

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

УДК 621.7(043.5)

А64

Анастасьев Александр Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ
ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Михайлов Александр Николаевич

Донецк – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ.	
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ.....	14
1.1 Анализ конструкции, эксплуатационных воздействий и особенностей разрушения лопаток турбины.....	14
1.2 Анализ существующих методов и технологий повышения качества лопаток турбины.....	25
1.3 Исследование современных методов и средств повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины.....	43
1.4 Цель и задачи работы.....	47
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ...	49
2.1 Анализ неравномерностей функциональных воздействий.....	49
2.2 Основные принципы формирования функционально-ориентированных свойств изделия.....	52
2.3 Разработка общего принципа повышения производительности обработки ЛТ ГТД на базе ФОТ.....	54
2.4 Алгоритм повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины на базе функционально-ориентированного подхода.....	59
2.5 Структурная схема диссертационной работы.....	62
2.6 Формирование системы критериев оценки эффективности ОУО.....	64
2.7 Выводы.....	74

РАЗДЕЛ 3 СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	76
3.1 Общие положения и принципы повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины.....	76
3.2 Анализ традиционной структуры технологических операций отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины.....	78
3.3 Определение универсальной структуры технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки.....	82
3.4 Разработка метода учета непостоянства технологических воздействий при отделочно-упрочняющей обработке лопаток турбины.....	85
3.5 Синтез развернутой структуры технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины.....	94
3.6 Выводы.....	96
РАЗДЕЛ 4 ОБЩИЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	98
4.1 Общие положения.....	98
4.2 Разработка методики синтеза вариантов технологического обеспечения отделочной обработки лопаток турбин.....	99
4.3 Основы синтеза технологического обеспечения повышения производительности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин.....	107
4.4 Функционально-ориентированные методы поверхностно- пластического упрочнения лопаток турбины ГТД.....	112
4.5 Выводы.....	117

РАЗДЕЛ 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.	
РЕКОМЕНДАЦИИ. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОИЗВОДСТВО...	119
5.1 Общие положения.....	119
5.2 Методика выполнения экспериментальных исследований.....	120
5.3 Результаты экспериментального исследования.....	126
5.4 Обработка результатов экспериментального исследования.....	128
5.5 Рекомендации диссертационной работы.....	132
5.6 Внедрение результатов работы в производство.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	140
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ...	143
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	144
Приложение А. Методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем.....	169
Приложение Б. Копии документов о внедрении результатов исследований...	174

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) приобрели широкое применение в авиации, флоте, а также в составе силовых установок в промышленности. Также известны успешные образцы наземной техники с их использованием. Расширение диапазона применения ГТД идет как по характеристикам полета летательных аппаратов (скорость полета, высота), так и по условиям их эксплуатации (температура и давление, климатические условия, содержание в воздухе пыли, капель воды и т.д.). Сфера использования определяет конструктивные особенности, выбор материалов и технологии изготовления. При этом основным и наиболее сложным в исполнении агрегатом ГТД остается газовая турбина. В ней энергия нагретого движущегося газа превращается в механическую работу на валу.

Современный уровень производственных процессов требует всё более высокого выхода конечных продуктов. Конструкционные материалы, применяемые при экстремальных условиях эксплуатации должны обеспечить требуемый уровень работоспособности и надежности деталей и компонентов узла. Наиболее подходящие металлические сплавы, обладая требуемыми показателями механической прочности, не всегда удовлетворяют запросам производства с точки зрения химической устойчивости или теплостойкости. Керамические материалы, способные выдерживать высокие температуры, в свою очередь не обладают необходимыми физико-механическими свойствами.

В связи со стремительным развитием промышленности и техники с каждым годом всё активнее возрастает потребность как в новых материалах, обладающих улучшенными физико-механическими свойствами, так и в повышении эксплуатационных свойств существующих материалов и изделий. Изменение свойств может быть достигнуто как отдельным видом отделочно-упрочняющей обработки, так и в виде комбинированных воздействий, включающих в себя различные операции и переходы. Рост требований как к эксплуатационным

характеристикам, так и к надежности оказывает значительное влияние на сложность процессов механической обработки. Повышение производительности обработки при сохранении требуемого уровня качества изделий – сложная, но приоритетная задача, особенно с учетом больших объемов и высокой трудоемкости их изготовления, которая в отношении лопаток газовой турбины современного ГТД может составлять до 40% от суммарной трудоемкости производства всех его деталей [107].

Актуальность темы исследования.

Современные газотурбинные двигатели предъявляют всё более высокие требования к надежности и ресурсу лопаточного аппарата, в том числе лопаток турбин, работающих в условиях экстремальных механических, термических и химических нагрузок. Интенсивные эксплуатационные воздействия приводят к ускоренному износу и разрушению элементов конструкции, что обуславливает необходимость разработки новых технологических решений, способных адаптировать обработку поверхностей с учётом их функционального назначения.

Технологиям и методам отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины (ЛТ) посвящено множество научных исследований. Из актуальных в настоящее время и перспективных в ближайшем будущем стоит отметить технологии нанесения покрытий и технологии отделочно-упрочняющей обработки. Это связано с тем, что при наблюдающейся тенденции роста температуры в камере сгорания ГТД – даже современные металлы и сплавы не в состоянии обеспечить стабильность и безотказность работы при продолжительной эксплуатации. Применение покрытий (защитных, термобарьерных и т.д.) позволяет значительно расширить рабочие характеристики лопаток без существенного изменения их конструкции, однако не решает проблему полностью. Наиболее перспективным на данный момент является комбинация различных методов отделочно-упрочняющей обработки (ОУО). Следует отметить, что для методов ОУО зачастую отсутствуют четко сформулированные методики определения режимов обработки.

Анализ существующих методов ОУО показал, что большинство из них не обеспечивает равномерного повышения качества по всему профилю лопатки, особенно с учётом неравномерности распределения эксплуатационных нагрузок. Это создаёт предпосылки к снижению ресурса и надёжности изделия в целом. Возникает объективная потребность в совершенствовании технологий обработки, ориентированных на обеспечение необходимого качества поверхностного слоя в каждой функциональной зоне детали.

В связи с этим актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью разработки и внедрения функционально-ориентированных технологических решений и обеспечения, направленных на повышение производительности обработки лопаток турбин ГТД. Разработанные в ходе исследования методы синтеза технологического обеспечения, а также методика адаптации параметров обработки к конкретным условиям эксплуатации, имеют важное прикладное значение, подтверждённое внедрением в производство и образовательную деятельность, а также выраженный экономический эффект.

Степень разработанности темы.

Процессу отделочно-упрочняющей обработки лопаток посвящен ряд работ В. А. Богуслаева, А. Я. Качана, А. Н. Михайлова, Р. М. Мубаракшина, А. М. Смыслова, А. Г. Суслова, П. И. Ящерицына и многих других ученых, однако в большинстве случаев отсутствует четко сформированная методика назначения режимов обработки и определения элементов режимов резания с учетом сложного пространственного профиля лопаток турбин ГТД. Применение же серийных типовых режимов обработки не в полной мере учитывает эксплуатационные воздействия, которым подвергается лопатка в процессе эксплуатации.

Определение элементов режимов резания в каждой конкретной точке профиля пера позволит более точно учесть требуемые технологические воздействия, а применение методологии синтеза функционально-ориентированных технологий (ФОТ) позволит обеспечить лопатки требуемыми функционально-ориентированными свойствами (ФОС).

Целью данной работы является совершенствование технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины ГТД на основе применения комбинированных методов обработки, с зональным обеспечением функционально-ориентированных свойств.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи исследования**:

1. Выполнить анализ особенностей износа и разрушения лопаток турбины ГТД в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий. Исследовать особенности применения комбинированных методов обработки и технологий повышения качества лопаток турбин.

2. Разработать методику синтеза технологического обеспечения комбинированной ОУО, обеспечивающего формирование локальных технологических воздействий и направленного на повышение производительности процесса.

3. Исследовать параметры и особенности разработанной схемы комбинированной обработки, основанной на зональном обеспечении функционально-ориентированных свойств поверхностного слоя ЛТ ГТД.

4. Установить закономерности влияния параметров режимов резания в зоне обработки на формирование функционально-ориентированных свойств при комбинированной ОУО, выявить особенности интеграции отдельных методов в единый функционально-ориентированный технологический процесс.

5. Выполнить экспериментальные исследования по определению параметров режимов резания в зоне обработки, для обеспечения функционально-ориентированных свойств при комбинированной ОУО.

6. Разработать рекомендации по совершенствованию технологического обеспечения повышения производительности комбинированной ОУО лопаток турбины ГТД.

7. Внедрить результаты работы в производство.

Объектом исследования является технологический процесс комбинированной ОУО, направленный на обеспечение постоянства

эксплуатационных характеристик пера лопатки в условиях действия комплексных эксплуатационных воздействий с преобладанием существенных температурных перепадов по телу лопатки.

Предметом исследования является взаимосвязь параметров технологического процесса ОУО и геометрических характеристик сложного пространственного профиля пера лопатки турбины, определяющая условия повышения производительности при соблюдении требуемого качества функциональных элементов.

Научная идея работы заключается в функционально-ориентированном управлении параметрами комбинированной ОУО на основе установления закономерных связей между режимами обработки, геометрией сложного пространственного профиля и свойствами поверхностного слоя лопаток турбины ГТД.

Научная новизна полученных результатов.

1. Разработан принцип синтеза технологического обеспечения комбинированной ОУО лопаток турбин ГТД, базирующийся на закономерностях влияния сложной пространственной геометрии пера и параметров обработки в зоне резания на формирование функционально значимых характеристик поверхностного слоя.

2. Установлены закономерности влияния параметров режимов комбинированной ОУО, на формирование функционально-ориентированных свойств поверхностного слоя в различных зонах пера лопатки турбины.

3. Обоснован принцип зонального управления параметрами комбинированной ОУО, обеспечивающий повышение производительности обработки при соблюдении заданных требований к качеству функциональных элементов.

Теоретическая значимость работы.

1. На основе разработанного алгоритма структуры технологического процесса сформирована методика синтеза технологического обеспечения комбинированной ОУО лопаток турбин ГТД, основанная на закономерностях

влияния параметров обработки и сложной пространственной геометрии пера на формирование свойств поверхностного слоя, что создает теоретические предпосылки повышения производительности при обеспечении заданных показателей качества.

2. Установлены взаимосвязи между технологическими параметрами в зоне обработки, усилием прижима детали к полировальному кругу и уровнем контактных напряжений, определяющих условия формирования ФОС поверхностного слоя.

3. Разработаны алгоритм и методика теоретического обоснования режимов ОУО пера лопатки турбины ГТД с учётом сложной пространственной геометрии профиля, расширяющие представления о закономерностях управления процессом и создающие условия для повышения производительности и обеспечения заданных характеристик качества поверхностного слоя.

Практическая значимость работы.

1. Реализация разработанных технологических решений позволяет повысить производительность процессов ОУО на 15–20 % по сравнению с традиционными схемами обработки в зависимости от конструктивных особенностей и условий эксплуатации лопаток турбины.

2. Разработанная методика обеспечения постоянства режимов процесса ОУО деталей со сложным пространственным профилем и экспериментально полученная номограмма для определения её параметров могут быть использованы при разработке функционально-ориентированных технологических процессов полирования деталей ГТД.

3. Результаты диссертационной работы могут быть использованы на различных этапах жизненного цикла лопаток турбин ГТД, включая этапы изготовления новых изделий и восстановления лопаток в процессе ремонта, и обеспечивают целенаправленное управление параметрами процессов отделочно-упрочняющей обработки и формирование однородных функционально-ориентированных свойств поверхностного слоя, что повышает эффективность обработки.

Методология и методы исследования.

При решении поставленных задач, исследовании и получении результатов, представленных в работе, был использован следующий комплекс методов, принципов и научных положений: основные принципы и положения технологии машиностроения; методология синтеза функционально-ориентированных технологий; общий и системный подходы при совершенствовании технологического обеспечения формирования ФОС; теория планирования эксперимента.

Экспериментальные исследования проведены на физических моделях с применением современной контрольно-измерительной аппаратуры и вычислительной техники, и базировались на методах планирования эксперимента. Обработка результатов проводилась с помощью методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработан принцип зонального управления параметрами комбинированной ОУО лопаток турбин ГТД, основанный на учёте неравномерности эксплуатационных воздействий и сложной пространственной геометрии пера, определяющий условия формирования требуемых свойств поверхностного слоя и повышения производительности технологического процесса.

2. Установленные закономерности влияния параметров режимов комбинированной ОУО, включая усилие прижима в зоне контакта и условия формирования контактных напряжений, на формирование ФОС поверхностного слоя в различных зонах профиля пера лопатки, позволяют обоснованно назначать режимы обработки при изменяющихся геометрических параметрах сложного пространственного профиля.

3. Принцип зонального управления параметрами комбинированной ОУО, реализованный на основе разработанной методики обеспечения постоянства режимов процесса обработки, обеспечивает повышение производительности ОУО лопаток турбин ГТД до 15–20 % при соблюдении заданных требований к качеству

функциональных элементов, что подтверждено экспериментально и результатами внедрения на промышленных предприятиях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа по своей цели, задачам, содержанию и научной новизне соответствует паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки) в частности: пункту 3 «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения»; пункту 5 «Методы проектирования и оптимизации технологических процессов»; пункту 9 «Методы и средства повышения производительности изготовления изделий машиностроения».

Степень достоверности результатов.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена данными экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных контрольно-измерительных средств на физических моделях.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертационного исследования рассматривались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2021 г., 2022 г., 2023 г., 2024 г., 2025 г.);
- «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2022 г., 2023 г., 2024 г.);
- «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (г. Брянск, 2022 г.);
- «Машиностроительные технологические системы» (г. Ростов-на-Дону, 2023 г.);
- «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2023 г.);
- «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, 2023 г., 2024 г.);

- «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2023 г.);
- «Механики XXI века» (г. Братск, 2024 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Публикации.

Основные положения выполненных исследований опубликованы в 28 научных работах, в том числе: 3 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, утвержденных перечнем ВАК РФ (К2) в отношении специальности 2.5.6; 4 статьях, в рецензируемых научных изданиях, учредителями которых являются образовательные организации высшего образования расположенные на территории Донецкой Народной Республики.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 179 страниц, содержит 50 рисунков, 13 таблиц. Список использованных источников включает 194 наименования.

РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1.1 Анализ конструкции, эксплуатационных воздействий и особенностей разрушения лопаток турбины

Надежная работа ГТД в значительной мере зависит от работоспособности лопаточного аппарата, являющегося его неотъемлемой частью. При этом лопатки турбины ГТД являются одними из наиболее нагруженных, ответственных и массовых деталей. В турбине ГТД осуществляется преобразование кинетической энергии расширяющихся газов в соответствии с термодинамическим циклом Брайтона [152]. При работе турбины, давление и температура по длине тракта снижаются, повышение температуры на входе в турбину увеличивает извлекаемую мощность двигателя. Однако в случае рабочих лопаток турбин данный фактор в первую очередь ограничивается свойствами используемых материалов. Уровень начальной температуры газа в энергетических газовых турбинах равен $960...1060^{\circ}\text{C}$ для базовых агрегатов и $1065...1100^{\circ}\text{C}$ – для пиковых. Как видно из работ таких авторов как Иноземцев А.А., Кротинов Н.Б. – в турбинах авиационных ГТД температура газов достигает $1027...1077^{\circ}\text{C}$ и более, и наблюдается тенденция роста температуры (рисунок 1.1) [30, 46, 124, 138].

Современные тенденции в создании более эффективных газотурбинных двигателей для летательных аппаратов и наземных силовых установок требуют постоянного совершенствования, разработки и внедрения новых материалов, технологий, методов и средств изготовления деталей, узлов и агрегатов, обеспечивающих постоянно растущие требования по качеству и эксплуатационной надежности. В работах [7, 14, 42, 140] отмечается, что новые материалы и технологии изготовления деталей и узлов газотурбинных двигателей во многом

определяют ресурс изделий, эффективность, конкурентоспособность, трудоемкость их изготовления.

