологии, свойства и применение детонационных покрытий / М.В. Ненашев, С. Ю. Ганигин, А.Н Журавлев, А.С. Дьяконов, С.А. Белокоровкин, Д.Ю. Карякин // Вестник Самарского Государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. КОРОЛЁВА (национального исследовательского университета) № 3 (27) Часть 1 2011. – Самара: Издательство "Самарский университет", 2016 - с. 197-202.

87. Нечаев, Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров // Учебник для вузов. 4.1. - М.: Машиностроение, 1977. - 312с.

88. Никифоров, А.Д. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Высш. шк., 2000. - 510 с.

89. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общ. Ред. А.А. Панова. - М.: Машиностроение, 2004. - 784 с.

90. Орлов, П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. - М.: Машиностроение, 1988. - 384 с.

91. 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 // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». 2018. Вып. 2 (61). - Донецк: ДонНТУ, 2018. - С. 64-74.

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

93. Пичко А. П., Особенности обеспечение 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 // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». 2019. №1. - Донецк: ДонНТУ, 2019.

94. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В.К. Яценко, Г.З. Зайцев, В.Ф. Притченко, Л.И. Ивченко. - М.: Машиностроение, 1985. - 232 с.

95. Поклад, В.А. Покрытия для защиты от высокотемпературной газовой коррозии лопаток ротора турбины ГТД. М.: Двигатель. № 4(70) 2010 г. С. 4 - 9.

96. Политехнический словарь / Редкол.: А.Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Советская энциклопедия, 1989. - 656 с.

97. Попов, В.Л. Инвариант // Математическая энциклопедия. - М.: Советская энциклопедия, 1979. - Т. 2. - С. 526.

98. Прилуцкий, В.А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностного слоя деталей машин путем управления периодическими погрешностями обработки. Автореферат дис. д-ра техн. наук. - Брянск, 2004. - 36 с.

99. Применко, А.Е. «Газовые турбины и применение их в авиации». – М.: ГИОП, 1950. - 157 с.

100. Проблемы развития технологии машиностроения / Под общей ред. Э.А. Сателя. - М.: Машиностроение, 1967. - 592 с.

101. Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Г.Н. Андреев, В.Ю.

Новиков, А.Г. Схиртладзе; Под ред. Ю.М. Соломенцева. - М.: Высш. шк., 2001. – 415 с.

102. Проектирование технологических процессов в машиностроении: Учебное пособие для вузов / И.П. Филонов, Г.Я. Беляев, Л.М. Кожуро и др.. - Мн.: УП «Технопринт», 2003. - 910 с.

103. Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов». - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. - 360 с.

104. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. - Киев: Научная мысль, 1984. - 272 с.

105. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко - Киев: Научная мысль, 1994. - 180 с.

106. Сендюрев, С.И. Современные системы охлаждения сопловых лопаток высоконагруженных газовых турбин / С.И. Сендюрев, А.С. Тихонов, В.Т. Хайрулин, Н.Ю. Самохвалов - Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2015. - 13 с.

107. Симонов, В.Н. Хромоалитирование циркуляционным способом охлаждаемых лопаток газовых турбин / В.Н. Симонов, Н.В. Абраимов, Ю.П. Шкретов, В.В. Лукина, А.М. Терёхин - М.: Металловедение и термическая обработка металлов. № 7 (625) 2007. С. 36-39.

108. Ситникова, М.Н. Исследование процесса подготовки поверхностей деталей турбины авиационных двигателей под газотермическое напыление. Автореферат дис. канд. техн. наук. - Рыбинск, 2013. - 16 с.

109. Скачко, П. Г. Управление войсками с помощью сетевых методов. / П. Г. Скачко, В. М. Куликов, Г. Т. Волков. - М.: Воениздат, 1974. - 144 с.

110. Скворцов, А.В. Система автоматизации проектирования интегрированных технологических процессов в машиностроении // Вестник машиностроения, 2004, № 12. С. 34-39.

111. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М.

Булыжев и др. / Под общ. ред. Л.В. Худобина - М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

112. Смирнов, Н.Н. Техническая эксплуатация летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1990. - 70с.

113. Смыслов, А. М. Способ получения жаростойкого покрытия [и др.] // Заявка РФ № 2009116343 МПК С23С14/00, положительное решение от 30.08.2011 г.

114. Смыслов, А. М. Ионно-плазменная технология формирования покрытий на лопатках турбины ГТД из жаростойких никелевых сплавов / А. М. Смыслов, А. Д. Мингажев, К. С. Селиванов, М. К. Смыслова, А. А. Мингажева - Уфа.: УГАТУ, 2012, - 4с.

115. Соколовский, А.П. Научные основы технологии машиностроения. - М.: Машгиз, 1955.

116. Соколовский, А.П. Основы технологии машиностроения - М.-Л.: НКМ СССР ГНТИМЛ, 1938. - 680 с.

117. Сомов, Ю.С. Композиция в технике. - М.: Машиностроение, 1987. - 288 с.

118. Строганов, Г.Б. Жаропрочные покрытия для газовых турбин / Г.Б. Строганов, В.М. Чепкин, В.С. Терентьева - М.: "Навигатор - Экстра", 2000, 165 с.

119. Суслов, А.Г. Энциклопедия. Технологи России (машиностроение). Т. 1. Технология машиностроения, станки и инструменты / А.Г. Суслов, В.В. Бушуев, В.А. Гречишников, В.П. Смоленцев // Под общ. ред. А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение - 1, 2006. - 412 с.

120. Технология машиностроения: В 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; // Под ред. А.М. Дальского. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. - 564 с.

121. Технология машиностроения (специальная часть) / Б.Л. Беспалов, Л.А. Глейзер, И.М. Колесов и др. - М.: Машиностроение, 1973. - 447 с.

122. Тихонов Н.Т. Теория лопаточных машин авиационных газотурбинных двигателей / Н.Т. Тихонов, Н.Ф. Мусаткин, В.Н. Матвеев - С.: Самара. СГАУ, 2001 - 155 с.

123. Толочко, Н.К. Технология послойного синтеза - новый метод формообразования порошковых изделий / Н.К. Толочко, Н.В. Соболенко, С.Е. Мозжаров и др. // Вестник машиностроения, 1995. №4. С. 22-25.

124. Трифонов, В. В. Физические основы доалитирования на рабочих лопатках турбины. - Омск.: ОГТУ, 2013. - 2 с.

125. Хавлин, Т.В. Актуальность функционально-ориентированного подхода в повышении свойств изделий / Сборник трудов международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века - 2016». - Севастополь: ДонНТУ, 2016. Т. 2 . - С 149 - 150.

126. Хавлин, Т. В. Исследование особенностей разрушения лопаток турбин авиационных двигателей / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, А. П. Недашковский, В. В. Ткач, Е. С. Зиборов // 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. - Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. - С. 182-185.

127. Хавлин, Т.В. Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационных двигателя на базе функционально-ориентированной технологии /Т.В. Хавлин, Д.Н. Михайлов, А. Н. Михайлов // Международный сборник научных трудов / «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». 2019. №2. - Донецк: ДонНТУ, 2019. С. 65-76.

128. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. - М.: Машиностроение, 2005. - 272 с.

129. Холщевников, К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин // Учебник для вузов. - М.: Машиностроение, 1986. - 432с.

130. Хубка, В. Теория технических систем: Пер. с нем. - М.: Мир, 1987. - 208 с.
131. Чичков, Б.А. Рабочие лопатки авиационных ГТД. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток. - Москва: МГТУ ГА, 2004 - 74с.
132. Шальнов, В. А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
133. Ющенко, К. А. Анализ разрушения и долговечности лопаток турбин с защитным покрытием [Электронный ресурс] / Ющенко К. А., Малашенко И. С., Яровицын А. В., Кушнарера Т. Н., Гусев Ю. В., Петрик И. А. // Вибрации в технике и технологиях. - 2015. - № 1.
134. 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.
135. Ящерицын, П.И. Проектирование технологических процессов прямого выращивания изделий / П.И. Ящерицын, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонГТУ, 2000. Вып. 14. С. 147-152.
136. Ivchenko, T. Estimation of Possibilities of the Productivity Rise at Turning of Hard / Ivchenko Tatiana, BoguslavskiY Vadim, Petryaeva Irina, Mihaylov Dmitriy.// Advanced Materials Research. Vol. 1036, 2014. Trans Tech Publications, Switzeland. pp 355-359. Doi: 4028/www.scientific.net /AMR.1036.365.
137. Slatineanu, L. Non-traditional manufacturing processes. / Slatineanu L., Nagit G., Dodun O. and other. - Chisinau: TEHNICA INFO, 2004. - 300 p.
138. Schey John A. Introduction to manufacturing processes. International Edition, 2000. - 962 p.
139. Taranenko, W. Technologia ksztaltowania czesci maszyn o malej sztywnosci / Taranenko, W., Swic A.. – Lublin:Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2005. – 282 p.
140. http://donntu.org/sites/default/files/documents/dissertation_michailov.pdf

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Методика и рекомендации по синтезу технологического обеспечения
отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинного
двигателя**

Технологический процесс повышения ресурса лопаток турбин авиационных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода

Газотурбинные двигатели в настоящее время являются основным силовым агрегатом, применяемым в авиационной промышленности (основной двигатель, вспомогательная силовая установка и т.д.), а также широко внедрённым в другие группы отрасли машиностроения (автостроение, танкостроение, судостроение, силовые установки электростанций, железнодорожные установки, установки по перекачке природного газа и др.). Достоинством таких агрегатов является получение больших мощностей при сравнительно небольших массогабаритных показателях.