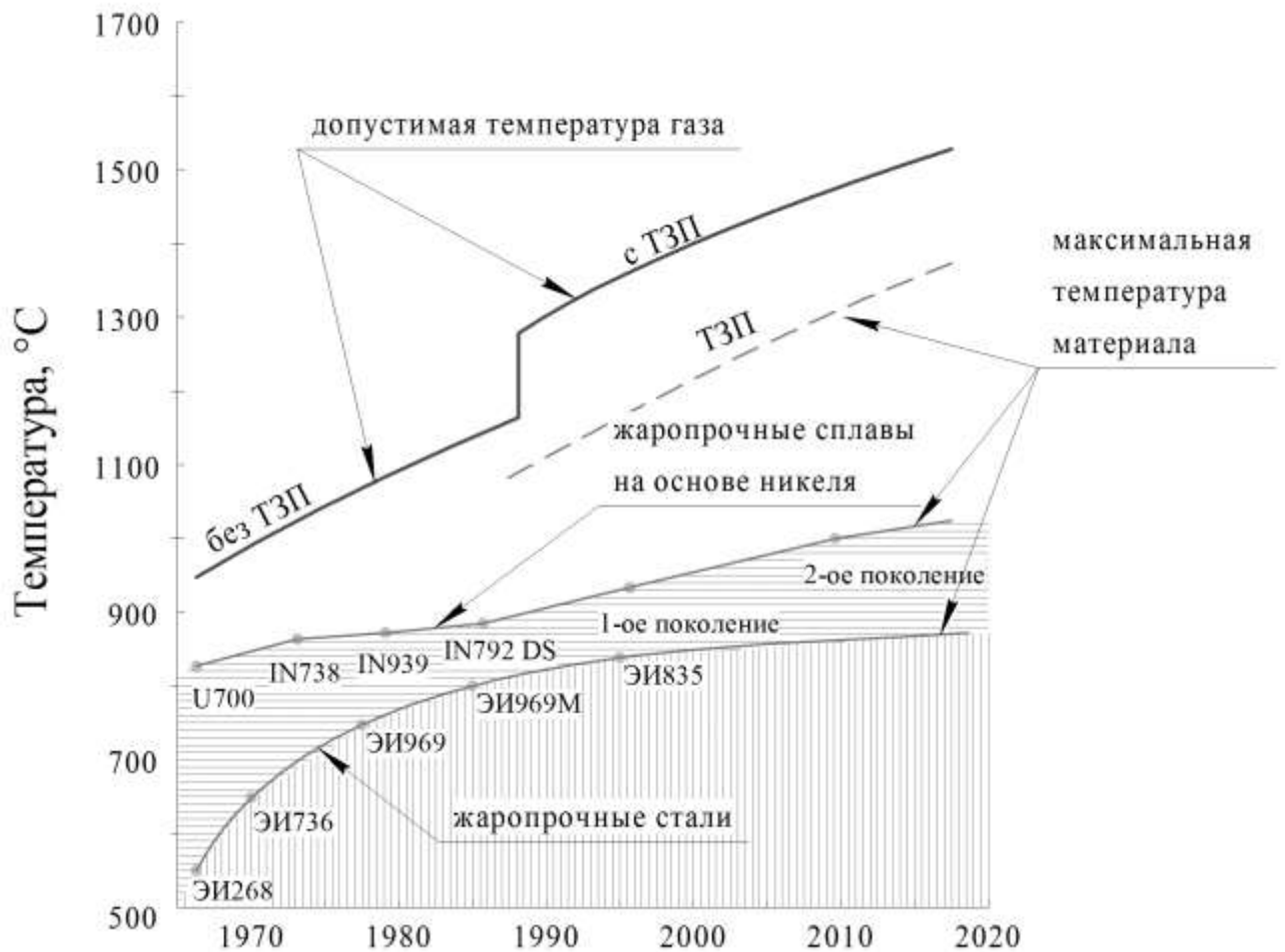


Рисунок 1.1 – Тенденции изменения температуры газа перед турбиной ГТД за последние десятилетия [30, 46, 124, 138]

Лопатки турбины являются наиболее нагруженными, ответственными и массовыми деталями ГТД, так, например, некоторые ГТД имеют до семи ступеней турбинных лопаток, общее количество которых может быть более 500 [17, 68, 79, 124]. По конструктивному исполнению могут быть отдельными, выполненными в виде секторов, а также цельными колесами или сопловыми аппаратами.

Лопатки турбин подразделяются на неподвижные лопатки статора, называемые направляющими лопатками соплового аппарата, и рабочие лопатки ротора [105, 143]. Направляющие и рабочие лопатки по своему служебному назначению являются основными деталями газовой турбины и в совокупности

образуют проточную часть турбины, в которой происходит преобразование тепловой энергии рабочей среды в механическую работу вращающегося ротора [117]. Температура материала лопаток, в процессе эксплуатации, может достигать 80% от величины температуры плавления, при этом лопатка находится в нагруженном состоянии [153]. Рабочие лопатки могут выполняться со сплошным сечением и полые (охлаждаемые воздухом, реже водой или топливом) [21]. Неохлаждаемые лопатки эксплуатируются при температурах до 1000°C , при более высоких температурах применяются лопатки с воздушным охлаждением, воздух для которых отбирается из последних ступеней компрессора. Различают три способа воздушного охлаждения: конвективное, дефлекторное и проникающее (пористое) охлаждение.

Ступенью газовой турбины в ГТД называется совокупность соплового аппарата и расположенного за ним рабочего колеса [115], при этом на каждой ступени устанавливаются лопатки с соответствующим аэродинамическим профилем [154]. Общий вид рабочей лопатки турбины представлен на рисунке 1.2, общий вид сопловой лопатки турбины представлен на рисунке 1.3.

Лопатки применяемые в турбинах ГТД и газотурбинных установках (ГТУ) в целом идентичны по конструкции и основным геометрическим и механическим свойствам, но могут иметь различия, вызванные в первую очередь влиянием производственных возможностей, а также традиций завода-изготовителя [163].

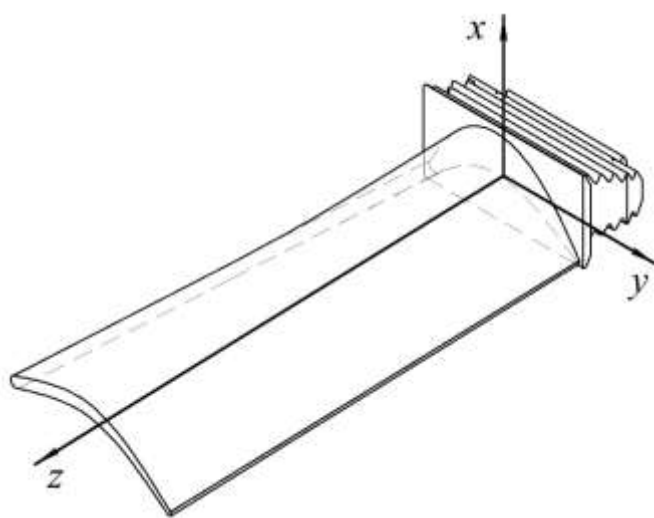


Рисунок 1.2 – Общий вид рабочей ЛТ ГТД

Основные функциональные элементы (ФЭ) лопаток состоят из частей, каждая из которых имеет свои особенности пространственно-геометрической формы, например, тонкие стенки, охлаждающие каналы и т.д.

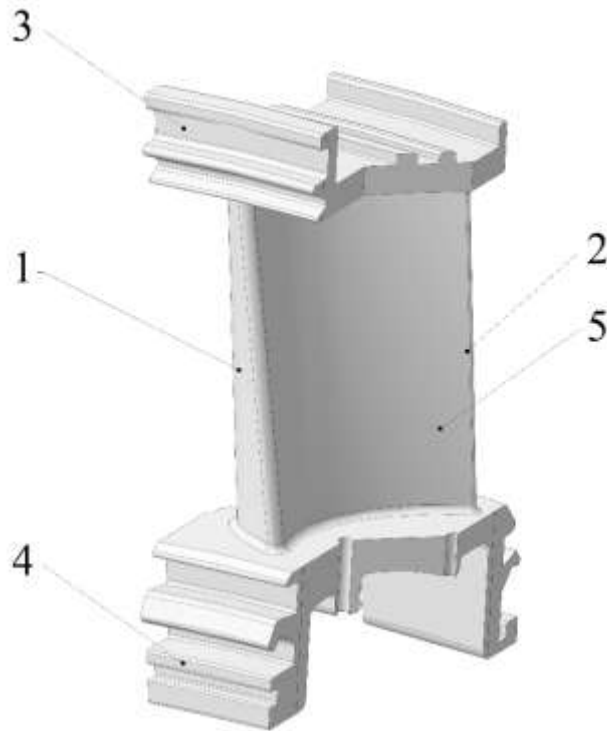


Рисунок 1.3 – Общая модель сопловой лопатки:

- 1 – входная кромка; 2 – выходная кромка;
- 3 – наружная полка; 4 – внутренняя полка;
- 5 – элементы системы охлаждения

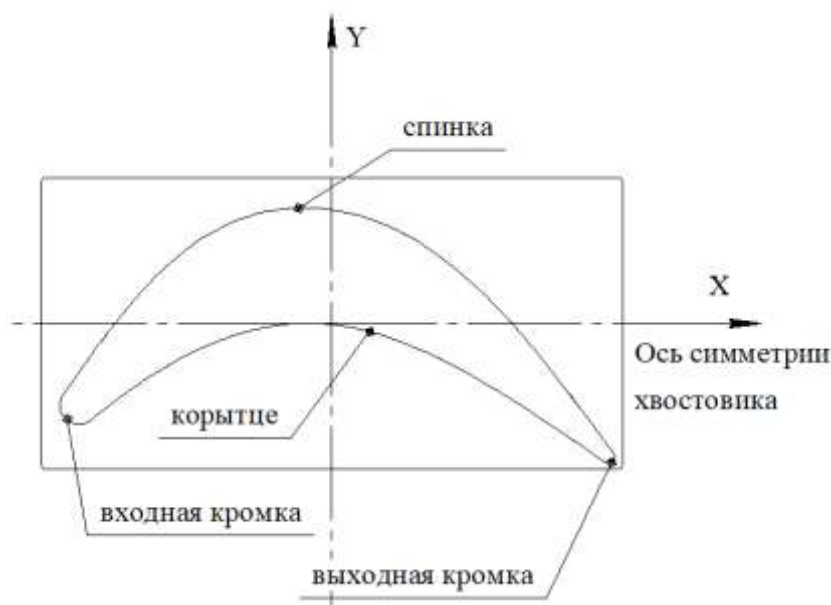


Рисунок 1.4 – Основные элементы пера лопатки турбины

На рисунке 1.4 представлены основные функциональные элементы пера лопатки турбины, а именно: входная и выходная кромки, корыто пера лопатки, спинка пера лопатки (тело пера лопатки на рисунке не обозначено).

Лопатки турбины ГТД работают при повышенных температурах в агрессивной среде, и подвергаются большим центробежным нагрузкам. В процессе работы они подвергаются следующим основным действующим эксплуатационным функциям,

приводящим к разрушению – действию высокой температуры газового потока, статических и циклических нагрузок, а также действию процессов газовой коррозии.

Профильная часть и хвостовики лопаток кроме растяжения и изгиба от центробежных сил испытывают переменные напряжения от

вибрационных и тепловых нагрузок [153]. При этом, с учетом сложной пространственной формы ЛТ, в процессе работы тело лопатки подвергается действию высоких температур неравномерно (рисунок 1.5) [187].

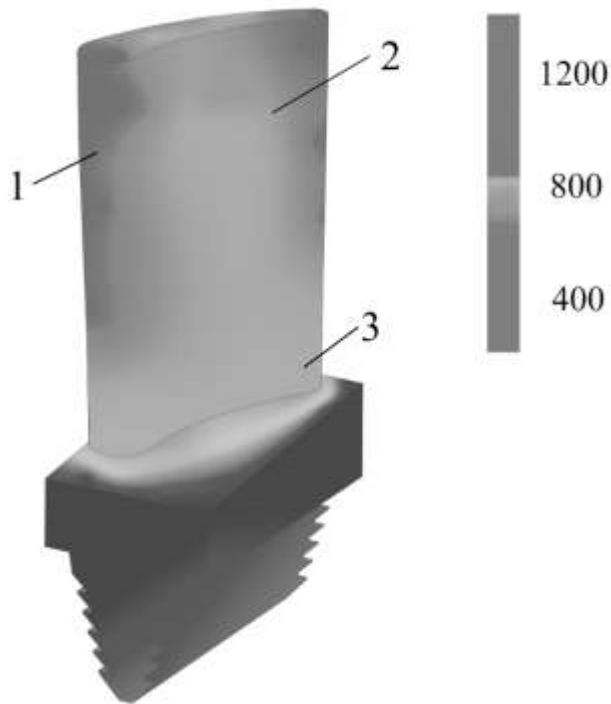


Рисунок 1.5 – Распределение температуры тела лопатки турбины по зонам:

- 1 – максимальной температуры;
- 2 – высокой температуры;
- 3 – умеренной температуры.

Подобное распределение температуры вызвано как конструктивными особенностями ЛТ, такими как сложный аэродинамический профиль переменного сечения, так и особенностями движения рабочих газов при работе турбины ГТД (рисунок 1.6). В процессе работы [173] поток рабочих газов высокой температуры из камеры сгорания 1 попадает на лопатки соплового аппарата 2 первой ступени турбины, откуда, благодаря специфической форме профиля пера лопатки, перенаправляется на лопатки рабочего колеса 3 первой ступени турбины. Далее процесс проходит по аналогичному принципу на всех остальных ступенях турбины, число

которых может достигать 4 и более, при этом температура рабочих газов падает с каждой ступенью. Как следствие такого неравномерного распределения температуры, под действием эксплуатационных воздействий, в зонах максимальной температуры происходит повреждение защитного покрытия, приводящее к катастрофическим разрушениям пера лопатки в дальнейшем.

Возникновение различных температурных зон на профиле пера лопатки (рисунок 1.5) приводит к неравномерным напряжениям и различным механизмам

дальнейшего разрушения. В зонах «высоких» температур наблюдается преждевременное интенсивное окисление из-за предельного уровня температур (более 1150°C), и напряжений сжатия в покрытии, а в зонах «низких» температур – наблюдается возникновение термоусталостных трещин, приводящих к фрагментации покрытия и его разрушению.

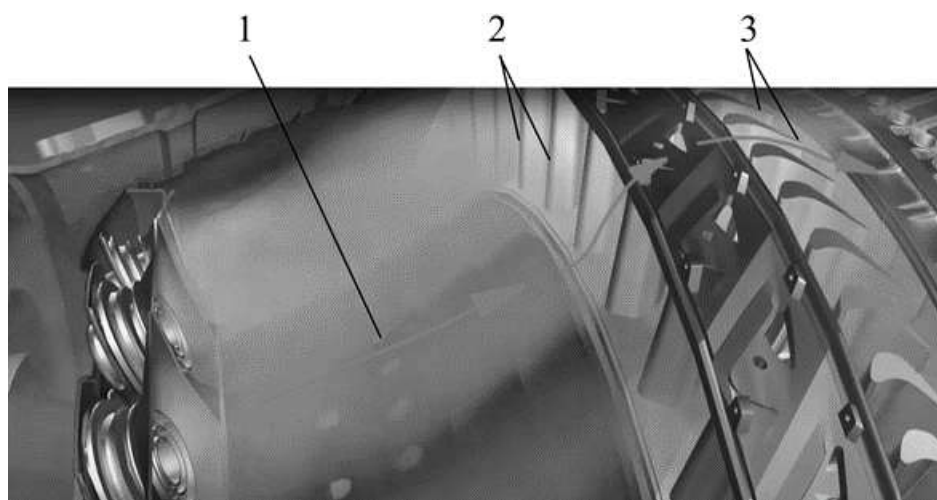


Рисунок 1.6 – Схема движения рабочих газов в процессе работы турбины ГТД

Эксплуатационные воздействия, которым в процессе работы подвергаются лопатки турбины, по механизму их действия, можно разделить на три основные группы: механические, химические и температурные (рисунок 1.7). Анализируя приведенную структуру прослеживается закономерность, что при увеличении воздействий – усиливается их комплексное воздействие на лопатки турбины, ускоряющее их выход из строя.

Рассмотрим более подробно каждую группу воздействий. Механические воздействия включают в себя напряжения растяжения от центробежных сил, изгиб и кручение от газового потока, а также переменные напряжения от вибрационных нагрузок [113]. В зависимости от конструкции лопатки, в частности от расположения центра тяжести, центробежные силы возникающие в работе ГТД могут вызывать как напряжения растяжения в поперечных сечениях лопатки, так и напряжения растяжения и изгиба. Профильная часть и хвостовики лопаток кроме растяжения и изгиба от центробежных сил испытывают переменные напряжения

от вибрационных и тепловых нагрузок [151]. Следствием механических воздействий становятся усталостные разрушения вызванные мало- и многоцикловой усталостью.



Рисунок 1.7 – Структура комплексных воздействий на ЛТ ГТД

Эксплуатационные воздействия химического характера включают в себя эрозию, коррозию, окисление, нагар. ГТД работают на различных видах топлива, которые могут включать агрессивные примеси, способствующие возникновению и развитию коррозионных повреждений. Повышенные концентрации соли и серы, которые могут попадать как с воздухом, так и с топливом, являются источниками коррозии, а присутствие в топливе ванадия, вызывает разрушение поверхностного слоя путем образования легкоплавких оксидов. Существенно усиливает их действие – высокая рабочая температура, следствием чего являются процессы газовой (сульфидно-оксидной) коррозии. В следствии чего лопатки первых ступеней наиболее подвержены процессам газовой коррозии, в то время как лопатки последующих ступеней характеризуются лишь небольшими коррозионными повреждениями и нагаром [113, 176]. В зависимости от условий, и механизмов возникновения газовая коррозия делится на низкотемпературную (700-

800°C) и высокотемпературную (800-950°C). Низкотемпературной газовой коррозии чаще всего подвержены судовые и промышленные ГТД, т.к. они работают на более низких температурах, а основным местом поражения является хвостовик лопатки [168].

Следствием развития процессов газовой коррозии является уменьшение объема материала и соответственно толщины лопатки, что приводит к её ослаблению и ускоренному выходу из строя под действием рабочих нагрузок.

Температурные воздействия наиболее ярко характеризуются двумя видами повреждений: перегреву выше температуры старения, что приводит к изменению микроструктуры металла, а следовательно, к снижению характеристик прочности, а также к термической усталости, проявляющейся в появлении термонапряжений, вызванных многократным неравномерным изменением температуры между входной и выходной кромками лопатки и основным телом. Следует отметить, что данные разрушения характерны для авиационных ГТД, в то время как стационарные установки им не подвержены в следствие особенностей их эксплуатации [113].

В лопатках с защитными термобарьерными покрытиями (ТБП) температурные воздействия вызывают отслоение и оплавление защитного покрытия, а при образовании микротрещин – прогар основного материала лопатки. Наличие подобных покрытий на поверхности лопатки, несмотря на все его достоинства, приводит к возникновению значительных температурных напряжений [125].

Следует отметить, что применение сплавов, обладающих более высокой температурой плавления, не позволяет полностью избавиться от проблемы температурных воздействий. Так, в своих исследования причин разрушения лопаток из сплавов на основе никеля [176] авторы пришли к выводу что лопатки подвергались воздействиям температур выше 1000°C, при нормативных температурах эксплуатации исследуемого ГТД – 750-800°C. При эксплуатации ГТД существует вероятность заброса температуры, что может привести к выходу из строя лопаток последних ступеней турбины [12].

Цикл работы ГТД обуславливает непостоянство нагрузок и температур, которым подвергаются лопатки турбины в процессе эксплуатации. Действие таких нагрузок могут вызывать преждевременный выход лопаток из строя, обусловленный усталостными разрушениями. Авиационные ГТД подвергаются большему изменению нагрузок в процессе эксплуатации, чем стационарные, что вызвано частыми сменами режимов работы – взлёт, посадка и т.д.

Скорость возникновения и развития усталостных разрушений лопаток зависит от материала и величины переменных нагрузок [186]. При этом технология получения заготовок и процессы обработки оказывают существенное влияние на долговечность лопаток турбин. Это объясняется технологической наследственностью.

Разрушения лопаток ГТД, в процессе их работы могут быть вызваны не только особенностями эксплуатации, но и конструктивными дефектами, браком и скрытыми дефектами, которые не были обнаружены при производстве, а также случайными механическими повреждениями, которые практически не зависят от конструкции и расположения лопатки, т.к. вызываются попаданием инородного тела (постороннего предмета, части отколовшейся лопатки, и т.д.).

К разрушениям, возникающим в процессе эксплуатации относятся (рисунок 1.8):

- старение;
- износ;
- газовая (сульфидно-оксидная) эрозия [35, 125].

Как было отмечено ранее, тенденция к повышению температуры в камере сгорания ГТД обусловлена современным направлением развития авиационной техники, и остро акцентирует проблему обеспечения долговечности деталей, работающих при высокой температуре, в том числе и лопаток турбины. В отличие от стационарных установок, для авиационных ГТД характерны различные режимы работы, что в свою очередь характеризуется переменными термическими и механическими нагрузками, являющимися причиной малоциклового усталости, и последующего появления повреждений.

Процессы старения также оказывают влияние на длительную прочность и ползучесть материала, как следствие эксплуатации при высоких температурах и напряжениях [15, 113, 170].

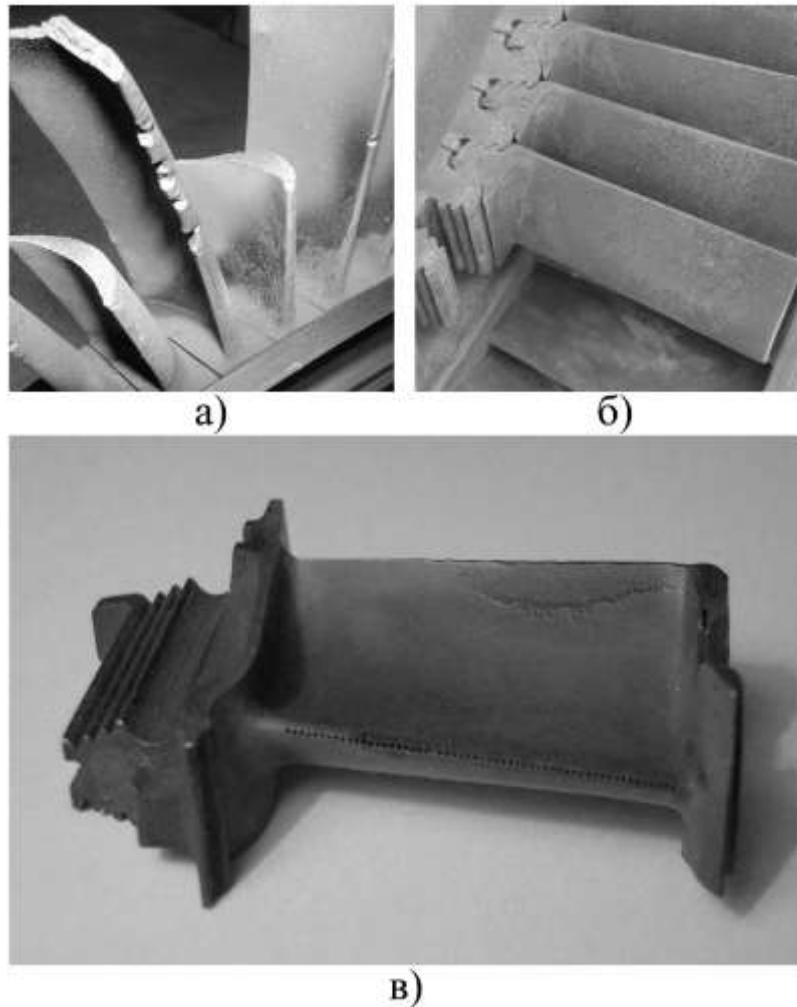


Рисунок 1.8 – Повреждения лопаток турбин [177, 180, 190]

а) излом пера лопатки; б) износ лопаток; в) коррозионное повреждение пера.

Износ лопаток турбины характеризуется комплексом негативных воздействий, которым подвергается лопатка в процессе эксплуатации. В результате этого процесса происходит постепенное изменение размеров поверхностей.

В процессе эксплуатации ЛТ ГТД подвергаются следующим видам износа: абразивному (микрорезание абразивными частицами, содержащимися в продуктах сгорания), усталостному и коррозионному (разрушение поверхностного слоя под действием многократно повторяющихся нагрузок).

Газовая (сульфидно-оксидная) эрозия – это особый вид изнашивания, возникающий под действием высоких температур в первую очередь в местах концентраторов напряжений (наличие микротрещин, участков с повышенным наклепом и т.д.) и характеризующийся отрыванием мельчайших частиц материала горячим газовым потоком. Следует отметить, что эрозионные повреждения наиболее характерны для лопаток первых ступеней, что объясняется высокой температурой газового потока.

Комплексное действие температуры, напряжений и окислительной среды приводит к диффузионным процессам в поверхностных слоях лопаток, ограничивающих их долговечность [125, 181]. Кроме того, на выход из строя лопаток оказывают влияние недоработки конструкции, погрешность изготовления, факторы окружающей среды, чистота топлива и воздуха, используемые материалы, режимы работы, качество и периодичность технического обслуживания.

Как отмечалось ранее, лопатки турбины подвергаются не только температурным воздействиям, а и действию абразивных частиц, химически активной среды продуктов сгорания, вызывающих газовую коррозию и т.д. [137, 185]. Следует отметить, что стационарные ГТУ подвержены абразивному износу в меньшей степени, благодаря системам фильтрации воздуха, однако процесс абразивного износа присутствует и в них [181]. Как показывают многочисленные данные результатов диагностики как ГТД, так и ГТУ – характерными зонами абразивных и коррозионных повреждений являются входная и выходная кромки преимущественно со стороны корытца (рисунок 1.9) [13, 137, 151, 183].

Зоны коррозионных и абразивных повреждений наиболее сильно проявляются в зонах максимальных температурных воздействий, что обусловлено комплексным характером действующих на них эксплуатационных функций [167].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- 1) В процессе эксплуатации лопатки турбины ГТД подвергаются эксплуатационным воздействиям различного характера, а именно механического, температурного и химического;

2) Все эксплуатационные воздействия приводят к соответствующим повреждениям лопаток в частности, и к комплексным разрушениям в целом.

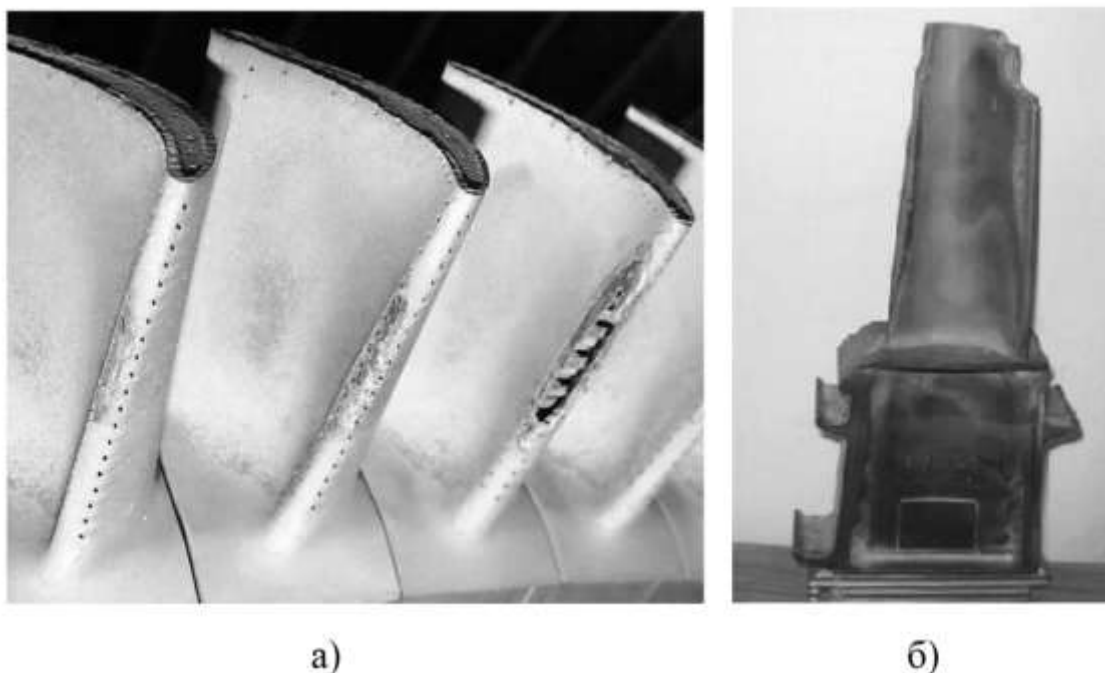


Рисунок 1.9 – Последствия коррозионных и абразивных повреждений лопаток турбин: а) – прогар рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления двигателя ПС-90А, инициированный коррозионным повреждением [126]; б) – рабочая лопатка первой ступени газотурбинной установки [151].

Взаимосвязи эксплуатационных функций, вызывающих комплексные повреждения и разрушения лопаток турбин требуют дальнейшего исследования с целью формирования гипотез и методик учета их влияния.

1.2 Анализ существующих методов и технологий повышения качества лопаток турбины

Как было отмечено ранее, проблема повышения качества [1] лопаток турбины известна давно и не теряет своей актуальности в связи с интенсивно

повышающейся рабочей температурой в камере сгорания и совершенствованию конструкции ГТД.

Существует множество различных методов и технологий повышения качества лопаток турбин, которые охватывают все этапы производства. Общая технология производства лопаток включает в себя этап получения заготовки, этап механической обработки, этапы термической и отделочно-упрочняющей обработки [36, 84].

Технологические процессы изготовления заготовок лопаток, их дальнейшей механической обработки требуют специального технологического оборудования и оснастки, что связано с сложной пространственной формой лопаток, особенностями их расположения в турбине, кинематикой их движения и механическими свойствами материала лопаток [36, 51, 78, 164].

К материалам, применяемым для изготовления лопаток газовых турбин, выдвигаются очень высокие требования, поскольку полученные изделия должны обладать высоким сопротивлением ползучести, усталости, высокотемпературной газовой коррозии, эрозионному разрушению, иметь высокую пластичность и жаропрочность, при этом иметь хорошие технологические свойства, не препятствующие их серийному изготовлению, такие как возможность литья, обработки резанием или давлением и др.

В своей работе [33] Гецов Л.Б. приводит классификацию материалов применяемых для деталей газовых турбин, предполагающую разделение на следующие классы:

- перлитные;
- хромистые ферритные;
- ферритно-мартенситные;
- мартенситные и аустенитно-мартенситные;
- аустенитные стали;
- титановые сплавы;
- сплавы на никелевой и кобальтовой основе.

Для жаропрочных сталей ферритного, ферритно-мартенситного и аустенитно-мартенситного классов, а также жаропрочных сталей перлитного класса часто используют общий термин «ферритные стали».

Перспективными, в настоящее время считаются керамические материалы, металлоокисные сплавы систем $Al-Al_2O_3$, $Ni-Al_2O_3$ и др. и композитные материалы. Эти материалы состоят из сравнительно пластичной матрицы (на основе Ni и Co – для деталей турбины ГТД); тугоплавких карбидов, нитридов, карбонитридов или тугоплавких окислов, и нитиевидных волокон бора и карбидов кремния. Применение этих материалов позволяет снизить массу деталей и достичь рабочих температур $1100...1300^{\circ}C$, которые являются недостижимыми для жаропрочных материалов на железной и никелевой основе [140].

Большое влияние на эксплуатационные характеристики ЛТ ГТД оказывают способы и режимы черновой и чистовой обработки заготовок. В работах [59, 72, 77] отмечается, что наличие в поверхностных слоях обработанных лопаток следов механической обработки (в виде наклепа, шлифовальных прижогов, и т.д.) существенно снижает долговечность работы лопаток. По данным исследований, представленных в работе [76] существует зависимость предела выносливости σ_{-1} от основных параметров шлифования. В работе [160] авторы отмечают, что при длительном воздействии высоких температур в поверхностном слое лопатки, имеющем большую степень наклепа, возможны процессы рекристаллизации монокристаллического материала, что существенно сказывается на эксплуатационных характеристиках лопаток. Однако наряду с окончательными методами обработки значительное влияние на качество поверхностного слоя оказывает предшествующая обработка, что более известно как технологическая наследственность [150].

Обеспечение эксплуатационной надежности лопаток на этапе их производства достигается путем применения методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностей. Применение этих методов позволило значительно повысить ресурс лопаток турбины ГТД, что было подтверждено рядом работ [9, 54, 67, 144, 150].