В современной авиационной промышленности намечена тенденция по созданию авиационных ГТД (газотурбинных двигателей) с высокими показателями основных характеристик (повышение КПД, высокая надёжность и живучесть, возможность выполнения модернизации и др.). На фоне этого процесса продолжают эффективно использоваться ГТД, разработанные и внедрённые в производство в более ранние периоды (двигатели летательных аппаратов 3-го и 4-го поколений).

В зависимости от конструктивных схем устройства преобразователя энергии, используемые в настоящее время типы ГТД различны (с форсажной камерой, двухконтурные, турбовентиляторные, турбовинтовентиляторные, турбовинтовые, турбовальные и др.). Так, например, одновременно находят применение ГТД, произведённые в ОДК «УМПО» (г. Уфа) и ММПП «Салют» (г. Москва), 3-го поколения типа АЛ-21Ф-3 для самолётов Су-24М/МР, ГТД АЛ-31Ф, для сверхзвуковых самолётов 4-го поколения МиГ-29 и Су-27, ГТД АЛ-41Ф1, для сверхзвуковых самолётов 5-го поколения Су-35 и опытного Су-57.

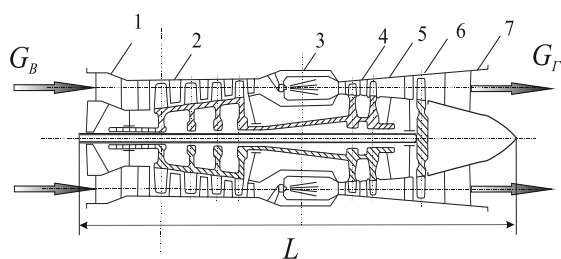


Рисунок П2.1. Схема вертолётного ГТД со свободной турбиной с выводом вала отбора мощности вперёд

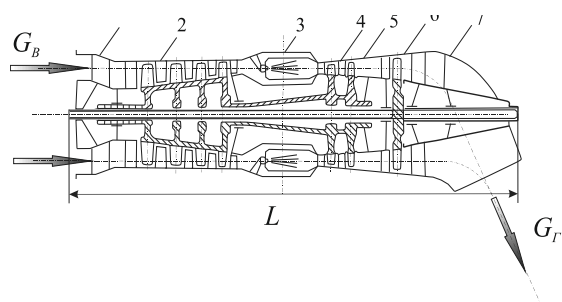


Рисунок П1.2. Схема вертолётного ГТД со свободной турбиной с выводом вала отбора мощности назад

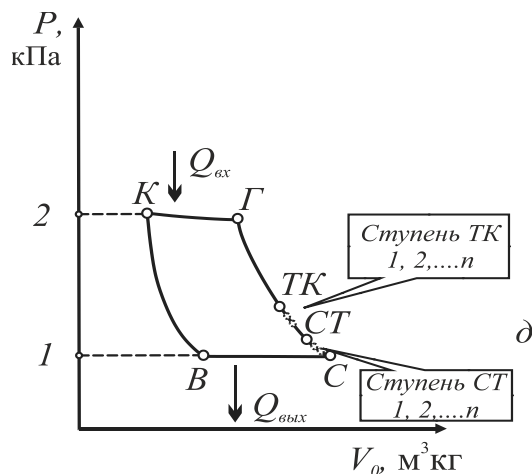


Рисунок П1. 3. Рабочий процесс ГТД, где: $Q_{вх}$ — тепло подводимое к камере сгорания, $Q_{вых}$ — тепло отводимое в атмосферу

Аналогично продолжают наравне использоваться турбовальные двигатели серии ТВ рисунок П1.1. и рисунок П1.2., ТВ2-117, ТВ3-117 (на базе разработок ОАО «Климов») для вертолётов Ми-8 (МТ), Ми-8МСБ, Ми-24, Ка-32 и модернизированные ВК-2500 (АО "Климов") для модификации вертолетов Ми-17, а также для новейших боевых Ми-28, Ка-52, Ми-35.

В основе рабочего процесса ГТД теоретически лежит идеальный цикл, составляющими которого являются: подвод и отвод тепла при $p = const$, отсутствие теплообмена при сжатии и расширение рабочего тела.

Реальный процесс далеко не идеален в силу наличия различного рода потерь энергии рабочего тела, как показано на рисунке П1.3., где:

- $B-K$ — политропическое сжатие во входном устройстве;
- $K-Г$ — горение топлива в камере сгорания;
- $TK (1, 2, \dots, n)$ — политропическое расширение рабочего тела в турбине (ступенях, турбине высокого давления, турбине низкого давления и т.д.) компрессора;
- $TK-CT$ — политропическое расширение рабочего тела в свободной турбине (ступенях

давления и т.п.);

- $CT-C$ – политропическое расширение рабочего тела в выходном устройстве;

- $C-B$ – процесс условного возврата рабочего тела на вход в двигатель.

Развитие авиационной промышленности направлено на повышение характеристик ГТД, обеспечивающих грузоподъёмность техники, дальность и скорость передвижения, получения большего количества энергии, и т.д.

Улучшение таких характеристик возможно за счёт повышения мощности двигателя путём повышения давления в компрессоре и температуры газа на входе в турбину. Такой процесс можно графически представить в виде, как показано на рисунке П1.4, где:

- $B-K' > B-K$ – процесс увеличения давления на входе в турбину;

- $KГ'' > KГ$ – процесс увеличения температуры подводимого газа к входу турбины.

Одной из подсистем, отвечающих за повышение мощности двигателя,

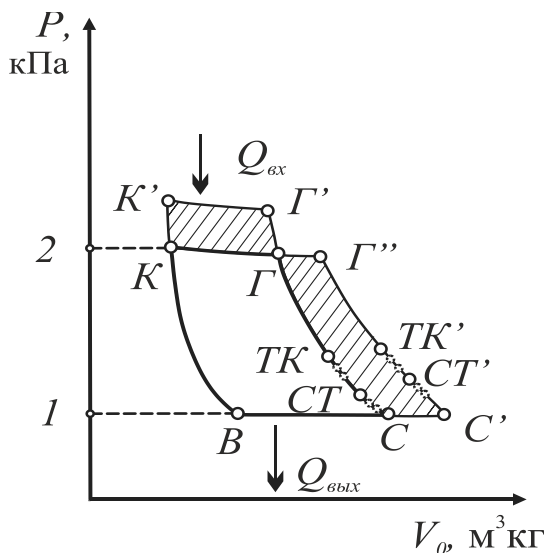


Рисунок П1.4. Процесс изменения мощности ГТД за счёт увеличения давления и температуры

является турбина. Турбина – это лопаточная машина, в которой происходит отбор энергии от сжатого и нагретого газа и преобразование ее в механическую энергию вращения ротора. Основными элементами, участвующими в преобразовании разных видов энергии являются детали турбин, а именно лопатки ротора (рабочие лопатки) и статора (лопатки соплового аппарата). Совокупность статора и ротора с установленными в нём рабочими лопатками называется ступенью турбины, в зависимости от типа двигателя турбины могут иметь одну, две, и три ступени, а некоторые турбовинтовые и двухконтурные ГТД четыре, шесть и более ступеней.

Итак, определив основную тенденцию повышения мощности турбины, можно сделать вывод, что лопатки турбин в процессе эксплуатации работают в сложных условиях. При выполнении своей основной функции, т.е. преобразования энергии набегающего газового потока в энергию механическую, на перо лопатки оказывается влияние целого ряда эксплуатационных воздействий. Это могут быть температурные воздействия, эрозионно-коррозионные воздействия, воздействия инородных тел, воздействия, возникающие вследствие действия сил инерции и т.д.

При этом в неравномерности разрушения прослеживается зависимость пространственного расположения лопаток в той или иной ступени. Группы таких лопаток могут быть, например определены как:

- лопатки соплового аппарата турбины компрессора (1-й, 2-й, n - я ступень);
- рабочие лопатки турбины компрессора (1-й, 2-й, n - я ступень);
- лопатки соплового аппарата свободной турбины (1-й, 2-й, n - я ступень);
- рабочие лопатки свободной турбины (1-й, 2-й, n - я ступень).

При этом следует учитывать количество каскадов в ГТД и отношение к ним лопаток, это определит дополнительное наличие групп.

Используемые технологические методы производства лопаток турбин ГТД, повышение их качества, проведение ремонта в целом обеспечивают создание изделий, способных работать в сложных условиях. Но постоянно растущий спрос к возможностям ГТД определяет необходимость создания и применения новых, ФОТ (функционально-ориентированных технологий), способных обеспечить качественно новую совокупность свойств [72].

В ходе процесса повышения ресурса, лопаток турбин ГТД, необходимо изучение и проектирование объектов системы (рисунок П1.5.), а именно:

- структурирование действующих эксплуатационных функций и возникающих особенностей износа (разрушения) лопаток турбин ГТД;
- изучение возникающих особенностей износа (разрушения) лопаток турбин;

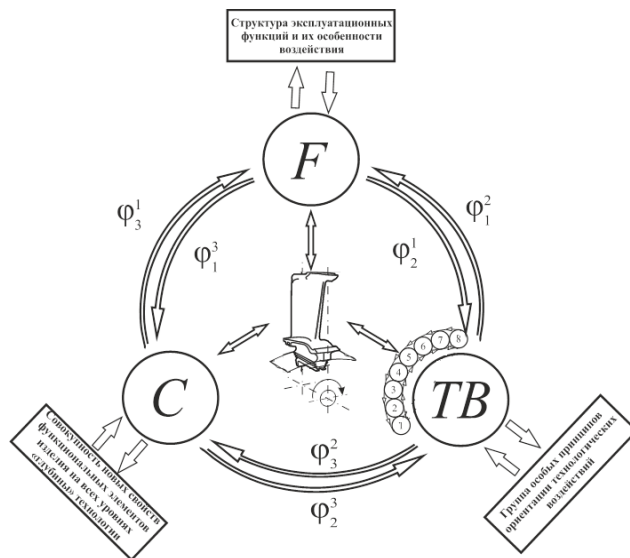


Рисунок П1.5. Модель реализации технологического процесса, поддерживаемого связями взаимодействия φ_i^j между объектами системы, где: F – эксплуатационные функции, TB – технологические воздействия, C – свойства детали, 1...8 – группа особых принципов ориентации технологических воздействий

- проектирование совокупности новых свойств каждого функционального элемента изделия на всех уровнях «глубины» и «ширины» технологии и создание маршрута или структуры технологического процесса, учитывая их особую ориентацию, следуя принципу ОРРЗ. При этом следует отметить главную отличительную особенность ФОР – это рекуррентная последовательность изучения и проектирования объектов системы, т.е. использование обратных связей, позволяющих определять и формировать, в общем, будущий эксплуатационный потенциал изделия на уровне всего изделия и на уровне функциональных частей (элементов) [72, 73, 74].

Таким образом, можно сделать вывод, что ФОР позволит выполнить процесс повышения ресурса лопаток турбины ГТД, на глубоко структурированном уровне изделия, ориентированный исключительно на придание тех специальных свойств изделию, которые необходимы для выполнения своих функций, при работе, как мы говорим, в сложных условиях. При этом преобразование изделия в заготовку должно выполняться по средствам реализации технологических воздействий на базе восьми особых принципов ориентации [72].

Для придания деталям ГТД качественно новых свойств на базе функционально-ориентированных технологий возможно применение защитных

(жаропрочных, термостойких, комплексных) покрытий при использовании соответствующего технологического обеспечения.

Процесс синтеза ФОС лопаток турбины, на определённом этапе, должен выполняться в следующей последовательности:

1. Изучение и определение особенностей разрушения лопаток турбин и действующих на них эксплуатационных функций.

2. Установление причинно-следственной связи разрушений лопаток турбины ГТД с условиями эксплуатации (действующими эксплуатационными функциями).

4. Разработка вариантов схем ориентации технологических воздействий для повышения ресурса лопаток ГТД на базе ФОТ.

Изучение процесса эксплуатации технической системы или изделия, а в частном случае процесса эксплуатации лопаток турбин ГТД, позволяет выявить множество различных особенностей условий работы и описать природу их возникновения. Такими особенностями могут являться [72]:

1. Неравномерность распространения деформации растяжения, сжатия, сдвига, (среза), кручения, изгиба, а также объемных и сложных комбинированных деформаций по конструкции лопатки в целом, а так же ее элементам.

2. Неравномерность и местное действие контактных деформаций на исполнительных элементах лопатки. Наличие краевых эффектов, кромочных контактов и деформаций смятия.

3. Возникновение коррозионных, механических, химических, физических, тепловых и комбинированных процессов, обусловленных сложным движением рабочего тела в тракте (сепарация частиц воздуха и примесей, возникновение пограничного слоя на контактных поверхностях, возникновение вихревых потоков, неравномерное распределение температуры, совместное воздействие и т.д.).

4. Возникновение переменных нагрузок, деформаций и внешних воздействий, не постоянного времени действия.

5. Особенности, возникающие из-за решения вопросов эргономики, эстетики и других задач теории композиции в технике, а также решения вопросов конъюнктуры рынка и др.

Анализируя структуру и природу этих особенностей можно утверждать о наличии таких элементов, частей, зон лопаток ГТД, в которых, во время работы напряжение наиболее сконцентрировано и в тоже время концентрация может распределяться по изделию и пространственно и изменяться по времени продолжительности воздействия и степени сложности.

Обобщённо можно перечислить особенности структуры разрушений лопаток ГТД, которые возникнут при эксплуатации, а именно:

1. Неоднородность и неравномерность износа поверхности лопатки обусловленные взаимодействием поверхности и рабочего тела (условий внешнего воздействия), свойств материала лопатки, особенностей конструкции лопатки.

2. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленных взаимодействием сопряжённых элементов, частей, зон лопатки, испытывающих различные силовые воздействия в один период времени.

3. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленных взаимодействием лопатки с сопряжёнными узлами (детальями) двигателя, и технического состояния этих узлов.

4. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленных качеством производства (технология литья или выращивания, качество отделочно-упрочняющей обработки лопаток и др.).

5. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленных технологией повышения качества (применение редких металлов при изготовлении, применение различных видов энергетического воздействия, отделочно-упрочняющие технологии и др.).

6. Неоднородность и неравномерность разрушений, обусловленных сложно структурированными процессами, протекающими в проточной части двигателя (описанными в теории, гипотетически предполагаемыми, неописанными в теории).

Таким образом, причиной разрушения элементов (частей) лопаток ГТД является множество функциональных воздействий (термических, физических, химических и т.д.), а возникновение особенностей разрушения, т.е. неоднородность (неоднородность), возникает вследствие неоднородности (неоднородности) функциональных воздействий.

Причинно-следственная связь разрушений лопаток турбины ГТД с условиями эксплуатации (действующими эксплуатационными функциями) в определённой степени изучена и представлена в работах различных авторов [22, 44, 133].

Анализ причинно-следственных связей между условиями эксплуатации и особенностями разрушения позволяет сделать вывод, что основная эксплуатационная функция обобщает в себе множество функций нижнего уровня эксплуатационного воздействия (энергетических, технологических, пространственных и т.д.). Данное множество функций, которые с определённой особенностью оказывают прямое воздействие на тело лопатки ГТД, и является оператором, определяющим множество неоднородностей и особенностей структуры разрушения лопатки ГТД, оказывая как общее, так и избирательное



Рисунок П1.6. Виды эксплуатационных повреждений лопаток турбин ГТД

воздействие на функциональные части, элементы, зоны исследуемого изделия.

Последствиями этих воздействий обобщённо могут являться следующие виды (рисунок П1.6.). Эти факторы фактически определяются особенностями технического устройства и режимов работы турбины силовой установки, деталями которой являются лопатки ротора и статора.

Придание требуемых свойств исследуемому изделию в данном случае

возможно благодаря применению жаропрочных, жаростойких, комбинированных функционально-ориентированных покрытий.

Принципиальной особенностью ФОРТ является то, что придание свойств изделию (применение технологических воздействий) осуществляется не только на уровне всего изделия, а на множестве уровней, т.е. уровне частей, участков, составляющих, зон, макрозон, микрозон, нанозон при этом основной процесс происходит на базе особых принципов ориентации технологических воздействий [72]:

1. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе изделия, характеристик реализации технологического воздействия и параметров обеспечения необходимых свойств в этом функциональном элементе изделия на каждом уровне глубины технологии;

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента изделия, в котором действует элементарная функция, геометрическим параметрам зонального элемента реализации технологического воздействия потоков материи, энергии и информации на изделие, и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств на каждом уровне глубины технологии;

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 изделия на каждом уровне глубины технологии;

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств, в пространстве каждого функционального элемента изделия на каждом уровне глубины технологии;

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных и пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных

эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе изделия на каждом уровне глубины технологии.

6. Структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах изделия из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всего изделия на каждом уровне глубины технологии.

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом на каждом уровне глубины технологии.

При этом следует отметить, что наибольшая эффективность в создании технологии достигается при реализации указанных принципов ориентации технологических процессов, объединённых между собой итерационными связями, а именно обеспечивается возможность создания управляемого синтеза технологического процесса, результатом которого будет производство (ремонт) лопаток, составление прогнозов качества лопаток ГТД, анализ функциональных показателей производимой продукции, а также манипуляция техническими решениями на различных уровнях технологического процесса с внесением корректур.

Процесс повышения ресурса лопатки ГТД направлен на обеспечение при изготовлении (ремонте) разноуровневой равноэффективной защиты путём применения управляемых технологических воздействий (TB) материальных M , энергетических E и информационных I типов, которые в процессе преобразования можно представить множествами следующих типов [72]:

$$TB \rightarrow \{M, E, I\} = \{(m_1, e_2, i_3), (m_2, e_2, i_2), \dots, (m_G, e_G, i_G)\}, \quad (\text{П.1.1})$$

где M – поток технологических воздействий материального типа;

E – поток технологических воздействий энергетического типа;

I – поток технологических воздействий информационного типа;

(m_g, e_g, i_g) – кортеж материи m_g , энергии e_g и информации i_g , реализуемые в точке g пространства детали;

G – мощность множества TB .

Например, повышая ресурс лопаток турбин ГТД с помощью нанесения защитных покрытий, следует учитывать тот факт, что в каждую точку поверхности (пространства) преобразуемого изделия должно быть реализовано TB с необходимыми параметрами потоков материи, энергии и информации $(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v})$. При этом параметры $m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}$ выбираются и определяются зависимостью между действующими в данных точках эксплуатационными функциями и свойствами, которые необходимо придать, т.е. на основании обратных связей, позволяющих определять и формировать эксплуатационный потенциал изделия.