По способу воздействия на объект, структуру методов ОУО лопаток турбины можно разделить на следующие группы:

1. Лезвийные методы обработки;
2. Абразивные методы обработки;
3. Упрочнение поверхностным пластическим деформированием, (включающее в себя методы вибрационного, дробеструйного, деформационного выглаживания, ультразвуковая обработка);
4. Температурные;
5. Комбинированные;
6. Ионно-имплантационная обработка, включающая в себя низко- и высокоэнергетические методы ионной имплантации;
7. Нанесение защитных и специальных покрытий (таких как эрозионностойкие, коррозионностойкие, жаростойкие, теплозащитные и специальные конструкционные покрытия).

В настоящее время применение лезвийных методов обработки сводится к минимуму, благодаря совершенствованию высокоточных способов получения заготовок и активному применению абразивных методов обработки. Так, хвостовики лопаток обрабатываются методами глубинного шлифования, а профиль пера лопатки шлифуется кругами и лентами на специализированном оборудовании.

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – это обработка деталей давлением без снятия стружки, при которой пластически деформируется только их поверхностный слой [141]. ППД повышает эксплуатационные свойства деталей машин за счет упрочнения поверхностного слоя, которое является следствием упругопластического деформирования, возникающего при механическом воздействии на металл [142]. Эффективно применение упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием на финишных операциях технологического процесса изготовления деталей вместо операций окончательной обработки лезвийным или абразивным инструментом [55, 146]. Так как лопатки турбины работают в сложных условиях, при которых вся

эксплуатационная нагрузка воспринимается поверхностным слоем – износостойкость зависит от сопротивления поверхностного слоя разрушению. Для деталей, разрушение которых начинается с поверхности, разработано большое количество методов поверхностного упрочнения, основанных на нанесении покрытий или изменении состояния поверхности [22, 66, 68, 69, 104, 118, 160]. Все методы обработки заготовок пластическим деформированием имеют широкие возможности в управлении параметрами состояния поверхностного слоя деталей машин, что в свою очередь отражается в изменении их эксплуатационных свойств. Однако эффективность ППД снижается с увеличением рабочих температур. Как показывает опыт использования ГТД, эффективность методов упрочнения напрямую зависит от условий эксплуатации [62].

В качестве покрытий лопаток турбин используются различные материалы и их комбинации, составы и структуры веществ. При этом активно применяются металлические, интерметаллидные, композитные и композиционные покрытия и их комплексы [8, 94, 121, 188].

Процессы ионной имплантации позволяют изменять механические, физико-механические и эксплуатационные характеристики поверхностных слоев материала. В результате обработки готовых изделий в их поверхностном слое получают уникальные по своему структурно-фазовому составу химические соединения, которые невозможно получить традиционными методами финишной обработки. Такое модифицирование структуры поверхностей обеспечивает повышение эксплуатационных свойств изделий, а, следовательно, и увеличение ресурса их эксплуатации. Однако следует отметить, что глубина имплантированного слоя с измененным химическим составом не превышает 10...15 мкм, а глубина модифицированного поверхностного слоя может достигать до нескольких миллиметров.

Сущность метода ионной имплантации заключается в бомбардировке имплантируемым веществом поверхности металлических материалов, при этом ионизированные атомы или молекулы внедряются в кристаллическую решетку и формируют новые поверхностные сплавы, что дает возможность создания

композиционных систем с уникальными структурами и свойствами, которые существенно отличаются от свойств основного материала [4]. К преимуществам ионной имплантации, как метода модифицирования поверхности, по сравнению с другими методами обработки можно отнести [161]:

1. Увеличение растворимости в твердом состоянии.
2. Независимость образования сплавов от констант диффузии.
3. Возможность быстрого изменения состава сплава.
4. Независимость от процессов, протекающих в объеме материала.
5. Возможность реализации процесса при низких температурах.
6. Очень незначительное изменение размеров обрабатываемой детали.
7. Отсутствие проблемы адгезии, так как не существует ярко выраженной поверхности раздела.
8. Контролируемая глубина распределения концентрации.
9. Вакуумная чистота.
10. Высокая контролируемость и воспроизводимость.

Ряд исследователей в своих работах [3, 5, 145] дают рекомендации по проведению дополнительной операции отжига после нанесения покрытия, независимо от метода нанесения.

При нанесении защитных и специальных покрытий используют основные группы методов, отличающиеся способом испарения наносимого материала и его осаждения на подложку детали.

По механизму формирования защитного слоя методы получения покрытий можно разделить на диффузионные и конденсационные. Диффузия – перемещение адсорбированных атомов внутри металла. При этом движущей силой процесса является перепад концентраций или химических потенциалов в растущих фазах [70]. К диффузионным относятся защитные покрытия, в процессе осаждения которых формируется защитный слой в результате взаимной диффузии химических элементов материала подложки и осажденного материала. Следовательно, свойства диффузионных защитных покрытий определяются не

только осаждаемым на поверхность лопатки материалом, но и составом сплава подложки.

В настоящее время, в мировой практике, активное применение получили следующие методы нанесения диффузионных защитных покрытий:

- диффузионное насыщение поверхности (в порошковых засыпках, газоциркуляционным способом, вакуумным осаждением, импульсным методом и методом реакционного спекания);
- шликерный метод;
- золь-гель метод;
- горячее окунание в расплав;
- электрохимические и химические методы [21, 147].

К конденсационным защитным покрытиям относят покрытия, имеющие переходную диффузионную зону с материалом подложки и собственно покрытие, структуру и состав которого определяют технология осаждения и состав осаждаемого материала [34, 56, 110]. Однако, применение конденсационных методов нанесения покрытий имеет и свои недостатки, такие как:

- невозможность покрытия внутренних полостей деталей;
- пористость покрытий;
- неравномерность толщины покрытий, особенно при нанесении на детали сложной геометрической формы и крупных габаритов.

Может выполняться различными методами, такими как: физическое осаждение PVD (physical vapor deposition), магнетронным, вакуумно-дуговым или воздушно пламенным методами, а также вакуумно-плазменной технологией высоких энергий (ВПТВЭ) [61, 71, 109, 111]. При нанесении конденсационных покрытий широко распространены сплавы систем: Ni-Cr-Al-Y (СПД-2), Al-Si-Y (ВСДП-11), Ni-Cr-Al-Ta-W-Hf-Y (СДП-ТВГ) и др. Универсальная схема защитного покрытия представлена на рисунке 1.10.

Так, в период с 1985 по 1992 гг. Опытным заводом спецэлектрометаллургии им. Е.О. Патона, был проведен большой объем работ по восстановлению блоков

лопаток ГТД и агрегатов, после их плановой наработки в процессе эксплуатации. Финишными операциями процесса восстановления лопаток турбин являлось нанесение защитных жаростойких покрытий, осаждаемых из паровой фазы в вакууме из сплавов на основе никеля и кобальта, с добавками алюминия, хрома, иттрия. В результате такой технологии отмечалось увеличение ресурса эксплуатации лопаток ГТД в несколько раз [41].

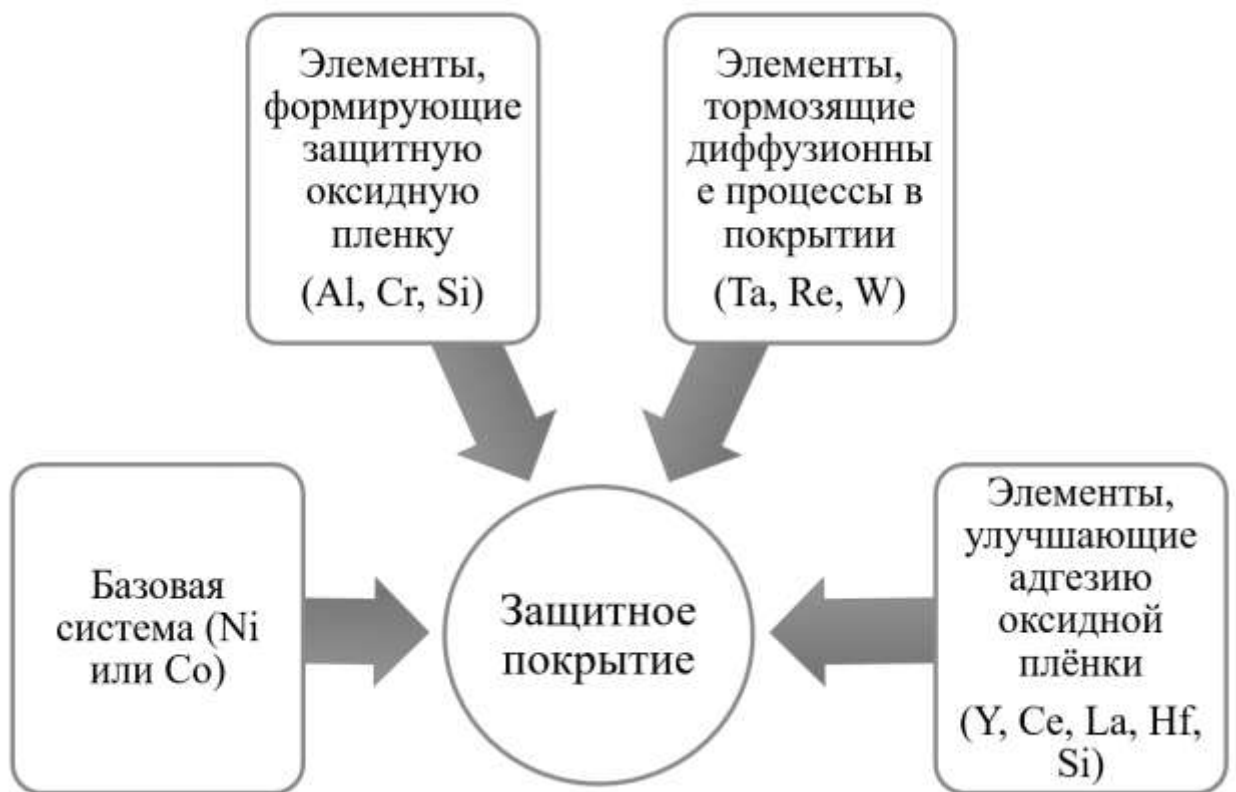


Рисунок 1.10 – Универсальная схема защитного покрытия

Рассмотрим более детально назначение элементов защитных покрытий. Алюминий является основой всех современных жаростойких покрытий, благодаря образованию на поверхности защитной оксидной пленки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Хром обеспечивает формирование пленки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при низком содержании Al, а также входит в состав защитной пленки $\text{Ni}(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$. Кремний повышает жаростойкость при высокотемпературном окислении и солевой коррозии. Наличие в покрытиях таких элементов как кислород, азот, кальций или сера негативно сказывается на характеристиках защитных покрытий.

Характеристики толщины упрочненного слоя и температура его формирования при применении основных методов упрочнения поверхностей приведены в таблице 1.1 [60, 106, 118, 123, 145].

Широкое распространение получили методы газотермического напыления, которые объединяют в себе следующие методы:

- газопламенное напыление;
- высокоскоростное газопламенное напыление;
- детонационное напыление;
- плазменное напыление;
- электродуговая металлизация.

Таблица 1.1 – Характеристика упрочненного слоя при различных методах упрочнения.

Метод упрочнения	Характеристика покрытия и процесса	
	Толщина упрочненного слоя, мкм	Температура формирования, °C
Наплавка	До 5000	1120...1200
Закалка ТВЧ	До 3000	1050...1150
Химико-термическая обработка	5...80	700...1450
Гальваническая обработка	5...70	50...80
Лазерная закалка	1...50	До 1500
Газотермическое напыление	30...150	200...300
Вакуумно-плазменное напыление	До 25	200...500

Все перечисленные методы обеспечивают процесс нагрева, диспергирования и переноса конденсированных частей распыляемого материала газовым или плазменным потоком и последующее формирование слоя распыляемого материала на подложке.

Широкое распространение получил метод атмосферного плазменного напыления (плазменного напыления, воздушно-плазменного напыления) – при котором материал будущего покрытия нагревается в плазмотроне до плавления и переносится на поверхность детали плазменным потоком [64]. Позволяет проводить напыление защитных покрытий из широкого спектра керамических и металлических порошковых материалов на практически любые материалы [26, 116]. Так, в работе [37] авторами разработана и активно применяется мобильная установка для нанесения плазменных покрытий, позволяющая производить ремонты поврежденных лопаток и их участков непосредственно на месте без необходимости полной разборки установки.

Качество газотермических покрытий, нанесенных на лопатки плазменным способом, во многом зависит от применяемой технологии, которая должна решать два основных и зачастую противоположных вопроса: производительность процесса нанесения и качество обработки [27].

Одним из прогрессивных методов нанесения покрытий является детонационный. Данный метод характеризуется высокой степенью производительности, а также отсутствием необходимости предварительного нагрева заготовок свыше 200°C [16, 38]. Сравнительно низкая температура нагрева позволяет минимизировать или полностью исключить изменение размеров и формы изделия под действием термических нагрузок. При этом, в зависимости от требуемых свойств, могут быть достигнуты существенные показатели стойкости к сухому и мокрому абразивному изнашиванию и повышению твердости [114].

В настоящее время разработаны и активно применяются множество различных методов повышения качества лопаток турбин ГТД [26, 30, 31, 32, 39, 49, 50, 59, 121, 178, 179]. Их можно разделить на методы повышения качества получения заготовок и методы улучшения отделочно-упрочняющей обработкой. В данной работе будут рассматриваться исключительно методы улучшения отделочно-упрочняющей обработкой. Рассмотрим основные из этих методов, технологий и применяемого технологического обеспечения.

Применение современных сплавов, новых разработок в технологии литья, методов направленной кристаллизации, использование охлаждаемых лопаток значительно увеличили эксплуатационные свойства лопаток турбины, однако в наше время акцент в разработках смещается на применение теплозащитных покрытий (ТЗП), т.к. они позволяют значительно повысить рабочую температуру газа (100°C и выше).

По принципу реализации современные процессы нанесения защитных многофункциональных покрытий можно разделить на две группы: физические (Physical Vapour Deposition, PVD) и химические (Chemical Vapour Deposition, CVD) [29].

При физическом осаждении (PVD) материал покрытия переходит в газовую фазу из твердого состояния в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала. Энергия, распределение и плотность потока частиц определяется методом нанесения, параметрами процесса и формой источника частиц. Важным моментом является то, что покрытие наносится только на поверхности направленные непосредственно к источнику, в отличие от методов химического осаждения. Качество покрытий, нанесенных методом физического осаждения, сильно зависит от чистоты исходных материалов для напыления и реакционного газа.

Для реализации метода физического осаждения в наше время разработаны различные способы, которые делятся на процессы, использующие испарение, и процессы, использующие распыление [29, 44, 45, 47, 155].

Так, испарение может осуществляться следующими методами:

- резистивным сопротивлением;
- индукционным нагревом;
- электронно-лучевым пучком;
- низковольтной дугой;
- полым катодом;

- катодной дугой;
- анодной дугой;
- лазерным лучом.

Распыление может проходить различными методами, среди которых следует выделить:

- распыление ионной бомбардировкой;
- магнетронное распыление;
- распыление катодным пятном;
- постоянным током;
- током высокой частоты;
- в среде реакционного газа.

На сегодняшнем этапе развития, промышленное применение в изготовлении авиационных деталей, в том числе лопаток, нашли несколько методов физического осаждения из паровой фазы, отличающиеся способом получения газовой фазы материала покрытия [24].

При химическом процессе осаждения (CVD) покрытия получают путем осаждения при высоких температурах 950-1050°C из парогазовой среды. При этом процесс основан на принципе, что все материалы поступают в камеру в газообразном состоянии, где происходит химическая реакция, в результате которой образуется твердое вещество покрытия и газообразный продукт реакции. Отдельно стоит отметить технологию нанесения плазменного покрытия CVD, отличающуюся пониженными температурами рабочего процесса (450-650°C), что достигается благодаря наличию плазмы в камере нанесения покрытия.

В последнее время большое внимание уделяется теплозащитным (ТЗП) или термобарьерными (ТБП) покрытиям, как среди отечественных ученых [11, 26, 30, 48, 57, 121, 124, 132, 166], так и за рубежом [171, 178, 182, 184, 189, 191, 193]. Эти покрытия представляют собой комбинацию из внешнего керамического и внутреннего жаростойкого слоев. При этом внешний слой обеспечивает теплозащитный эффект, за счет низкой теплопроводности, а внутренний

жаростойкий слой обеспечивает сцепление керамического слоя с подложкой и защиту поверхности лопатки от высокотемпературного окисления [111]. Применение теплозащитных покрытий позволяет достичь различных результатов, например, повышения мощности без увеличения величины охлаждения, или повышение ресурса, без потери мощности. Возможности увеличения производительности или ресурса ГТД за счет ТБП представлены на рисунке 1.11.

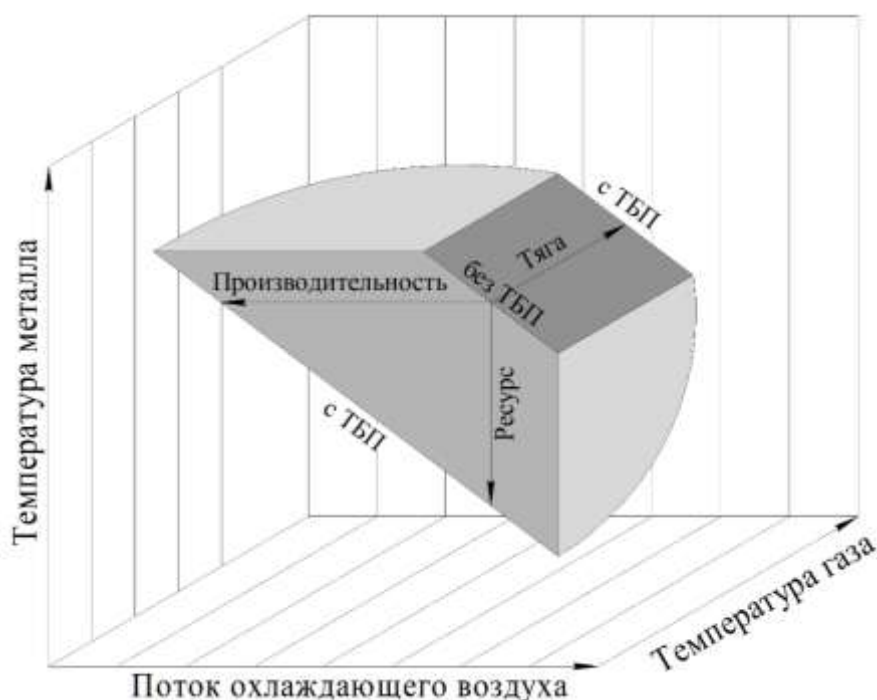


Рисунок 1.11 – Возможности увеличения производительности и/или ресурса ГТД за счет ТБП [10, 105, 193]

Увеличение толщины покрытий ограничено появлением остаточных напряжений и их ростом с увеличением толщины. Остаточные напряжения влияют на прочность соединения покрытия с подложкой.

Наиболее распространенная схема защитного покрытия (рисунок 1.12), состоящего из трех слоев, включает в себя связующий металлический слой, наружный керамический слой, а также слой термически выращенного оксида, который формируется в процессе эксплуатации лопаток или специальной термической обработкой перед нанесением керамического слоя.

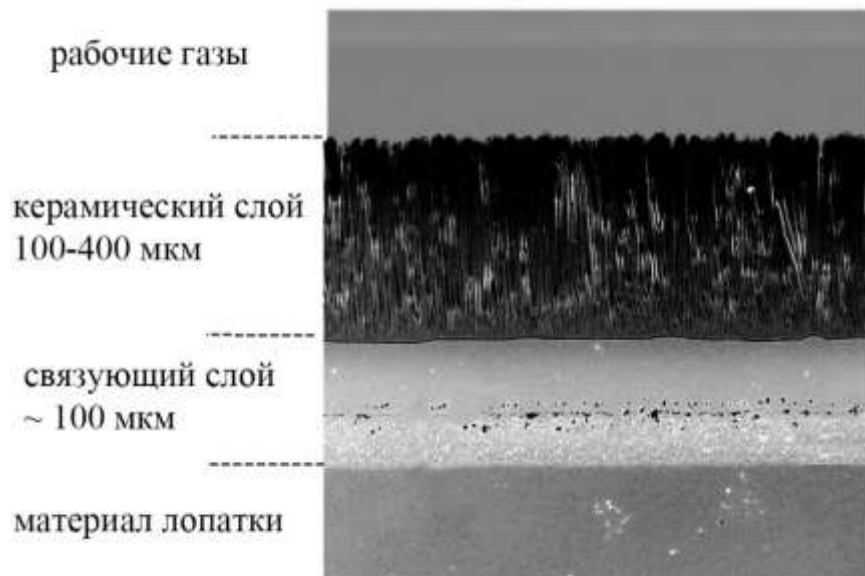


Рисунок 1.12 – Схема теплозащитного покрытия [181, 192]

Металлический (связующий) слой служит для минимизации разницы термического расширения между сплавом и керамическим покрытием, а также защиты от окисления. Керамический слой – препятствует отводу тепла внутрь жаропрочного сплава.

Основная проблема в создании ТБП для лопаток турбины заключается в сочетании наружных керамических слоев с жаропрочным материалом, из которого изготовлена лопатка. Из-за большого различия в коэффициентах термического расширения керамики и жаропрочного сплава при циклах «нагрев-охлаждение» происходит образование высоких термических напряжений и дальнейшее скалывание керамического слоя. С целью снижения термических напряжений в керамическом слое применяют специальные приемы дробления, что позволяет получать сетку микротрещин либо специальную столбчатую структуру, которые могут легко дробиться при появлении в них напряжений растяжения/

В работе [165] рассматривается метод нанесения диффузионного покрытия газоциркуляционным способом, применяемым ФГУП «ММПП «Салют» для обработки наружных и внутренних поверхностей лопаток турбин. Суть этого способа заключается в переносе диффундирующего элемента в газовом потоке галогенидов в замкнутом рабочем пространстве установки в результате протекания

обратимых химических реакций. Предложенная технология позволяет проводить операции алитирования, хромоалитирования и кобальтохромоалитирования.

В работе [26] рассматривается метод электронно-лучевого направленного осаждения паров, что является усовершенствованной технологией электронно-лучевого осаждения из паровой фазы. Нанесение керамических слоев происходит путем низковакуумного электронно-лучевого испарения керамики в сочетании с направленным обдувом зоны испарения инертным газом под определенным углом. Основными преимуществами покрытий, нанесенных данным методом, по сравнению с покрытиями, полученными методом плазменного напыления, являются (рисунок 1.13): столбчатая структура покрытия, которая является более долговечной, химическая связь с гладкой поверхностью подложки, увеличенный ресурс и повышенная эрозионная стойкость [63, 119, 178, 184].

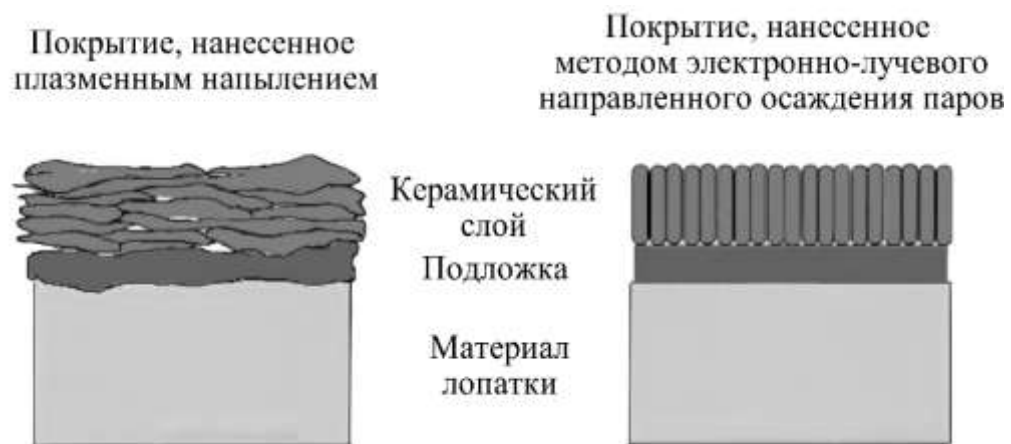


Рисунок 1.13 – Схематичное сравнение структуры покрытий, нанесенных методом электронно-лучевого направленного осаждения паров и плазменным напылением [63, 178, 184, 191]

Основываясь на выводах, полученных автором в его исследовании [25] следует отметить, что важную роль играет расположение деталей в вакуумной камере. Так, согласно приведенным данным, в зависимости от расположения изменяется толщина покрытия у различных деталей партии, и, следовательно микротвердость.

В настоящее время применяется большое количество различных покрытий [43, 112], отличающихся как типом, так и составом, работающих в температурах 750-1200°C. Однако, учитывая все положительные стороны применения защитных покрытий, невозможно улучшить теплозащиту лопаток исключительно за счет наращивания толщины покрытия. Об этом свидетельствуют исследования как отечественных [119, 144, 145] так и зарубежных [146] авторов, которые отмечают необходимость производить расчетное определение оптимальной толщины покрытий столбчатой структуры с учетом конкретных условий работы ЛТ, а также учетом сил трения газодинамического потока, термических напряжений, теплофизических и прочностных свойств материала подложки.

Применяемые для защиты лопаток турбины защитные покрытия должны учитывать функциональные особенности различных элементов лопатки, которые могут существенно отличаться на различных элементах детали. В связи с чем применение комбинированного упрочнения лопаток на основе функционально-ориентированного подхода позволяет обеспечить свойства функциональных элементов в зависимости от эксплуатационных особенностей или требуемого потенциала изделия [90, 97, 101] тем самым повысив общий ресурс ГТД за счет увеличения межремонтного ресурса элементов и количества их восстановлений.

В ряде работ [85, 91, 96, 157, 159] авторы предлагают повышать не ресурс всего изделия в целом, а основываясь на особенностях эксплуатации и функциональных свойствах отдельных элементов лопаток – применять функционально-ориентированный подход при нанесении покрытий, тем самым формируя функционально-ориентированные покрытия на поверхности лопаток турбин ГТД. Обеспечение функционально-ориентированных свойств лопаток ГТД, в свою очередь повышает их ресурс, ремонтпригодность и восстанавливаемость за счет адаптации их свойств к особенностям действия неравномерного износа рабочих поверхностей [124].

Так, в работах [99, 103, 124, 128] авторами рассмотрен метод нанесения многослойных функционально-ориентированных износостойких покрытий ионно-плазменным методом в вакууме. Предложенный метод позволяет формировать

многослойные ФОП, состоящие из требуемого количества слоев. Применение такого покрытия для лопаток ГТД повышает общий ресурс работы, межремонтный ресурс и количество допустимых восстановлений при ремонтах, а главное – полностью исключает разрушение тела лопатки во время эксплуатации [6].

Существенный эффект на итоговые параметры получаемых деталей также оказывают способы финишной обработки, такие как полирование свободным абразивом [136].

Одним из важнейших этапов производства ЛТ ГТД является финишная отделочная обработка, включающая полирование рабочих и направляющих поверхностей. Эта операция направлена на уменьшение микронеровностей, снижение коэффициента трения, повышение усталостной прочности и увеличение ресурса работы деталей в условиях высоких температур и нагрузок. Тем не менее, несмотря на критическую важность процесса, на сегодняшний день отсутствуют четко регламентированные методики определения рациональных режимов полирования, особенно при автоматизированной или роботизированной обработке.

Основной сложностью при выборе режимов является отсутствие количественно обоснованных критериев, позволяющих связать параметры процесса – такие как усилие прижима инструмента, скорость относительного движения, жесткость системы и свойства обрабатываемого материала – с достигнутым качеством поверхности. Вследствие этого режимы полирования зачастую подбираются эмпирически, на основе опыта рабочих или экспериментальных данных, что снижает воспроизводимость и технологическую надежность.

Перспективным подходом к решению данной задачи является применение теоретических моделей контактного взаимодействия, в частности, контактной задачи Герца. Эта модель позволяет описать напряженно-деформированное состояние в зоне контакта между инструментом и поверхностью лопатки, исходя из геометрии взаимодействующих тел и прикладываемой нагрузки. Полученные в рамках модели Герца удельное давление и площадь пятна контакта могут быть использованы для расчета режимов обработки и разработки рекомендаций.

Однако, данная методика не учитывает особенности упругих свойств материалов, из которых изготовлены полировальные круги и особенностей процесса полирования.

В настоящее время отсутствуют экспериментально доказанные результаты практического применения контактной задачи Герца при использовании мягких полировальных элементов, например, фетровых кругов или резино-абразивных дисков, контактирующих с нержавеющей сталью, титановыми сплавами и сплавами на основе никеля.

Применение методов теории упругого контакта, и в частности, методики контактного взаимодействия Герца, к анализу процессов отделочной обработки лопаток ГТД позволит выработать научно обоснованные подходы к выбору режимов полирования. Это, в свою очередь, способствует стандартизации процесса, снижению технологических рисков и повышению эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей.

Выполненный анализ существующих методов и технологий повышения качества лопаток турбины позволил установить следующее:

1. Существующие технологии позволяют обеспечить повышение качества поверхности и поверхностного слоя лопаток турбины различными методами.
2. Существующие методы ОУО лопаток турбины ГТД очень разнообразны как по способу воздействия, так и по сущности процесса упрочнения.
3. При выборе метода ОУО необходимо учитывать тот факт, что лопатки различных ступеней турбины воспринимают различные нагрузки.
4. Нанесение защитных покрытий может значительно расширить возможности эксплуатации современных металлов и сплавов, применяемых для изготовления лопаток турбин, однако имеет ряд своих особенностей и ограничений в применении.

Разработку технологии повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин следует вести основываясь на классических понятиях технологии машиностроения, принципах технологической

наследственности и функционально-ориентированных технологий, гарантируя достижение искомого качества обрабатываемых поверхностей.

1.3 Исследование современных методов и средств повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины

Технологический процесс является частью производственного процесса, которая включает в себя последовательное изменение размеров, формы, свойств предмета производства. Разрабатываемый технологический процесс должен обеспечивать достижение всех требований по точности и качеству обрабатываемого изделия, в соответствии с чертежом и предъявляемыми техническими требованиями, с привлечением наименьших затрат труда и минимальной себестоимости [157]. Изготовление базовых поверхностей под механическую обработку и распределение припусков на полке, корыте и замковой части является наиболее важным элементом технологического процесса изготовления лопаток.

Повышение требований как с точки зрения эксплуатационных характеристик, так и с точки зрения надежности, оказывает существенное влияние на трудоемкость процессов механической обработки. Как показывает опыт передовых предприятий, резервы снижения трудоемкости имеются на всех процессах основного и вспомогательного производства. Снижение трудоемкости процессов основного производства должно в первую очередь обеспечить возможность выполнения непрерывно растущего объема производства без снижения качества продукции.

Повышение производительности обработки, при обеспечении требуемого качества обрабатываемых изделий является очень сложной, но приоритетной задачей, что обусловлено большим количеством выпускаемых лопаток и высокой трудоемкостью их изготовления. Так, трудоемкость изготовления лопаток

современного ГТД может достигать 40% от общей трудоемкости изготовления всех его деталей [107].

Существующие современные методы и средства повышения производительности включают в себя: методы интенсификации режимов обработки, применение высокопроизводительного инструмента, комбинированная обработка, применение систем инженерного анализа и компьютерного моделирования, а также применение специальных технологий, например, функционально-ориентированных технологий.

Постоянное развитие и совершенствование высокоточных трех- и пятикоординатных обрабатывающих центров, наряду с высококачественным твердосплавным инструментом позволяет совместить обработку поверхностей лопаток за один установ, тем самым обеспечивая максимально возможную точность их относительного положения. Такая обработка, характеризующаяся концентрацией технологических операций на одном станке, позволяет добиться более равномерного распределения припусков под последующую финишную обработку и общее уменьшение величины припусков. Примером применения прогрессивных методов отделочной обработки является обработка лопаток в сборе в барабане на современном оборудовании типа карусельно-шлифовальных обрабатывающих центров [107]. Применение такого оборудования не лишено недостатков, а именно – высокой и различной для различных лопаток погрешности базирования в барабане.

В качестве оборудования для окончательной обработки применяются многокоординатные ленточно-шлифовальные станки с ЧПУ, однако, с учетом того, что разработку управляющих программ для таких станков ведут максимально приближенную к теоретическому профилю – часто могут потребоваться дополнительные доводочные операции, что может сводить к минимуму эффективность их применения [28].

Повышение производительности обработки может быть достигнуто путем оптимизации схемы базирования [120, 134], а именно нарушением классического принципа базирования с целью повышения жесткости при обработке.

Модернизация схемы базирования лопаток в станочном приспособлении, а также выполнение специальных мероприятий по демпфированию пера лопатки позволяет не только снизить вибрации в процессе обработки, но и применять более производительные режимы резания [135].