Реализация технологических воздействий в ФОТ должна базироваться на особых принципах ориентации, которые приведены ранее, что непосредственно позволяет упорядочить множество элементов технологических воздействий для реализации определённых видов функциональных составляющих: поверхностная точка, объёмная точка, поверхностная линия, объёмная линия, поверхность, поверхностный слой, объём.

Точка поверхностная либо объёмная является основным формообразующим элементом, ориентируясь на который можно выполнить процесс (нанести покрытия) любой сложности или комбинации как, в общем, и сформировать деталь.

Для чего на начальном этапе следует рассмотреть вариант схемы ориентации технологических воздействий на поверхностную точку с целью обеспечения требуемых свойств (C) функционального элемента ($\Phi Э$).

На рисунке П 1.7 представлена схема для ориентации технологических

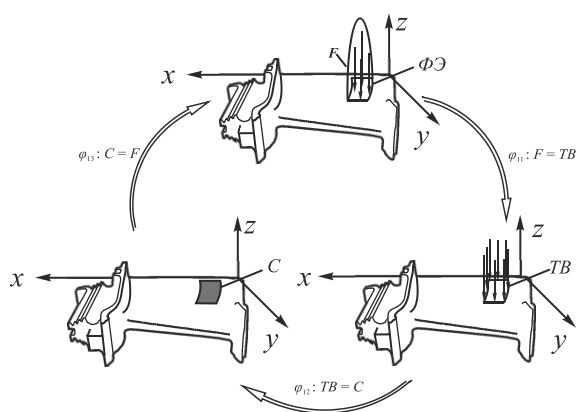


Рисунок П 1.7. Вариант схемы ориентации технологического воздействия (ТВ) на поверхность точку с целью обеспечения требуемых свойств (С) функционального элемента (ФЭ) на базе первого принципа ориентации, где F – эксплуатационная функция элемента

воздействий поверхностной точки на базе **первого принципа**.

Технологическое воздействие, которое необходимо произвести на функциональный элемент в виде поверхностной точки, изучив действующую эксплуатационную функцию, где: φ_{11} – отображение эксплуатационной функции в технологическое воздействие,

φ_{12} – отображение технологического воздействия в свойство соответствующее действующей функции; φ_{13} – отображение свойства функционального элемента в действующую эксплуатационную функцию.

Такой процесс отвечает на вопрос: **какое технологическое воздействие необходимо выполнить и обеспечить свойство в зависимости от действующей эксплуатационной функции?**

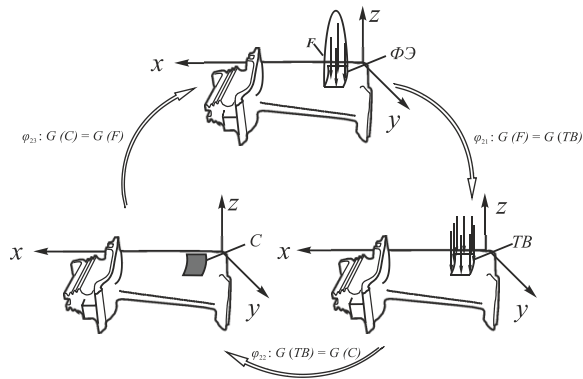
Математически первый принцип можно представить в виде следующих преобразований [72]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} &: F \rightarrow ТВ; \\ \varphi_{12} &: ТВ \rightarrow С; \\ \varphi_{13} &: С \rightarrow F, \end{aligned} \right\}, \quad (П1.2)$$

где φ_{11} – отображение эксплуатационной функции в технологическое воздействие на базе первого принципа; φ_{12} – отображение технологического воздействия в свойство, соответствующее действующей функции на базе первого принципа; φ_{13} – отображение свойства функционального элемента в действующую эксплуатационную функцию на базе первого принципа. Структурно-логическая формула для схемы поверхностной точки имеет следующий вид [72]:

$$TB^{ТП} \rightarrow \{(m_{x,y}, e_{x,y}, i_{x,y}), (dl_x \times dl_y)\}, \quad (П.1.3)$$

где $TB^{ТП}$ – схема технологического воздействия на поверхностную точку;



$(m_{x,y}, e_{x,y}, i_{x,y})$ – кортеж параметров технологических воздействий материального, энергетического и информационного характеров;

$(dl_x \times dl_y)$ – декартово произведение элементарной площади.

Рисунок П1.8. Вариант схемы ориентации технологического воздействия (TB) на поверхностную точку с целью обеспечения требуемых свойств (C) функционального элемента ($\Phi Э$) на базе второго принципа ориентации: где F – эксплуатационная функция элемента

На рисунке П1.8. представлена схема для ориентации технологического воздействия поверхностной точки на базе **второго принципа**, где: φ_{21} – отображение геометрических параметров эксплуатационной функции $G(f)$, действующей на зону в геометрические параметры зоны применения технологических воздействий $G(TB)$ на базе второго принципа; φ_{22} – отображение геометрических параметров зоны применения технологических воздействий $G(TB)$ в геометрические параметры зоны

свойств $G(C)$ на базе второго принципа; φ_{23} – отображение геометрических параметров зоны свойств $G(C)$ в геометрические параметры эксплуатационной функции $G(F)$, действующей на зону на базе второго принципа.

Применив второй особый принцип ориентации, происходит определение и приведение к топологическому соответствию геометрических параметров действующей функции, технологического воздействия и свойств, при этом решается вопрос: **куда произвести технологическое воздействие и где обеспечить требуемые свойства?**

Математически второй принцип можно представить в виде следующих преобразований [72]:

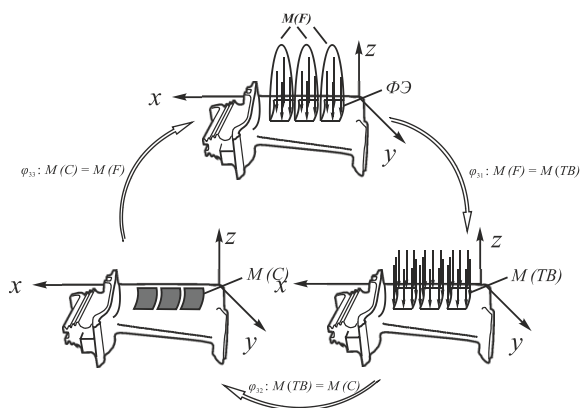
$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} &: G(F) \rightarrow G(TB); \\ \varphi_{22} &: G(TB) \rightarrow G(C); \\ \varphi_{23} &: G(C) \rightarrow G(F), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.4})$$

где: φ_{21} – отображение геометрических параметров эксплуатационной функции $G(f)$, действующей на зону в геометрические параметры зоны применения

технологических воздействий $G(TB)$ на базе второго принципа;

φ_{22} – отображение геометрических параметров зоны применения технологических воздействий $G(TB)$ в геометрические параметры зоны свойств $G(C)$ на базе второго принципа;

φ_{23} – отображение геометрических параметров зоны свойств $G(C)$ в геометрические параметры эксплуатационной функции $G(F)$, действующей на зону на базе второго принципа.



Третий принцип (рисунок П1.9.)

ориентации технологических воздействий позволит определить количество видов, типов технологических воздействий, необходимых для обеспечения множества

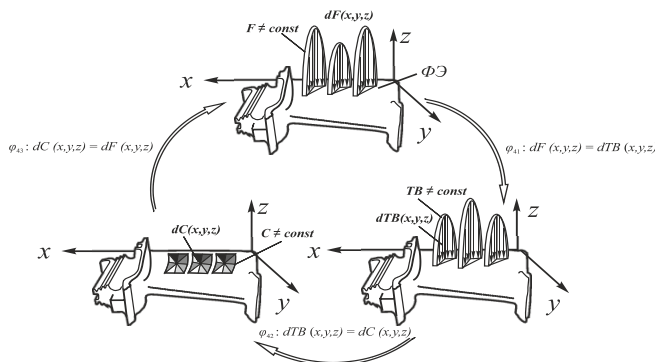
свойств при производстве или ремонте лопатки ГТД. Применение данного принципа позволяет точно реализовать технологические воздействия в заданные микро, макро зоны и участки изделия, а также сформировать структуру свойств внутри этих зон и участков.

На рисунке П1.8. представлена схема для ориентации технологического воздействия поверхностной точки на базе третьего принципа, где: φ_{31} – отображение множества зон действующей функции во множество технологических воздействий; φ_{32} – отображение множества реализации технологических воздействий во множество свойств; φ_{33} – отображение множества зональных свойств, соответствующих множеству зональных эксплуатационных функций. Отображение третьего принципа ориентации может быть представлено в следующем виде [72]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{31} &: M(F) \rightarrow M(TB); \\ \varphi_{32} &: M(TB) \rightarrow M(C); \\ \varphi_{33} &: M(C) \rightarrow M(F), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.5})$$

где φ_{31} – отображение множества зон действующей функции во множество технологических воздействий;

φ_{22} – отображение множества реализации технологических воздействий во множество свойств;



Рисунке П1.10. Вариант схемы ориентации множества переменных технологических воздействий $TB \neq const$ с учётом переменного действующей эксплуатационной функцией $F \neq const$, для приобретения соответствующих функции переменных свойств $C \neq const$

множество свойств;

φ_{23} – отображение множества зональных свойств, соответствующих множеству зональных эксплуатационных функций.