Ещё одним путем повышения производительности обработки является её автоматизация. Производство лопаток ГТД в условиях автоматизированных технологических процессов может выступать реальным инструментом повышения производительности, при условии обеспечения стабильно высокого качества их изготовления [130]. Такая автоматизация непосредственно связана с разработкой нового технологического обеспечения для базирования и установки лопаток в процессе обработки, что позволит добиться высокой производительности обработки при обеспечении стабильного качества. При этом могут применяться дополнительные приспособления спутники, и т.д.

Геометрические особенности конструкции лопаток турбин также накладывают ряд ограничений на возможность их высокопроизводительной обработки. Например, профиль замка лопатки, накладывает существенные ограничения на геометрические размеры режущего инструмента, что существенно снижает производительность обработки, а в некоторых случаях даже невозможность её автоматизации [129, 139].

Компьютерное моделирование процессов обработки, включающее в себя статическое моделирование зоны контакта инструмента с деталью и динамическое моделирование технологического перехода позволяет проанализировать состояние технологической системы «станок-приспособление-инструмент-деталь» (СПИД) в любой момент времени. Применение такого подхода позволяет управлять процессом обработки и оптимально распределить технологические воздействия по переходам операции обработки [131]. Системы инженерного анализа CAE, в основе которых положен метод конечных элементов, позволяют оценить и моделировать процессы обработки ещё на этапе проектирования, что позволяет оптимизировать процессы обработки, обеспечив при этом повышение производительности, с одновременным сохранением или даже повышением

точности геометрических размеров обрабатываемых деталей и характеристик профиля. Это стало возможно благодаря существенному повышению производительности персональных компьютеров и современному программному обеспечению [40].

Актуальность в решении вопросов по изготовлению машин требуемого качества приобрёл метод, основанный на синтезе функционально-ориентированных технологий обеспечивающих качественно новую совокупность свойств и меру полезности изделий машиностроения описанный в научных трудах доктора технических наук, профессора Михайлова А.Н.

Применение функционально-ориентированных технологий для изделий машиностроения позволяет максимально повысить их общие эксплуатационные параметры за счет увеличения технических возможностей и придания новых свойств отдельным элементам, поверхностей и зон изделия в зависимости от функциональных локальных особенностей эксплуатации [90]. В том числе благодаря возможности управления величиной требуемых технологических воздействий.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что повышение производительности обработки может быть достигнуто рядом мероприятий, а именно:

1. Применение комбинированных методов обработки, например путем совмещения операций отделочной и упрочняющей обработки.
2. Применение специальных инструментов, позволяющих расширить технологические возможности, снизит время на смену инструмента и т.д.
3. Применение функционально-ориентированных технологий и подхода, для адаптации процесса обработки к особенностям каждой обрабатываемой детали в частности.
4. Применение современного высокопроизводительного оборудования и средств автоматизации.

1.4 Цель и задачи работы

Выполненный анализ современного состояния вопроса исследования, проведенный анализ существующих методов и технологий повышения качества, а также исследование современных методов и средств повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины позволили сделать следующие выводы:

1. Несмотря на широкий выбор современных материалов для лопаток турбин, они не всегда могут обеспечить работоспособность лопаток при высоких температурах без применения защитных покрытий.

2. Применение методов отделочно-упрочняющей обработки на современном этапе развития ГТД может быть как в виде отдельной финишной обработки, так и как часть комбинированной обработки до или после нанесения специальных защитных покрытий.

3. В настоящее время, существующие виды покрытий позволяют решать целое множество различных проблем, связанных с повышением качества лопаток турбин, однако в своём большинстве они представляют собой узкоспециализированные решения позволяющие решать конкретную проблему.

4. Методы комбинированной обработки, особенно с применением специализированного инструмента позволяют повысить производительность обработки лопаток.

5. Комплексное использование функционально-ориентированных технологий и современных методов ОУО позволяют существенно повысить эффективность применения защитных покрытий лопаток турбин.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является совершенствование технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины ГТД на основе применения комбинированных методов обработки, с зональным обеспечением функционально-ориентированных свойств.

Для достижения этой цели, в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ особенностей износа и разрушения лопаток турбины ГТД в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий. Исследовать особенности применения комбинированных методов обработки и технологий повышения качества лопаток турбин.

2. Разработать методику синтеза технологического обеспечения комбинированной ОУО, обеспечивающего формирование локальных технологических воздействий и направленного на повышение производительности процесса.

3. Исследовать параметры и особенности разработанной схемы комбинированной обработки, основанной на зональном обеспечении функционально-ориентированных свойств поверхностного слоя ЛТ ГТД.

4. Установить закономерности влияния параметров режимов резания в зоне обработки на формирование функционально-ориентированных свойств при комбинированной ОУО, выявить особенности интеграции отдельных методов в единый функционально-ориентированный технологический процесс.

5. Выполнить экспериментальные исследования по определению параметров режимов резания в зоне обработки, для обеспечения функционально-ориентированных свойств при комбинированной ОУО.

6. Разработать рекомендации по совершенствованию технологического обеспечения повышения производительности комбинированной ОУО лопаток турбины ГТД.

7. Внедрить результаты работы в производство.

Эти задачи решаются в данной работе.

РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

2.1 Анализ неравномерностей функциональных воздействий

Сложная пространственная форма пера лопатки и особенности процессов работы турбины ГТД приводят к неравномерности нагрева в процессе работы, что приводит к преждевременному выходу из строя. Как отмечалось ранее, для обеспечения функциональных свойств всех элементов пера лопатки необходимо провести анализ эксплуатационных воздействий, возникающих в процессе работы.

Для решения данной проблемы были рассмотрены результаты натурных испытаний [172, 174] и компьютерного моделирования [133, 194] как отечественных, так и зарубежных ученых. При этом, для более информативного понимания распределения температуры по профилю лопатки, на нем были выбраны контрольные точки, находящиеся на равном расстоянии друг от друга

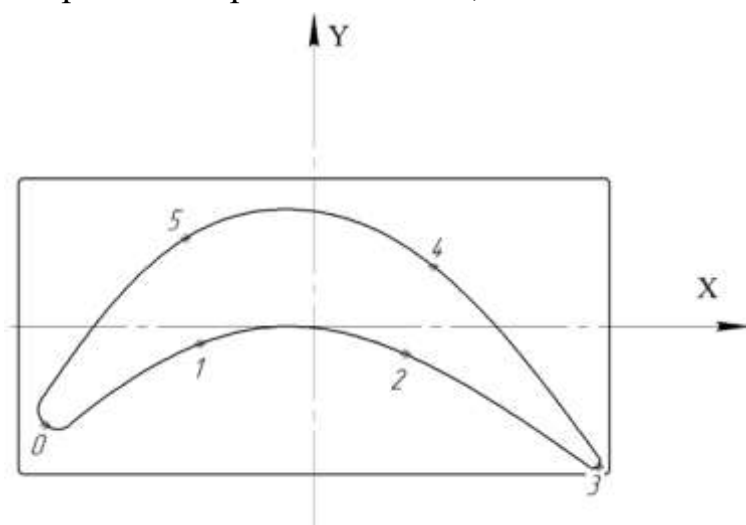


Рисунок 2.1 – Контрольные точки на профиле пера лопатки турбины

(рисунок 2.1) и различные сечения в разных частях профиля пера лопатки.

При анализе вышеуказанных результатов испытаний были выбраны три сечения на профиле ЛТ ГТД – нижняя часть пера (сечение 1-1), середина профиля (сечение 2-2) и верхняя часть пера (сечение 3-3) (рисунок 2.2).

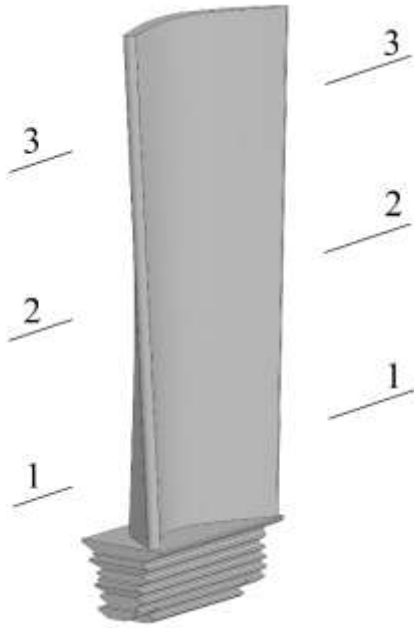


Рисунок 2.2 – Сечения на профиле ЛТ ГТД

Зоны основания и вершины профиля не рассматривались, в связи с неточностью данных при натурных испытаниях, вызванных ограничениями в устройстве для измерения температурных воздействий. Построенные по этим данным графики распределения температур по профилю ЛТ ГТД (рисунок 2.3) наглядно демонстрируют величину неравномерности температурных воздействий, достигающую перепада порядка 500...700°C на различных участках профиля. Возникновение различных температурных зон на профиле пера лопатки (рисунок 1.5) приводит к неравномерным напряжениям и различным механизмам дальнейшего разрушения. Так, в зонах «высоких»

температур наблюдается преждевременное интенсивное окисление из-за предельного уровня температур, и напряжения сжатия в покрытии, а в зонах «низких» температур – наблюдается возникновение термоусталостных трещин, приводящих к фрагментации покрытия и его разрушению.

Проанализировав температурные воздействия в контрольных точках всех сечений, были определены следующие закономерности:

1. Распределение температуры в процессе эксплуатации ЛТ ГТД неравномерно, и вызвано как особенностями их геометрии (в частности, повышенным температурам на выходной кромке лопатки, вызванным относительно маленькой толщиной пера лопатки и воздействию высоких температур как со стороны корытца, так и со стороны спинки), так и особенностями протекающих рабочих процессов.

2. Современные методы компьютерного моделирования тепловых процессов в настоящее время дают практически идентичные натурным испытаниям результаты.

3. На профиле лопатки можно выделить основные зоны, подверженные максимальным температурным воздействиям, при этом такие зоны не совпадают по форме и профилю с зонами максимальных механических воздействий, что существенно усложняет процесс адаптации поверхностей ЛТ к действующим на них эксплуатационным воздействиям.

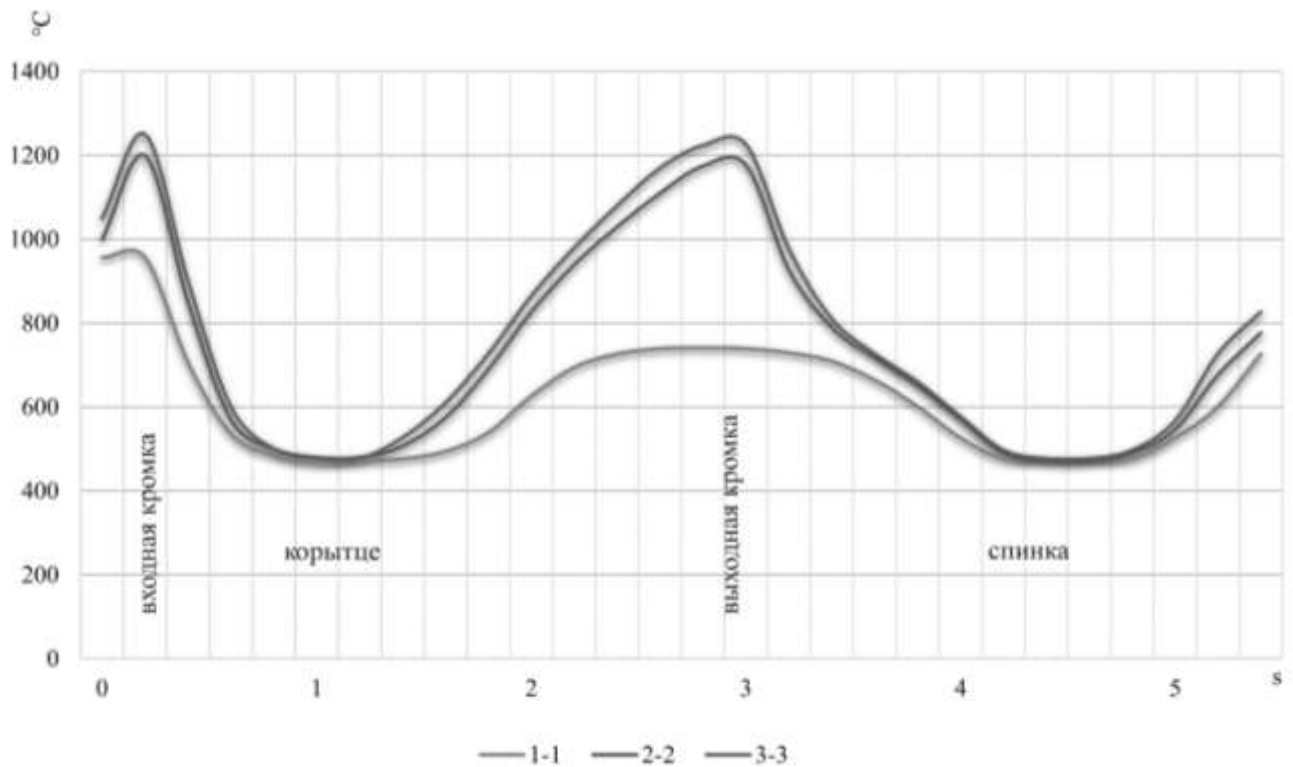


Рисунок 2.3 – График распределения температур по профилю ЛТ ГТД (график построен по данным исследования [174])

Ориентируясь на вышеизложенное, следует отметить, что для осуществления возможности эффективно равномерно оказывать сопротивление неравномерным эксплуатационным воздействиям — необходимо применение специальных функционально-ориентированных технологий и основанного на них принципе - принципе обеспечения эквивалентных свойств функциональных элементов.

2.2 Основные принципы формирования функционально-ориентированных свойств изделия

Ключевой особенностью функционально-ориентированных технологий является обязательная ориентация технологических воздействий в пространстве в зависимости от действия эксплуатационных функций во времени, пространстве, и потребности обеспечения необходимых свойств изделию. Основными признаками и особенностями функционально-ориентированных технологий является то, что технологические воздействия орудий обработки на изделия и процесс обеспечения заданных и требуемых свойств изделий выполняется на всех уровнях изделия, за счет реализации особых принципов ориентации [90]:

1. Функциональное соответствие особенностей действия элементарных функций в каждом функциональном элементе изделия, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств в данном функциональном элементе изделия на каждом уровне глубины технологии.

2. Топологическое соответствие геометрических параметров функционального элемента изделия, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зонального элемента реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на изделие и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств на каждом уровне глубины технологии.

3. Количественное соответствие множества функциональных элементов, в которых действует множество различных функций при эксплуатации, множествам реализации технологических воздействий и 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 или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе изделия на каждом уровне глубины технологии.

6. Структурное соответствие действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнение множества свойств в функциональных элементах изделия согласно условию 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.

8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом на каждом уровне глубины технологии.

В данном диссертационном исследовании применительно к лопатке турбины ГТД будут применяться только определенные принципы особой ориентации, а именно: принципы функционального, топологического и количественного соответствия функциональных элементов.

Рассмотрим более детально приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств изделия относительно лопатки турбины ГТД подвергающейся комплексному действию температурных и абразивных воздействий.

Следует отметить, что на основании первого принципа ориентации необходимо обеспечить заданные свойства функционального элемента в микро,

макрозоне и участке изделия, а именно, в рассматриваемом случае, их стойкость к температурным и абразивным воздействиям.

На базе второго принципа обеспечивается пространственное расположение необходимых свойств изделия в заданных функциональных зонах, а именно – обеспечение свойств температурной и абразивной стойкости в соответствующих функциональных зонах лопатки.

Третий принцип обеспечивает количественное соответствие технологических воздействий на соответствующие функциональные элементы, а именно величину слоя стойкого к температурным или абразивным воздействиям.

Применение указанных принципов позволяет решить вопрос полной ориентации технологических воздействий для получения необходимых свойств изделия, обусловленных особенностями его эксплуатации. Однако, следует учитывать, что применение всех указанных принципов должно быть рассчитано на всё изделие в целом, в то время как применительно к лопатке турбины, как отдельной детали, актуальным является применение только нескольких принципов особой ориентации.

Предложенный авторами в работе [91] принцип обеспечения кратного ресурса за счет увеличения межремонтного ресурса ГТД и количества восстановлений его элементов основанный на обеспечении ФОС на базе ФОТ является довольно перспективным, особенно в плане увеличения количества восстановлений его элементов.

2.3 Разработка общего принципа повышения производительности обработки ЛТ ГТД на базе ФОТ

Выполненный анализ особенностей разрушения лопаток показывает, что процесс разрушения их функциональных элементов происходит неравномерно, а нанесение защитных покрытий не позволяет в полной мере нивелировать

неравномерность износа. Следует отметить, что типовые технологические процессы изготовления не учитывают эти неравномерности износа, что, в свою очередь приводит к избыточной обработке ряда функциональных элементов (ФЭ) лопатки, которые в процессе эксплуатации подвергаются значительно меньшему износу и вероятности разрушения.

Таким образом, необходимой задачей становится повышение производительности при сохранении требуемых параметров качества обрабатываемых поверхностей, что в свою очередь обусловлено действующими эксплуатационными воздействиями. Достичь требуемого повышения производительности можно за счет применения специального инструмента и принципов функциональной ориентации, являющихся основой ФОТ.

Суть принципа заключается в анализе температурных и механических воздействий на функциональные элементы ЛТ ГТД и придание им требуемых свойств за счет применения специальных функционально-ориентированных технологий, таких как – специальные методы отделочно-упрочняющей обработки, а именно упрочнение поверхностного слоя методами ППД, с обеспечением возможности последующего нанесения специальных защитных покрытий или их комбинации, например, способом ионно-плазменного напыления, который является достаточно перспективным и технологичным и т.д.

К методам упрочнения поверхностного слоя относятся: раскатывающие методы чистовой обработки, вибрационные, пневмо- и гидродробеструйные, обкатка роликами, алмазное выглаживание, дорнование, а также другие методы чистовой обработки поверхности деталей. Применение таких методов позволяет достичь следующих характеристик: устранение неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений, наведенных при механической обработке, создание благоприятного микрорельефа поверхности при сохранении или уменьшении параметров шероховатости поверхности, стабилизацию степени наклепа и т.д. [23, 65, 66, 80, 98, 156, 169].

При этом, ряд методов ППД, в силу их технологических особенностей, имеет определенные ограничения на применение.

Суть метода ионно-плазменного напыления заключается в нанесении покрытий из плазмы электродугового разряда интегрально холодным катодом, при котором между анодом и катодом (из наносимого материала) возбуждается разряд, протекающий в продуктах эрозии катода.

При нанесении покрытий данным методом также можно проводить предварительную ионную очистку поверхности путем ионной бомбардировки ускоренными ионами распыленного вещества, что повышает уровень адгезии покрытия с материалом поверхности лопатки (подложки).

В данной работе предлагается повышение производительности, за счет обеспечения минимально необходимого качества обработки функциональных элементов в соответствии с температурными и механическими воздействиями на перо лопатки путем совершенствования методов отделочной и упрочняющей обработки.

Если рассматривать профиль пера лопатки, как множество функциональных элементов, то в простейшем приближении (рисунок 1.4) можно выделить 4 основных элемента: входная кромка, спинка, выходная кромка и корытце. Обозначим требуемое качество этих поверхностей как K_1, K_2, K_3, K_4 соответственно. В таком случае, производительность обработки можно представить в виде зависимости:

$$A = \frac{Q}{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)}, \left[\frac{\text{шт}}{\text{час}} \right] \quad (2.1)$$

где, A – производительность обработки профиля пера лопатки; Q – количество обрабатываемых лопаток, шт.; t_1, t_2, t_3, t_4 – время обработки каждого из основных элементов – входной кромки, спинки, выходной кромки и корытца соответственно.

Следует учитывать, что в типовом технологическом процессе к качеству обрабатываемых поверхностей профиля пера лопатки выдвигаются общие требования, а как известно из проведенного анализа неравномерности воздействия

эксплуатационных функций и анализа разрушений – все функциональные элементы профиля лопатки в процессе эксплуатации подвергаются различным воздействиям. Принципы, основанные на ФОТ, позволяют учитывать эти воздействия и повышать ресурс лопаток путем придания их элементам требуемых свойств. В результате обработки в соответствии с типовым технологическим процессом, качество всех элементов профиля будет равным:

$$K_1 = K_2 = K_3 = K_4, \quad (2.2)$$

При этом, если использовать результаты анализа при синтезе технологического процесса, основанного на принципах ФОТ, параметры качества каждого из функциональных элементов профиля пера должны быть различны. С учетом анализа их выхода из строя – это соотношение будет иметь вид:

$$K_{1_{\text{ФОТ}}} > K_{3_{\text{ФОТ}}} > K_{4_{\text{ФОТ}}} > K_{2_{\text{ФОТ}}}, \quad (2.3)$$

где, $K_{1_{\text{ФОТ}}}$, $K_{2_{\text{ФОТ}}}$, $K_{3_{\text{ФОТ}}}$, $K_{4_{\text{ФОТ}}}$ – требуемое качество входной кромки, спинки, выходной кромки и корытца профиля пера, исходя из принципов ФОТ.

Соответственно, при реализации технологического процесса, основанного на принципах ФОТ, качество каждого функционального элемента можно назначить не исходя из наиболее нагруженного и ответственного элемента, а в зависимости от эксплуатационных воздействий, которым он подвергается. Основываясь на анализе эксплуатационных воздействий, можно определить минимально необходимое качество поверхностей каждого элемента профиля лопатки с точки зрения сохранения заданного ресурса работы. Рассматриваемые технологии позволяют добиться повышения эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий, однако в данной работе рассматриваем только в контексте повышения производительности обработки. В таком случае, соотношение требуемого качества обработки поверхности каждого

функционального элемента при типовом и функционально-ориентированном технологическом процессе будет иметь вид:

$$K_1 \geq K_{1\text{ФОТ}}; K_2 \geq K_{2\text{ФОТ}}; K_3 \geq K_{3\text{ФОТ}}; K_4 \geq K_{4\text{ФОТ}}, \quad (2.4)$$

где, K_1, K_2, K_3, K_4 – требуемое качество входной кромки, спинки, выходной кромки и корытца профиля пера, при типовом ТП; $K_{1\text{ФОТ}}, K_{2\text{ФОТ}}, K_{3\text{ФОТ}}, K_{4\text{ФОТ}}$ – требуемое качество входной кромки, спинки, выходной кромки и корытца профиля пера, исходя из принципов ФОТ соответственно.

Следовательно, при обеспечении минимально необходимого качества каждого функционального элемента снижаются и затраты времени на его обработку. Тогда время обработки при реализации такого технологического процесса будет меньше, что при сохранении количества обрабатываемых деталей обеспечит повышение производительности без ухудшения качества обработки деталей:

$$A_{\text{ФОТ}} = \frac{Q}{(t_{1\text{ФОТ}} + t_{2\text{ФОТ}} + t_{3\text{ФОТ}} + t_{4\text{ФОТ}})}, \left[\frac{\text{шт}}{\text{час}} \right] \quad (2.5)$$

где, $t_{1\text{ФОТ}}, t_{2\text{ФОТ}}, t_{3\text{ФОТ}}, t_{4\text{ФОТ}}$ – время обработки при обеспечении минимально необходимого качества входной кромки, спинки, выходной кромки и корытца соответственно; $A_{\text{ФОТ}}$ – производительность функционально-ориентированного технологического процесса.

С учетом зависимостей (2.4) отношение производительности при реализации типового и функционально-ориентированного технологических процессов будет иметь вид:

$$A_{\text{ФОТ}} \geq A, \quad (2.6)$$

Для реализации предложенного принципа и обеспечения равенства (2.6) необходимо решение следующих задач:

1. Разделение ЛТ на функциональные элементы, части, зоны.
2. Анализ функциональных воздействий на ФЭ, части и зоны.
3. Определение требуемых свойств каждого ФЭ, части и зоны ЛТ ГТД.
4. Подбор требуемых воздействий для каждого ФЭ.
5. Синтез технологического процесса, учитывающего возможность реализации требуемых воздействий.

При этом, на всех этапах, согласно ФОТ и особым принципам ориентации, должна быть реализована обратная связь [90, 102].

2.4 Алгоритм повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины на базе функционально-ориентированного подхода

Применение функционально-ориентированных технологий, включающих в себя наличие итерационных связей между всеми элементами процесса, позволяет достичь требуемой или новой совокупности свойств изделия [90]. Наличие этих обратных связей позволяет решать все задачи как последовательно, так и на любом переходе. С другой стороны, управление этими свойствами позволяет конструировать технологические процессы не только с целью повышения эксплуатационных характеристик изделий, но и с целью повышения производительности их обработки, придавая им минимально необходимые функциональные воздействия в каждой точке.

Как отмечалось ранее, в процессе работы – лопатки ГТД подвергаются действию высоких температур и механических воздействий, вызывающих абразивный износ и развитие процессов горячей коррозии. При этом структура технологического процесса, направленного на повышение производительности

обработки лопаток путем обеспечения функционально-ориентированных свойств как по поверхности, так и по объему изделия должна учитывать комплексный характер эксплуатационных воздействий в целом, и воздействия всех элементов в частности. На основании этого, и особых принципов ориентации, разработан алгоритм, направленный на повышение производительности обработки лопаток за счет обеспечения минимально необходимого качества каждого функционального элемента.

Разработанный алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса, позволяющего обеспечить минимальное необходимое и достаточное качество всех функциональных элементов, представлен на рисунке 2.4. В этом случае технологический процесс состоит из следующих этапов:

1. Анализ исходных данных, таких как тип лопатки, её расположение (номер ступени), используемый материал, требуемая шероховатость и другие параметры.
2. Определение необходимости нанесения защитных покрытий.
3. Анализ конструктивных особенностей ЛТ ГТД.
4. В случае отсутствия необходимости нанесения специальных защитных покрытий – дальнейшее разделение на характерные зоны и функциональные элементы.
5. Выбор каждой i -ой функциональной зоны и последующий синтез специального функционально-ориентированного технологического обеспечения (ФОТО) для её обработки.
6. Непосредственно процесс обработки с применением ФОТО.
7. При необходимости нанесения защитных покрытий – подбор функционально-ориентированных покрытий на основе анализа конструктивных особенностей ЛТ ГТД.
8. Синтез специального ФОТО для подготовительных операций перед нанесением покрытий и окончательных после их нанесения.
9. Эксплуатация изделия с новыми, минимально необходимыми функциональными свойствами

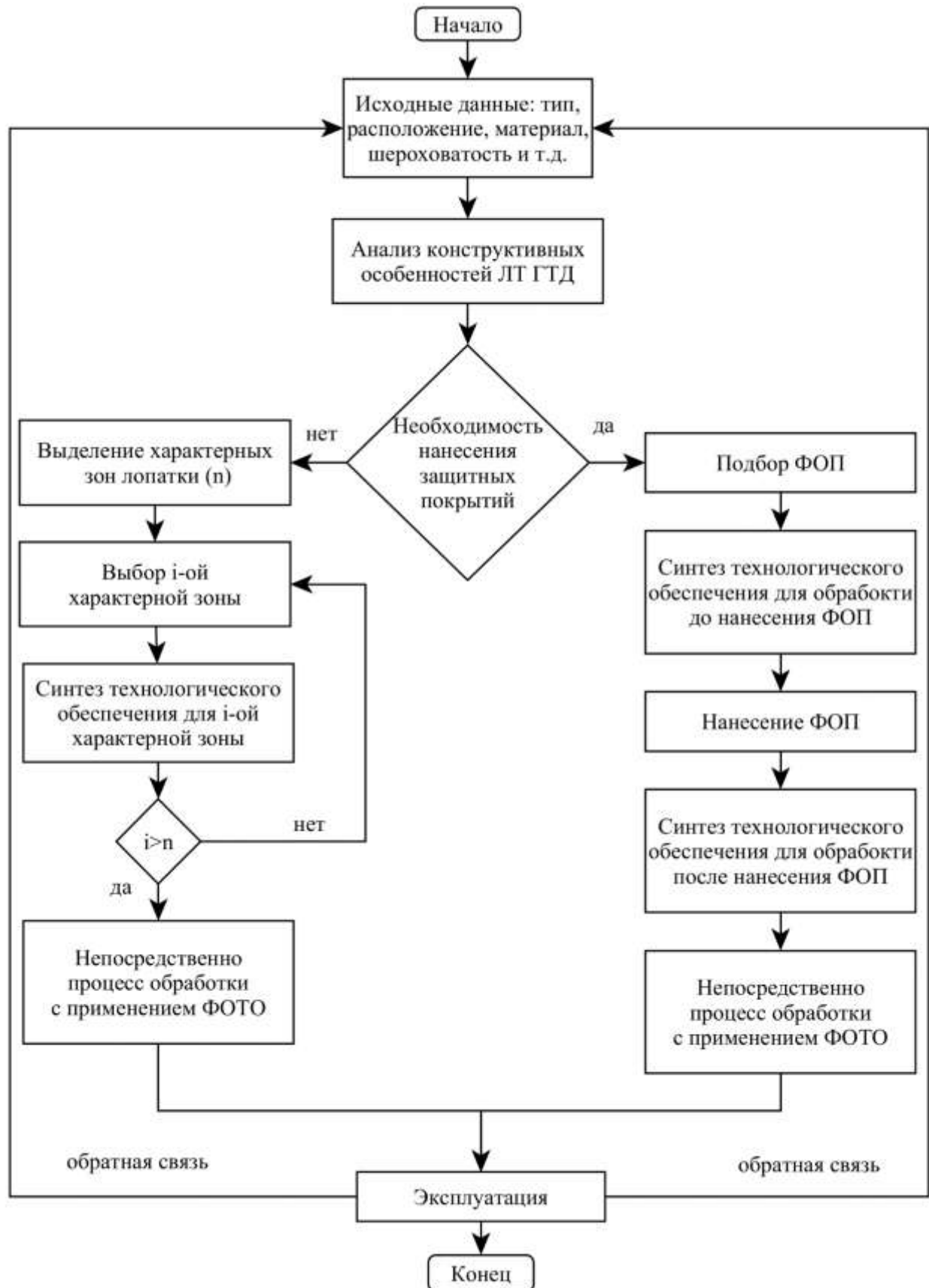


Рисунок 2.4 – Алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса

2.5 Структурная схема диссертационной работы

Представленная диссертационная работа содержит следующие основные этапы:

- анализ современного состояния вопроса исследования;
- разработка общего принципа повышения производительности обработки ЛТ ГТД на базе ФОТ;
- синтез развернутой структуры технологического;
- синтез вариантов технологического обеспечения ОУО ЛТ ГТД;
- экспериментальные исследования и разработка рекомендаций на их основе.

Для визуализации выполненного процесса исследований, проведенных в работе, составлена структурная схема, представленная на рисунке 2.5.

На основании проведенного анализа в представленной работе выявлен комплексный характер разрушения ЛТ ГТД, исследованы современные способы повышения качества поверхностей и существующие методы повышения производительности их обработки, а также предложен общий принцип повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки ЛТ ГТД путем обеспечения минимально необходимого и достаточного качества всех ФЭ. Для определения характеристик функциональных воздействий при обработке могут применяться теоретические модели контактного взаимодействия. Далее, на основании полученных данных разработана структура адаптированного технологического процесса обработки, которая может быть дополнена функционально-ориентированным технологическим обеспечением. Для совершенствования технологического обеспечения выделены и классифицированы граничные условия, на основе которых сформирована морфологическая матрица и граф их возможных вариантов. Разработанная структурная схема диссертационной работы (рисунок 2.5) позволяет определять и видеть взаимосвязи между

отдельными этапами исследования, решать вопросы функциональной ориентации и применения комбинированных методов обработки.