Четвёртый принцип

ориентации технологических воздействий (рисунок П1.10.) позволит определить процесс придания свойств в пространстве каждого функционального элемента изделия и выполнения технологического воздействия, где: φ_{41} – отображение элемента функции dF

(x, y, z) в элемент воздействия $dTB(x, y, z)$; φ_{42} – отображение элемента воздействия $dTB(x, y, z)$ в элемент свойств $dC(x, y, z)$; φ_{43} – отображение элемента свойств $dC(x, y, z)$ в элемент функции $dF(x, y, z)$.

В общем, данный принцип ориентации отвечает на вопрос: **как изменяются в пространстве свойства каждого функционального элемента и как необходимо осуществлять технологическое воздействие постоянно или переменного?**

Общее отображение четвертого принципа ориентации может быть представлено в следующем виде [72]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{41} &: dF(x, y, z) \rightarrow dTB(x, y, z); \\ \varphi_{42} &: dTB(x, y, z) \rightarrow dC(x, y, z); \\ \varphi_{43} &: dC(x, y, z) \rightarrow dF(x, y, z), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.6})$$

где φ_{41} – отображение элемента функции $dF(x, y, z)$ в элемент воздействия $dTB(x, y, z)$;

φ_{42} – отображение элемента воздействия $dTB(x, y, z)$ в элемент свойств $dC(x, y, z)$;

φ_{43} – отображение элемента свойств $dC(x, y, z)$ в элемент функции $dF(x, y, z)$.

Отображение четвертого принципа ориентации, в объеме сложной структуры одного функционального элемента, может быть представлено в следующем виде [72]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{41} &: \int_V dF(x, y, z) \rightarrow \int_V dTB(x, y, z); \\ \varphi_{42} &: \int_V dTB(x, y, z) \rightarrow \int_V dC(x, y, z); \\ \varphi_{43} &: \int_V dC(x, y, z) \rightarrow \int_V dF(x, y, z), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.7})$$

где V – объем функционального элемента или зоны.

Пятый принцип (рисунок П1.11), отвечает на вопрос: **как изменяются в пространстве и во времени свойства функционального элемента, и как необходимо осуществлять технологические воздействия: постоянно или переменного?**

Данный принцип обеспечивает изменение свойств изделия в пространственно-временном диапазоне за счет переменных технологических преобразований на микроуровне функционального элемента.

Отображение пятого принципа ориентации может быть представлено в следующем виде [72]:

$$\left. \begin{array}{l} \varphi_{511} : dF(t) \rightarrow dTB(x, y, z); \\ \varphi_{521} : dTB(x, y, z) \rightarrow dC(t); \\ \varphi_{531} : dC(t) \rightarrow dF(t), \end{array} \right\} \text{ или } \left. \begin{array}{l} \varphi_{512} : dF(t) \rightarrow dTB(t); \\ \varphi_{522} : dTB(t) \rightarrow dC(t); \\ \varphi_{532} : dC(t) \rightarrow dF(t), \end{array} \right\}, \quad (\text{П1.8})$$

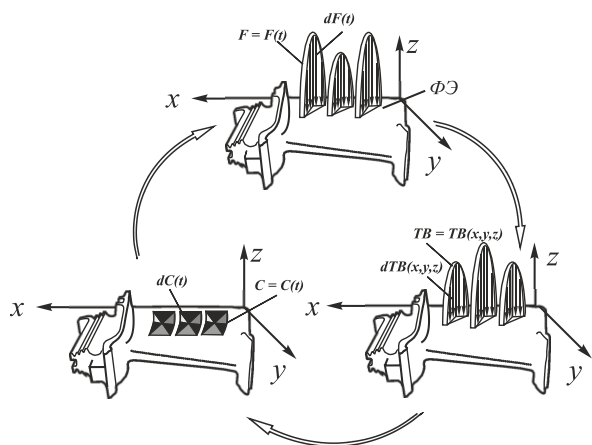


Рисунок П1.11. Вариант схемы ориентации множества переменных технологических воздействий $TB = TB(x, y, z)$ с учётом переменнo действующей эксплуатационной функцией $F = F(t)$, для приобретения соответствующих функции переменных свойств $C = C(t)$ в пространстве

где: φ_{511} – отображение элемента функции $dF(t)$ в элемент воздействия $dTB(x, y, z)$;

φ_{521} – отображение элемента воздействия $dTB(x, y, z)$ в элемент свойств $dC(t)$;

φ_{531} – отображение элемента свойств $dC(t)$ в элемент функции $dF(t)$;

φ_{512} – отображение элемента функции $dF(t)$ в элемент воздействия $dTB(t)$;

φ_{522} – отображение элемента воздействия $dTB(t)$ в элемент свойств $dC(t)$;

φ_{532} – отображение элемента свойств $dC(t)$ в элемент функции $dF(t)$.

Шестой принцип (рисунок П1.12), обеспечивает структурное соответствие множеств элементарных функций, технологических воздействий и выполнение множества свойств на каждом уровне глубины технологии.

Отображение шестого принципа ориентации может быть представлено в следующем виде [72]:

$$\left. \begin{array}{l} \varphi_{61} : Str \{F, A\} \rightarrow Str \{F, B\}; \\ \varphi_{62} : Str \{F, B\} \rightarrow Str \{C, D\}; \\ \varphi_{63} : Str \{C, D\} \rightarrow Str \{F, A\}, \end{array} \right\}, \quad (\text{П1.9})$$

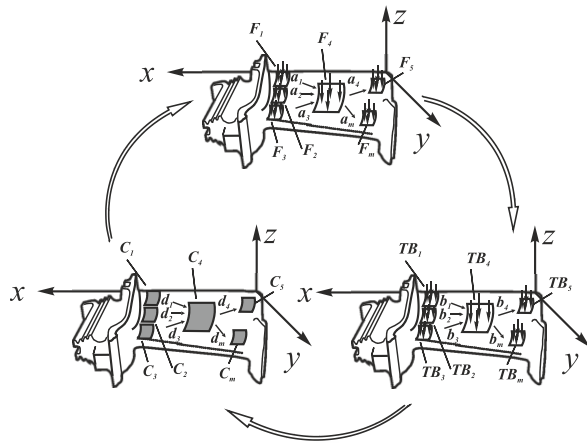
где φ_{61} – отображение структуры множества функции $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ и множество отношений $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ изделий в структуру множества

технологических воздействий $TB=\{TB_1, TB_2, \dots, TB_m\}$ и множества отношений $B=\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$;

φ_{62} – отображение множества технологических воздействий $TB=\{TB_1, TB_2, \dots, TB_m\}$ и множества отношений $B=\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ в структуру множества свойств $C=\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ и множества отношений $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$;

φ_{63} – отображение множества свойств $C=\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ и множества отношений $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ в множество функции $F=\{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ и множество отношений $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

Шестой принцип представлен на рисунке П1.12., где $F=\{F_1, F_2, \dots, F_m\}$,



$A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $TB=\{TB_1, TB_2, \dots, TB_m\}$,
 $B=\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, $C=\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$,
 $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ – множества эксплуатационных функций, технологических воздействий, свойств и отношений.

Седьмой принцип реализует пространственно-временное соответствие

структуры и свойств всех элементов лопатки ГТД на каждом уровне глубины технологии, рисунок П1.13. Данный

Рисунок П1.12. Вариант схемы технологических воздействий в соответствии с шестым принципом ориентации

принцип обеспечит разноуровневую равноэффективную защиту при выполнении технологических операций ремонта и изготовления лопаток турбин.

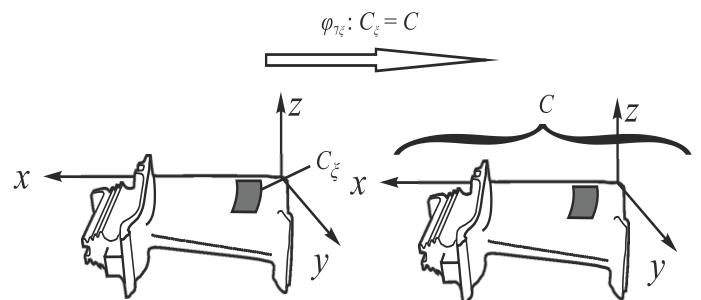


Рисунок П1.13. Вариант схемы технологических воздействий в соответствии с седьмым принципом ориентации

Рисунок П1.13. отображает вариант схемы технологических воздействий в соответствии с седьмым принципом ориентации, где: $\varphi_{7\xi}$ – функция отображения свойств в пространстве и во времени каждого элемента в заданные или предельные свойства всего изделия; C_{ξ} – свойства любого ξ -го элемента; C – свойство всего изделия.

Восьмой принцип (рисунок 1.14), реализует пространственно-временное соответствие структуры и свойств в окрестностях каждого элемента изделия на каждом уровне глубины технологии.

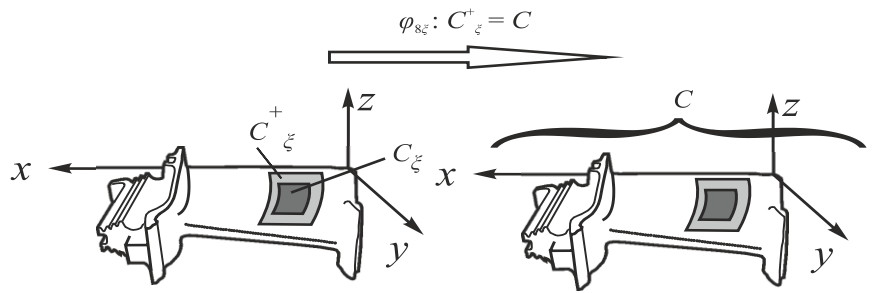


Рисунок П1.13. отображает вариант схемы технологических воздействий в соответствии с восьмым принципом ориентации

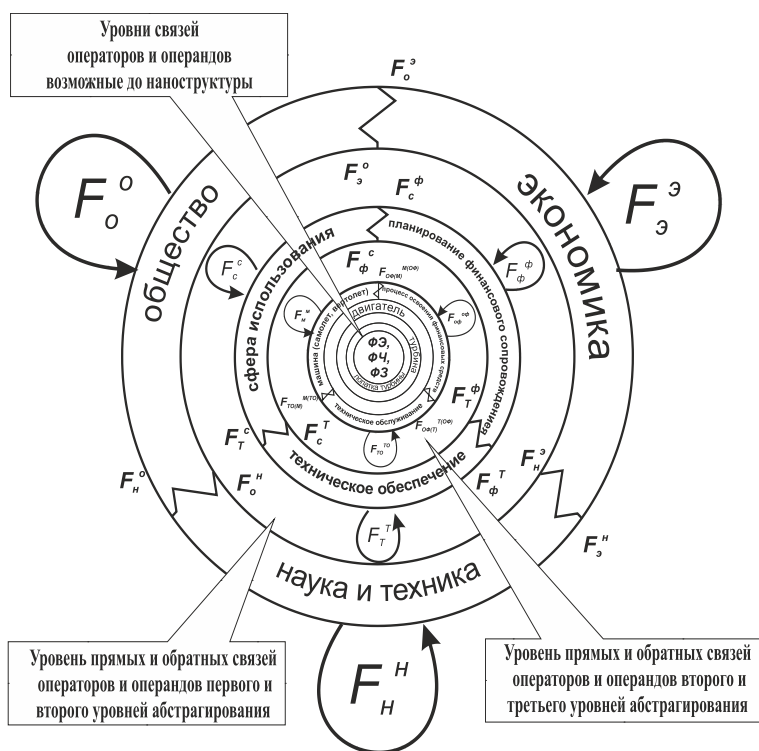
Рисунок П1.14. Вариант схемы технологических воздействий в соответствии с восьмым принципом ориентации, где: $\varphi_{8\xi}$ – функция отображения свойств в пространстве и во времени в окрестностях каждого элемента в заданные или предельные свойства всего изделия; C_{ξ}^+ – свойства в окрестности любого ξ -го элемента; C – свойство всего изделия.

Таким образом, при использовании различных вариантов технологических воздействий на базе особых принципов ориентации, рассмотренных в данной работе, применяя их в процессе повышения ресурса лопаток турбин при ремонте и изготовлении, можно обеспечить свойства, соответствующие (перспективные) условиям эксплуатации. При этом следует учитывать принадлежность лопаток турбин к вариантам групп, характерных для разных типов двигателей, и в процессе проектирования технологии ориентироваться на виды разрушений, которые можно разделять по уровням (на уровне лопатки, на уровне номера ступени группы лопаток, на уровне каскадов).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Деление лопатки турбины на функциональные элементы, части, зоны

Учитывая цель исследования, проводимого в данной работе, необходимо обратить внимание на тот факт, что создаваемая технология базируется на



функционально-ориентированном подходе [72],

и должна учитывать особенности эксплуатационных функций и их взаимосвязь на

уровнях абстракции. Как на уровне

потребностей (возможностей) «общество –

технологии – экономика», так и на самом низшем – уровне зон

детали с постоянной ориентацией на уровень

технического прогресса (современных условий).

Модель синтеза

процесса повышения ресурса лопаток турбин (требования) прогресса (современных условий). Модель синтеза процесса повышения ресурса лопаток турбин отображена на рисунке П2.1. Она представляет собой перечень объектов и описание процесса их взаимодействия (запросов и возможностей) на разных уровнях абстрагирования (1-й, 2-й, 3-й, ... N^{n-1} -й). Среди изображённых составляющих предлагается рассматривать по три основных каждого уровня, например: уровень развитие общества, уровень развития науки и техники, уровень развития экономики и т.д.

На следующем уровне могут быть рассмотрены объекты, такие как: особенности сферы использования, особенности планирования финансового сопровождения, уровень логистики в вопросах технического обеспечения. На третьем уровне рассматриваются непосредственно объекты эксплуатации и условия, определяющие особенности эксплуатации машины (самолёт, вертолёт), прикладные примеры технического обслуживания, практическое освоение

финансовых средств по схеме хранение – эксплуатация (рекламация) – обеспечение – обслуживание – ремонт – замена.

Уровни абстрагирования «двигатель – функциональные зоны» позволяют изучить возможности ориентирования процесса создания технологий непосредственно на целевые, независимые или сложноструктурированные условия эксплуатации машины – двигателя – детали. Взаимосвязь между составляющими уровня абстрагирования определяет наличие объектов операторов (оказывающих воздействие) и объектов операндов (испытывающих воздействие). Такое взаимодействие может быть описано посредством управляющих отношения F_i^j , где i – объект оператор, j – объект операнд. Петли с указанием управляющих отношений типа F_n^h , F_o^o , F_z^z описывают способности каждого составляющего объекта уровня абстрагирования к внутреннему саморазвитию и самоконтролю на фоне постоянного получения и передачи сигналов, команд, условий, требований и т.д. содержащихся в управляющих отношениях. При этом, как сама модель, содержащая множество уровней составляющих (объектов) и уровней связей (от верхнего уровня до функционального элемента – ФЭ, далее до функциональной части – ФЧ и далее до функциональной зоны – ФЗ детали), так и каждый элемент, и уровень связей может быть изучен ориентированно.

Данная модель, составленная с применением основ синтеза функционально-ориентированных технологий [72], способна, в общем, сформировать понимание процесса точности изучения условий эксплуатации и выбора технологий изготовления (восстановления) с целью повысить ресурс лопаток турбин.

Одним из примеров применения модели можно определить процесс изучения и установления основных характеристик лопаток турбин.

Данными характеристики могут являться тип объекта, способ действия, структура объекта, состояние объекта и т.д., которые позволят более подробно изучить лопатку турбины с целью осуществления построения структуры процесса повышения ее ресурса. Одна из характеристик, структура объекта, указывает на то, что для более точного изучения структуры объекта и структуры действующих эксплуатационных функций, необходимо выполнение декомпозиции.

Графическое отображение характеристик лопаток турбин газотурбинного двигателя (ЛТ ГТД) представлено на рисунке П2.2.

Процесс взаимодействия также может быть описан посредством управляющих отношения F_i^j , где i – объект оператор, j – объект операнд.

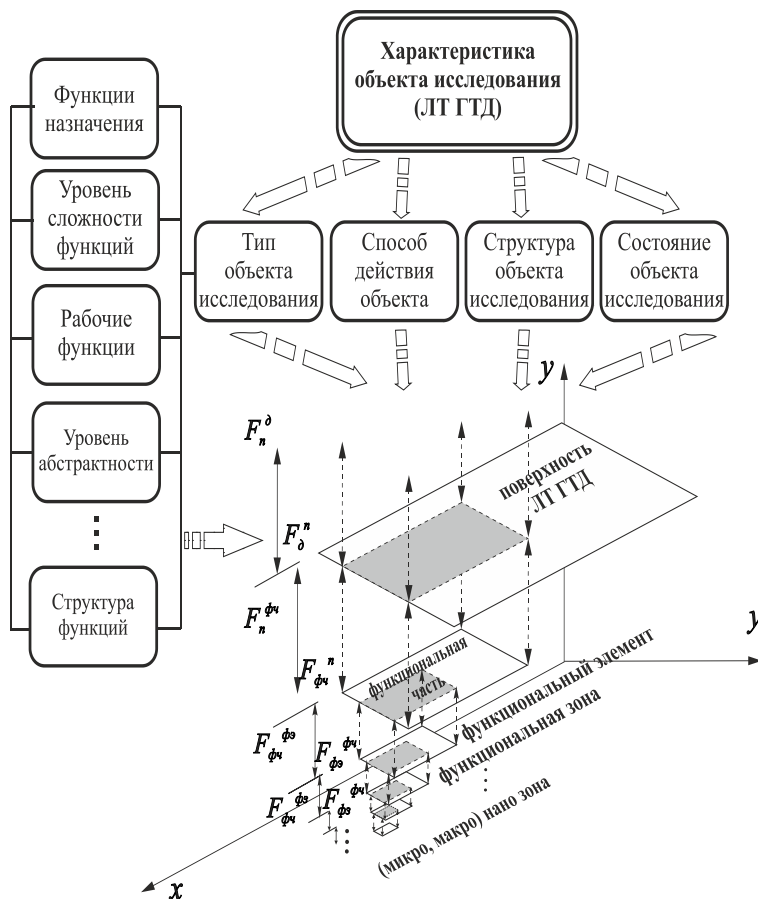


Рисунок П2.2. Характеристика лопаток турбин технических функций (подфункций) детали.

1.3. *Рабочие функции.* Выполняемая работа представляет описание элементарного набора функциональных действий и воздействий (частей, элементов, зон) или действия в целом лопатки турбин.

1.4. *Уровень абстрактности функций.* Прецизионное изучение условия эксплуатации (действия) детали.

1.5. *Структура функций.* Характеристика, описывающая набор элементов (операторов и операндов), объединяющихся под одним результатом (воздействие, преобразование, разрушение, взаимодействие, повышение ресурса и т.д.).

1. **Тип объекта** – деталь, лопатка турбины, что технически определяет формат её применения и позволит перечислить эксплуатационные функции, а именно:

1.1. *Функции назначения* Функции, выполняемые, в формате служебного назначения, определяющиеся происходящими процессами в лопаточной машине.

1.2. *Уровень сложности функций.* Характеристика лопаток турбин по средству изучения иерархической структуры

- по технологии получения заготовки (литье, штамповка, литье по выплавляемым моделям, направленная кристаллизация и др.).

Данная классификация составлена для создания процесса повышения ресурса лопаток турбин на базе функционально-ориентированного подхода [72].

2. Способ действия лопатки турбины. Данная характеристика представляет собой логическое описание способа реализации целевой функции.

3. Структура объекта исследования. Характеризует лопатку как деталь в целом, так и позволяет изучать ее, выполнив предварительно декомпозицию.

4. Состояние объекта исследования. Позволяет осуществить повышение ресурса с учётом анализа состояния объекта как после изготовления, так и объекта после эксплуатации.

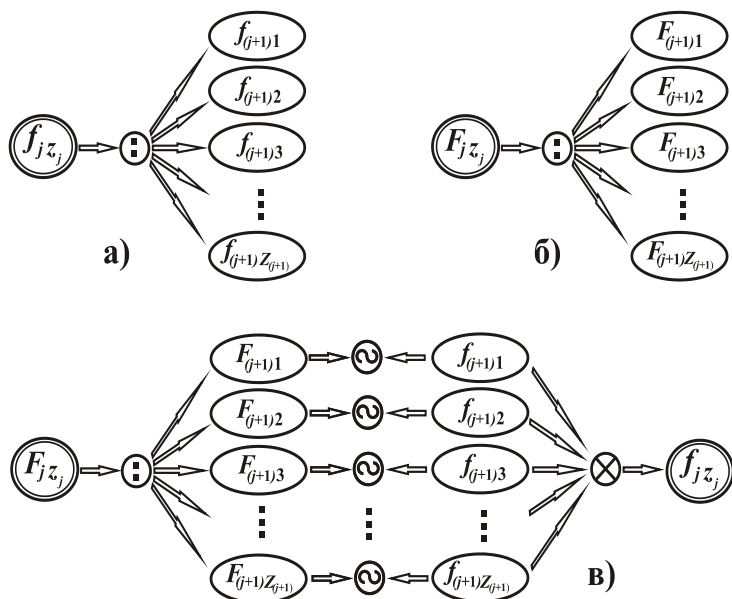
Все установленные характеристики того или иного процесса или объекта, рассмотренные на возможных уровнях иерархии, позволят придать динамику процессу синтеза методов.

Особенности эксплуатации, определяющие необходимость применения функционально-ориентированного подхода, рассматриваются в [75, 93], их изучение в совокупности с правильно выполненной классификацией детали будет являться шагом к разработке синтеза методов повышения качества лопаток турбин.

Классификация лопаток турбин (рисунок П2.3) находится в тесном взаимодействии с процессом установления характеристик объекта в виде информационного потока данных, как об условиях эксплуатации, так и о процессе изготовления лопаток турбин.

Это в первую очередь необходимо для понимания процессов, происходящих в общем, с последующим изучением процессов, происходящих на уровне отдельных элементов, частей и зон поверхности пера лопаток турбин, где возникает износ и повреждение слоев покрытия и поверхности основного металла пера лопатки турбины.

Можно отметить, что в целом каждый уровень иерархической структуры



деления лопатки можно характеризовать функциональными элементами данного уровня $f_j = \{ f_{j1}, f_{j2}, f_{j3}, \dots, f_{jv_j} \}$, где f_j - множество функциональных элементов j -го уровня глубины технологии; f_{js_j} - функциональный элемент j -го уровня иерархической структуры деления; v_j - мощность множества f_j j -го уровня деления.

Если рассматривать одно конкретное изделие, следует иметь в виду, что для конкретного функционального элемента j -го уровня деления необходимо выполнять его декомпозицию на множество функциональных элементов $(j+1)$ -го уровня. На рисунке П2.5,а [72] представлена схема декомпозиции функционального элемента j -го уровня глубины технологии на множество функциональных элементов $(j+1)$ -го уровня, а именно $f_{jz_j} = \{ f_{(j+1)1}, f_{(j+1)2}, f_{(j+1)3}, \dots, f_{(j+1)z_{(j+1)}} \}$. Здесь: f_{jz_j} - функциональный элемент j -го уровня деления лопатки; $f_{(j+1)z_{(j+1)}}$ - любой $z_{(j+1)}$ -й функциональный элемент $(j+1)$ -го уровня деления лопатки; $Z_{(j+1)}$ - мощность

множества f_{jz_j} (количество функциональных элементов на $(j+1)$ -м уровне лопатки.

Аналогично можно выполнять декомпозицию сложной функции j -го уровня деления на множество функций $(j+1)$ -го уровня. На рисунке П2.5,б [72] показана схема декомпозиции сложной функции j -го уровня глубины технологии на множество функций $(j+1)$ -го уровня $F_{jz_j} = \{F_{(j+1)1}, F_{(j+1)2}, F_{(j+1)3}, \dots, F_{(j+1)Z_{(j+1)}}\}$.
Здесь: F_{jz_j} - сложная функция j -го уровня деления лопатки; $F_{(j+1)z_{(j+1)}}$ - любая $z_{(j+1)}$ -я функция $(j+1)$ -го уровня деления лопатки; $Z_{(j+1)}$ - мощность множества F_{jz_j} (количество функций на $(j+1)$ -м уровне лопатки.

Можно отметить, что на базе схемы синтеза функциональных элементов лопатки на базе сложной функции, представленной на рисунке П2.5,в, [72] можно выполнять синтез элементов лопатки с необходимыми свойствами на базе операции декомпозиции сложной функции F_{jz_j} на множество функций $F_{jz_j} = \{F_{(j+1)1}, F_{(j+1)2}, F_{(j+1)3}, \dots, F_{(j+1)Z_{(j+1)}}\}$, реализации операции бинарного соответствия элементарной функции $F_{(j+1)z_{(j+1)}}$ и унифицированной структуры функционального элемента $f_{(j+1)z_{(j+1)}}$, а также композиции функционального элемента j -го уровня из множества функциональных элементов $(j+1)$ -го уровня $f_{jz_j} = \{f_{(j+1)1}, f_{(j+1)2}, f_{(j+1)3}, \dots, f_{(j+1)Z_{(j+1)}}\}$.

Рассмотренный процесс структурирования детали и действующих функций на элементарные части, до необходимого в соответствии с начальными условиями уровня иерархии, обеспечивает при проектировании технологического процесса способность выбирать, планировать и реализовывать технологические воздействия на высоких уровнях прецизионности. Это сверхточно ориентирует придаваемые свойства лопаткам турбин и обеспечивает их высокий потенциал и ориентацию на действующие эксплуатационные функции.

Приложение В

Метод разработки подхода в совершенствовании функционально-ориентированного материального обеспечения синтеза отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин

Одним из направлений в формировании технологического процесса и повышения его эффективности является вопрос организации его обеспечения, требующий обратить внимание на следующее:

- функционально-ориентированный подбор материалов для обработки поверхности лопатки с учётом возможного изменения свойств основного материала (метал, металл/покрытие, керамика, керамика/покрытие и др.);

- функционально-ориентированный подбор материалов для обработки поверхности лопатки с учётом возможного изменения свойств нанесенного покрытия (покрытие однослойное, покрытие многослойное, покрытие многомодульное и др.);

- функционально-ориентированный подбор инструмента для обработки поверхности лопатки с учётом возможного изменения геометрии поверхности (входная кромка, выходная кромка, корыто, спинка, переходные поверхности, элементы системы охлаждения и др.);

- функционально-ориентированный выбор режимов обработки (скорость, усилие, способ отвода тепла, наличие ингибиторов и т.д.) и продолжительности технологических воздействий на обрабатываемую поверхность (единовременное, непрерывное, прерывистое, комплексные варианты);

- другое.

Одним из действий в работе по совершенствованию процессов обработки на базе функционально-ориентированного подхода может быть предложение по изучению функционально-ориентированного материального обеспечения (ФОМО) и составления классификаций. Это необходимо для придания системности, созданию условий обеспечения, где следует учитывать то, что ресурсы, с которыми придется столкнуться при обработке той же поверхности пера лопатки, имеют свойства, позволяющие работать им в условиях, обобщающих в себе высокие нагрузки, давление, скорость вращения, температуру и её перепады, а также химически активную среду. В связи с чем, сложность обрабатываемости материала пера лопатки, будет начальным условием, указывающим на необходимость использования тех или иных средств обработки.

С этой целью требуется создать основу для последовательности и системности в подборе материальных, энергетических, и информационных ресурсов (потоков) процесса, отобразив это в базовой функционально-ориентированной схеме-классификации материального обеспечения с учётом различных аспектов

Схематическое отображение структуры ФОМО состоит из объектов, характеризующих как состояние материальной части обрабатываемой детали, так и свойства инструмента и материалов, необходимых для обеспечения элементарного действия в конкретном случае, а также связи между ними. Структура ФОМО изображена на рисунке ПЗ.1. Здесь: *ТП* – технологический

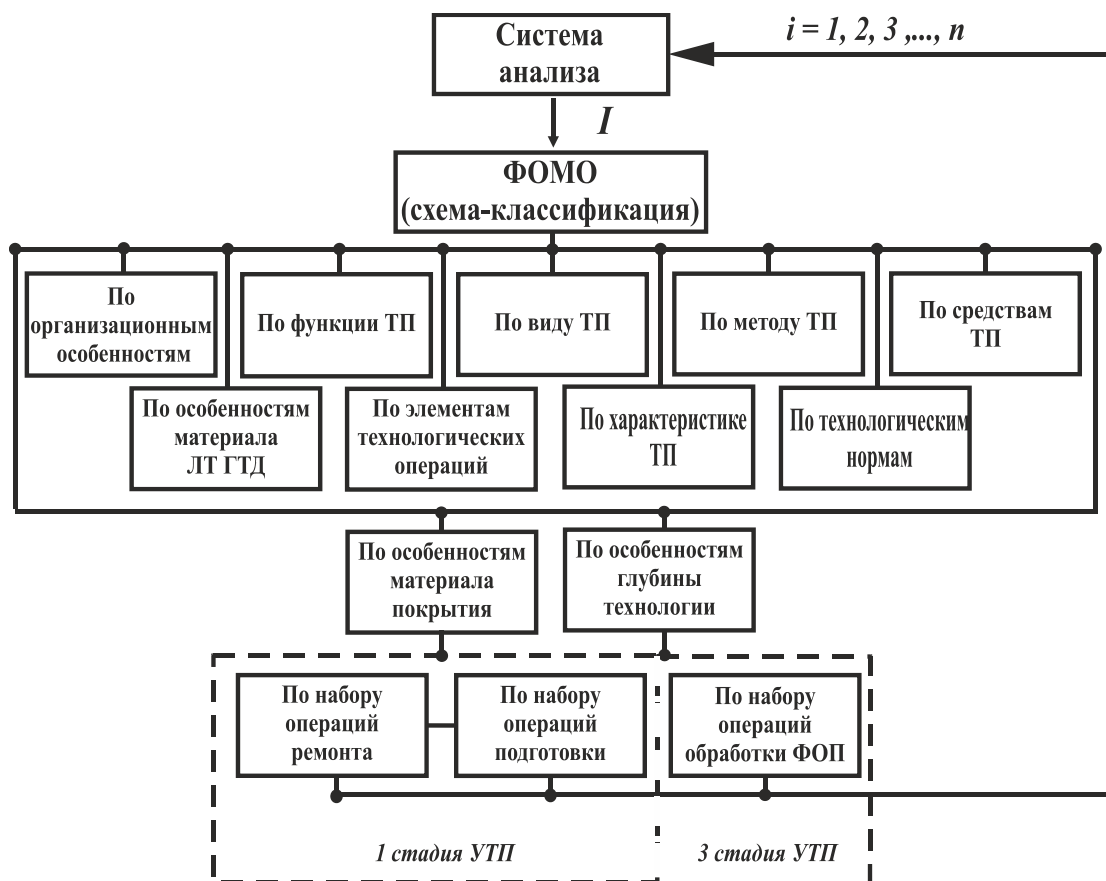


Рисунок ПЗ.1. Схема-классификация ФОМО

процесс; *УТП* – универсальный технологический процесс; *I* – общий информационный поток, определяющий набор технологических решений; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – информационные потоки обратной связи по результатам контроля качества.

На схеме, рисунок ПЗ.1, выполнена классификация функционально-ориентированного материального обеспечения по следующим аспектам:

- по организационным особенностям процесса повышения ресурса лопаток турбин (маршрутная карта, операционная карта, технологическая карта, производственная программа и т.д.);
- по функции процесса повышения ресурса лопаток турбин (изготовление, ремонт, модернизация и т.д.);
- по виду (критерию, степени) процесса повышения ресурса лопаток турбин (степень унификации, назначение, детализация и т.д.);
- по методу процесса повышения ресурса лопаток турбин (обработка, контроль, маркирование, упаковывание и т.д.);
- по форме обрабатываемой поверхности лопаток турбин (точка, линия, поверхность, объёмы и т.д.);
- по элементам процесса повышения ресурса лопаток турбин (установ, переход, базирование и т.д.);
- по характеристике процесса повышения ресурса лопаток турбин (такт, ритм, режим, припуск и т.д.);
- по нормам процесса повышения ресурса лопаток турбин (энергетические ресурсы, материальные ресурсы, информационные ресурсы и т.д.)
- по средствам повышения ресурса лопаток турбин для 3-х стадий процесса (средства, оборудование, оснастка, инструмент, приспособления, функционально-ориентированные изобретения/внедрения и т.д.);
- по особенностям материала пера лопатки (тип и свойства материала заготовки, тип и свойства материала детали и т.д.);
- по набору функционально-ориентированных операций ремонта лопатки турбины (снятие нагара и отложений, заполировка раковин/сколов/прогаров, снятие/обработка полное/частичное покрытия, обработка покрытия традиционного/специального и т.д.);
- по набору функционально-ориентированных операций подготовки поверхности новых лопаток турбин (подготовка новой поверхности с учетом

материала подложки традиционная, подготовка новой поверхности с учетом материала подложки функционально-ориентированная и т.д.);

- по набору функционально-ориентированных операций обработки специальных покрытий (подготовка новой поверхности с учетом материала покрытия, геометрии покрытия и т.д.);

- по особенностям материала покрытия (тип и свойства материала имеющегося покрытия, наличие функционально-ориентированных особенностей покрытия и т.д.);

- по набору функционально-ориентированных операций на разных уровнях глубины технологии (на уровне функциональных элементов, частей, зон, микрозон, макрозон, нанозон).

Приложение В
Акты внедрения



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 №109078081

Account № 260020013514766 at SIB «OTP Bank»
Gorlovka city, bank code 300528
Company code 34516321

Исх. № 728
Дата 14.02.18г.

Диссертационный совет Д 01.014.02 при Донецком
национальном техническом университете

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Хавлина Тараса Викторовича на тему «Повышение качества лопаток турбин газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода», 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 лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода. А также проектирование технологической оснастки для напыления функционально-ориентированных покрытий лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей.

Разработанная методика и рекомендации «Технологический процесс повышения ресурса лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателя на базе функционально-ориентированного подхода», представленные в диссертационной работе Хавлина Тараса Викторовича, 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 при напылении функционально-ориентированных покрытий лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 52000,00 рублей РФ (пятьдесят две тысячи 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

E-mail: gemz@ukr.net

Соответствует оригиналу
Ученый секретарь
диссертационного совета



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

№ 420

« 14 » 03 20 18 г.

Диссертационный совет Д 01.014.02 при
ГОУВПО "Донецкий национальный
технический университет".

СПРАВКА.

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Хавлина Тараса Викторовича на тему "Повышение качества лопаток турбин газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода", 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 турбин авиационных газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода. А так же проектирование технологической оснастки для напыления функционально-ориентированных покрытий лопаток авиационных газотурбинных двигателей.

Разработанная методика и рекомендации "Технологический процесс повышения ресурса лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода", представленные в диссертационной работе Хавлина Тараса Викторовича, используются на ОАО "Ейский станкостроительный завод" для повышения качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения.

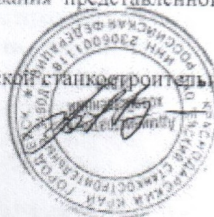
Представленные рекомендации используются для проектирования технологических процессов и технологического обеспечения для изготовления технологической оснастки при напылении функционально-ориентированных покрытий лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей.

Ожидаемый эффект от использования представленной методики составит 59000,00 (пятьдесят девять тысяч) рублей РФ.

ВРИО генерального директора ОАО "Ейский станкостроительный завод"

89528159309.

Сиротенко Д. В.



Соответствует оригиналу
Ученый секретарь
диссертационного совета



МИНОБРНАУКИ РОССИИ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Ухтинский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «УГТУ»)

филиал Ухтинского государственного
технического университета г. Усинск
(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
<http://www.ufugtu.ru>

23.11.18 № 38/01-1214

Диссертационный совет Д 01.014.02
при ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Хавлина Тараса Викторовича на тему «Повышение качества лопаток турбин газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода», 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 качества лопаток турбин газотурбинных двигателей и газотурбинных установок на базе функционально-ориентированного подхода, которые используются в нефтегазовом комплексе Республики Коми, Россия.

Полученные результаты и рекомендации по комплексному повышению качества лопаток турбин газотурбинных двигателей и газотурбинных установок, представленные в диссертационной работе Хавлина Тараса Викторовича, 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».

Директор



Пичко И.С.

Соответствует оригиналу
Ученый секретарь
диссертационного совета





**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

19.11.13 № 30-12/173А
На № _____

Диссертационный совет Д 01.014.02
при ГОУВПО «ДОННТУ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Хавлина Тараса Викторовича на тему «Синтез технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя», 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 лопаток турбины вертолетного газотурбинного двигателя. Одним из направлений этой работы является разработка общей методики и рекомендации по синтезу технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя. А также проектирование технологий и технологической оснастки для реализации сверхпрочных функционально-ориентированных покрытий лопаток турбины.

Разработанная методика и рекомендации по синтезу технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя, представленная в диссертационной работе Хавлина Тараса Викторовича, 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 лопаток турбин со специальными свойствами.

Первый проректор

Каракозов А.А.

Начальник учебного отдела

Гавриленко Б.В.

Зам. заведующего кафедрой
«Технология машиностроения»

Грубка Р.М.

Соответствует оригиналу
Ученый секретарь
диссертационного совета