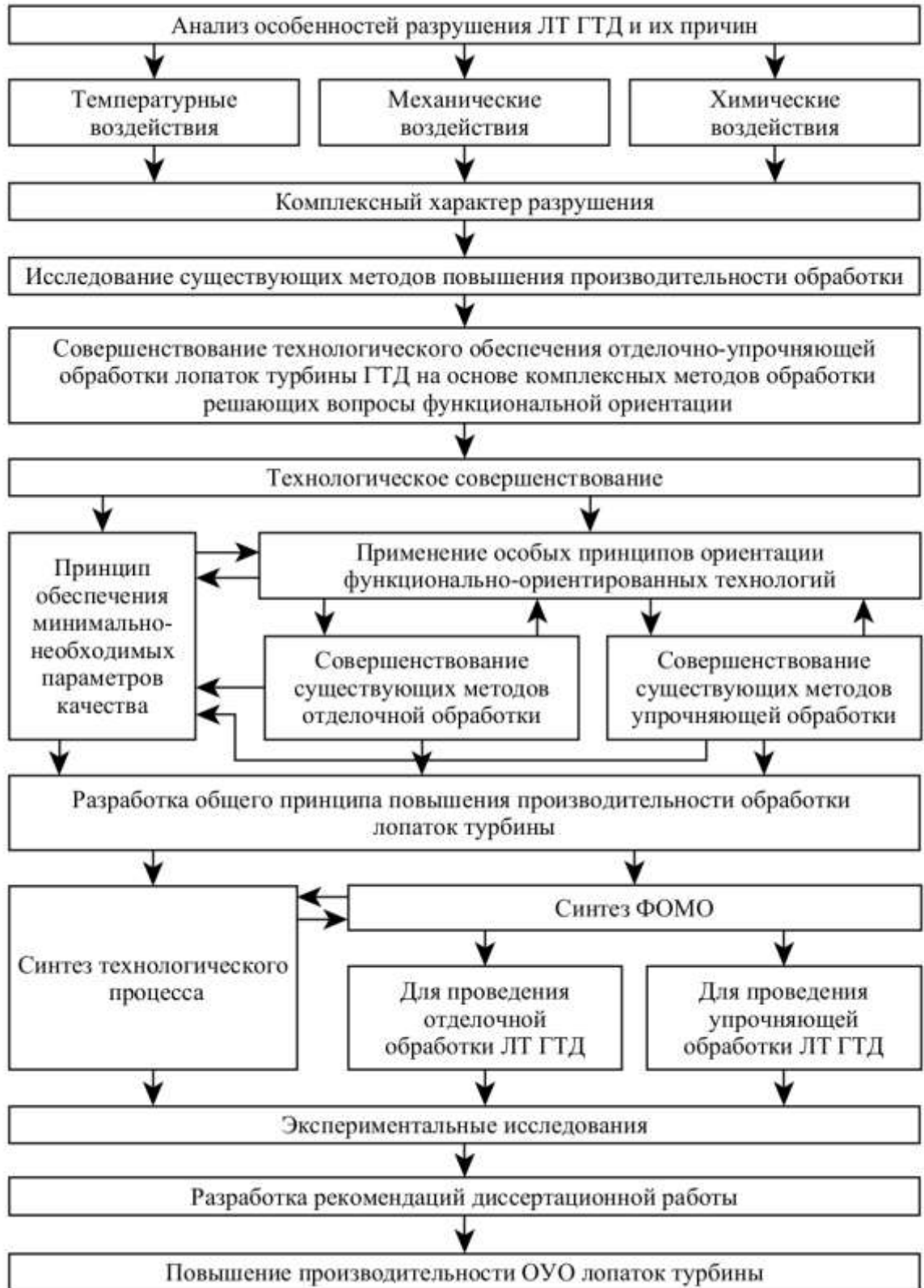


Рисунок 2.5 – Структурная схема диссертационной работы

2.6 Формирование системы критериев оценки эффективности ОУО

Для оценки особенностей комбинированной отделочно-упрочняющей обработки может быть применен метод весовых коэффициентов. Для решения задачи формируется матрица парных сравнений и рассчитываются весовые коэффициенты с учетом конкретных требующихся характеристик (критериев), что позволяет повышать эффективность обработки.

Для определения весовых коэффициентов методом парного сравнения были выбраны следующие критерии:

- k_1 изменение параметра шероховатости (ΔRa);
- k_2 величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$);
- k_3 глубина модифицированного слоя (h);
- k_4 изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV);
- k_5 величина отклонения профиля пера лопатки (Δf).

Для каждого критерия необходимо его сравнение с другими критериями. Для этого применяем шкалу метода анализа иерархий, предложенную Т. Саати для парных сравнений. Данная шкала относительной важности приоритетов включает количественные значения критериев в пределах от 1 до 9, состоящих из 5 основных уровней важности, и 4 промежуточных оценок между двумя соседними суждениями. Квадратную матрицу парного сравнения критериев можно представить в виде таблицы 2.1. и графа рисунок 2.6.

Таблица 2.1 – Квадратная матрица парного сравнения критериев

Критерий	(ΔRa)	($\sigma_{ост}$)	(h)	(ΔHV)	(Δf)
(ΔRa)	1	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}
($\sigma_{ост}$)	k_{21}	1	k_{23}	k_{24}	k_{25}
(h)	k_{31}	k_{32}	1	k_{34}	k_{35}
(ΔHV)	k_{41}	k_{42}	k_{43}	1	k_{45}
(Δf)	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	1

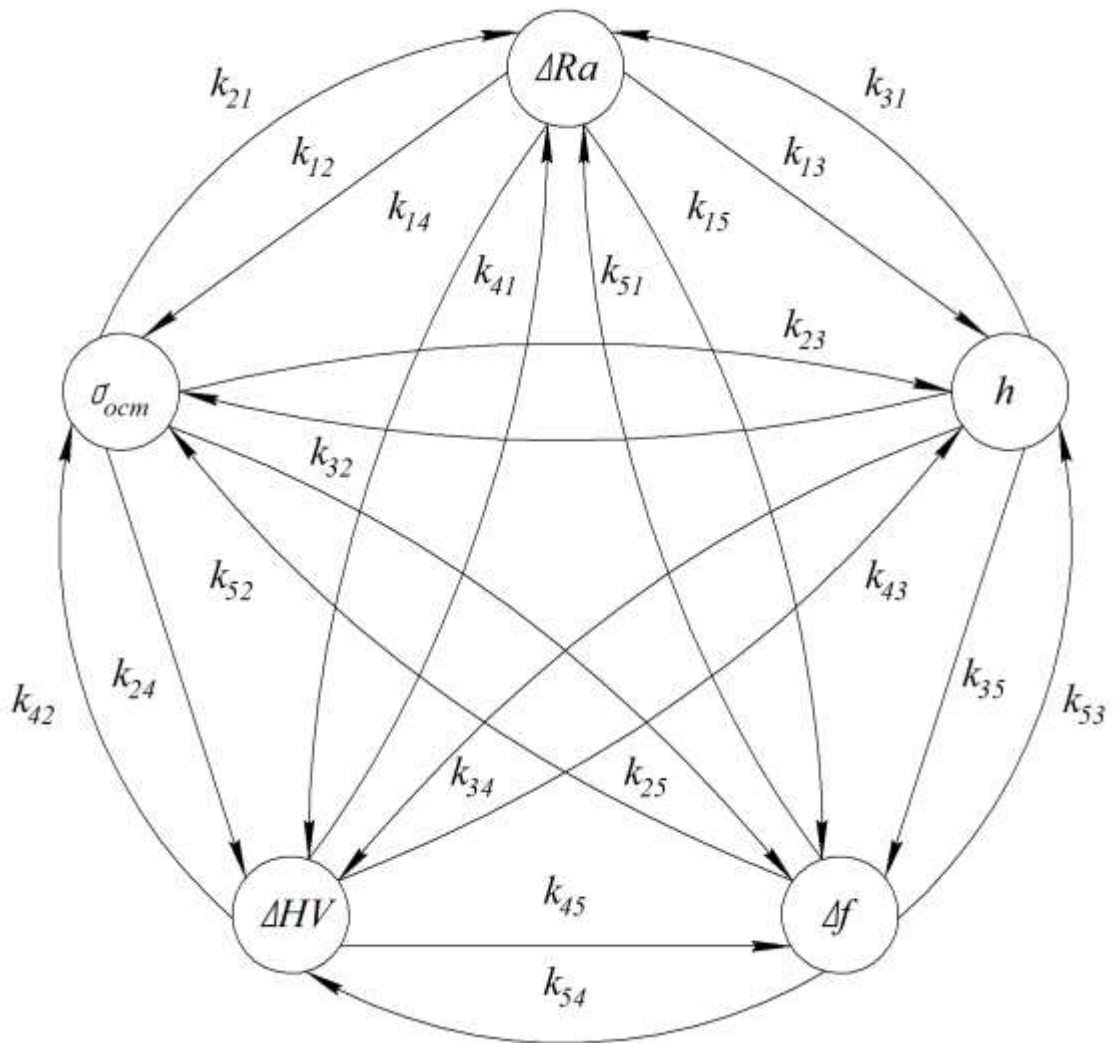


Рисунок 2.6 – Граф критериев парного сравнения

Расчет весовых коэффициентов методом парного сравнения ведём для двух случаев – зависимости параметров поверхностного слоя лопатки турбины ГТД от технологических воздействий, возникающих при полировании, и от воздействий, возникающих в процессе упрочнения методами поверхностно-пластического упрочнения.

Назначим сравнительные значения для выбранных критериев, основываясь на экспертных оценках [13, 22, 58, 73, 74, 87, 108, 136, 150]:

1. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$): ΔRa более важна, чем $\sigma_{ост}$ (оценка 7), обозначим как k_{12} .

2. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и глубина модифицированного слоя (h): ΔRa более важна, чем h (оценка 3), обозначим как k_{13} .

3. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): ΔRa более важна, чем Δf (оценка 5), обозначим как k_{15} .

4. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{\text{ост}}$) и глубина модифицированного слоя (h): $\sigma_{\text{ост}}$ одинаково важна, как и h (оценка 1), обозначим как k_{23} .

5. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{\text{ост}}$) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): $\sigma_{\text{ост}}$ одинаково важна, как и ΔHV (оценка 1), обозначим как k_{24} .

6. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{\text{ост}}$) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): $\sigma_{\text{ост}}$ более важна, чем Δf (оценка 3), обозначим как k_{25} .

7. Изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV) и изменение параметра шероховатости (ΔRa): ΔHV более важна, чем ΔRa (оценка 3), обозначим как k_{41} .

8. Изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV) и глубина модифицированного слоя (h): ΔHV более важна, чем h (оценка 4), обозначим как k_{43} .

9. Величина отклонения профиля пера лопатки (Δf) и глубина модифицированного слоя (h): Δf более важна, чем h (оценка 4), обозначим как k_{53} .

10. Величина отклонения профиля пера лопатки (Δf) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): Δf более важна, чем ΔHV (оценка 2), обозначим как k_{54} .

На основании этих сравнений строим матрицу парных сравнений критериев технологических воздействий при полировании (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Квадратная матрица парного сравнения критериев технологических воздействий при полировании

Критерий	(ΔRa)	$(\sigma_{\text{ост}})$	(h)	(ΔHV)	(Δf)
(ΔRa)	1	7	3	1/3	5
$(\sigma_{\text{ост}})$	1/7	1	1	1	3
(h)	1/3	1	1	1/4	1/4
(ΔHV)	3	1	4	1	1/2
(Δf)	1/5	1/3	4	2	1

Проводим подсчет уровней важности критериев k_i для каждого критерия:

$$k_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (2.7)$$

где $i = 1, \dots, n$.

$$k_1 = 1 + 7 + 3 + \frac{1}{3} + 5 = 16,33;$$

$$k_2 = \frac{1}{7} + 1 + 1 + 1 + 3 = 6,1;$$

$$k_3 = \frac{1}{3} + 1 + 1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = 2,83;$$

$$k_4 = 3 + 1 + 4 + 1 + \frac{1}{2} = 9,5;$$

$$k_5 = \frac{1}{5} + \frac{1}{3} + 4 + 2 + 1 = 7,53.$$

Определяем суммарный уровень важности всех рассмотренных критериев k_c

$$k_c = \sum_{i=1}^n k_i \quad (2.8)$$

$$k_c = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 16,33 + 6,14 + 2,83 + 9,5 + 7,53 = 42,33$$

Весовые коэффициенты a_i определим по формуле:

$$a_i = \frac{k_i}{k_c} \quad (2.9)$$

где $i = 1, \dots, n$.

$$a_1 = \frac{k_1}{k_c} = \frac{16,33}{42,33} = 0,3857;$$

$$a_2 = \frac{k_2}{k_c} = \frac{6,14}{42,33} = 0,1451;$$

$$a_3 = \frac{k_3}{k_c} = \frac{2,83}{42,33} = 0,0669;$$

$$a_4 = \frac{k_4}{k_c} = \frac{9,5}{42,33} = 0,2244;$$

$$a_5 = \frac{k_5}{k_c} = \frac{7,53}{42,33} = 0,1779.$$

Сумма всех полученных весовых коэффициентов должна равняться единице.

Проводим проверку

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (2.10)$$

$$a_i = 0,3857 + 0,1451 + 0,0669 + 0,2244 + 0,1779 = 1.$$

Для расчета весовых коэффициентов, возникающих в процессе упрочнения методами поверхностно-пластического упрочнения назначаем сравнительные значения для выбранных критериев, основываясь на экспертных оценках [52, 53, 55, 62, 66, 136, 140, 141, 150, 160]:

1. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{\text{ост}}$): ΔRa также важна, как и $\sigma_{\text{ост}}$ (оценка 1), обозначим как k_{12} .

2. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и глубина модифицированного слоя (h): ΔRa более важна, чем h (оценка 2), обозначим как k_{13} .

3. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): ΔRa более важна, чем ΔHV (оценка 3), обозначим как k_{14} .

4. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): ΔRa также важна, как и Δf (оценка 1), обозначим как k_{15} .

5. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{\text{ост}}$) и глубина модифицированного слоя (h): $\sigma_{\text{ост}}$ более важна, чем h (оценка 8), обозначим как k_{23} .

6. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{\text{ост}}$) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): $\sigma_{\text{ост}}$ более важна, чем ΔHV (оценка 8), обозначим как k_{24} .

7. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{\text{ост}}$) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): $\sigma_{\text{ост}}$ более важна, чем Δf (оценка 9), обозначим как k_{25} .

8. Глубина модифицированного слоя (h) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): h более важна, чем ΔHV (оценка 4), обозначим как k_{34} .

9. Глубина модифицированного слоя (h) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): h более важна, чем Δf (оценка 5), обозначим как k_{35} .

10. Изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): ΔHV более важна, чем Δf (оценка 3), обозначим как k_{55} .

На основании этих сравнений строим матрицу парных сравнений критериев технологических воздействий при упрочнении (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Квадратная матрица парного сравнения критериев технологических воздействий при упрочнении

Критерий	(ΔRa)	$(\sigma_{\text{ост}})$	(h)	(ΔHV)	(Δf)
(ΔRa)	1	1	2	3	1
$(\sigma_{\text{ост}})$	1	1	8	8	9
(h)	1/2	1/8	1	4	5
(ΔHV)	1/3	1/8	1/4	1	3
(Δf)	1	1/9	1/5	1/3	1

Подсчет уровней важности критериев по формуле (2.7):

$$k_1 = 1 + 1 + 2 + 3 + 1 = 8;$$

$$k_2 = 1 + 1 + 8 + 8 + 9 = 27;$$

$$k_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{8} + 1 + 4 + 5 = 10,63;$$

$$k_4 = \frac{1}{3} + \frac{1}{8} + \frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{3} = 4,71;$$

$$k_5 = 1 + \frac{1}{9} + \frac{1}{5} + \frac{1}{3} + 1 = 2,64.$$

Суммарный уровень важности всех рассмотренных критериев (2.8)

$$k_c = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 8 + 27 + 10,63 + 4,71 + 2,64 = 52,98$$

Весовые коэффициенты определяем по формуле (2.9):

$$a_1 = \frac{k_1}{k_c} = \frac{8}{52,98} = 0,1511;$$

$$a_2 = \frac{k_2}{k_c} = \frac{27}{52,98} = 0,5096;$$

$$a_3 = \frac{k_3}{k_c} = \frac{10,63}{52,98} = 0,2006;$$

$$a_4 = \frac{k_4}{k_c} = \frac{4,71}{52,98} = 0,0889;$$

$$a_5 = \frac{k_5}{k_c} = \frac{2,64}{52,98} = 0,0498.$$

Сумма всех полученных весовых коэффициентов должна равняться единице.
Проводим проверку

$$a_i = 0,1511 + 0,5096 + 0,2006 + 0,0889 + 0,0498 = 1.$$

После того, как получили показатели весовых коэффициентов, сводим их в таблицу 2.4 для сравнения и строим иерархическую схему, с учетом полученных весовых коэффициентов (рисунок 2.7).

Таблица 2.4 – Весовой коэффициент по преобладающему параметру

Критерий	Весовой коэффициент (технологические воздействия, возникающие при полировании)	Весовой коэффициент (технологические воздействия, возникающие при упрочнении)
Изменение параметров шероховатости (ΔRa)	0,3857	0,1511
Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$)	0,1451	0,5096
Глубина модифицированного слоя (h)	0,0669	0,2006
Изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV)	0,2244	0,0889
Величина отклонения профиля пера лопатки (Δf)	0,1779	0,0498

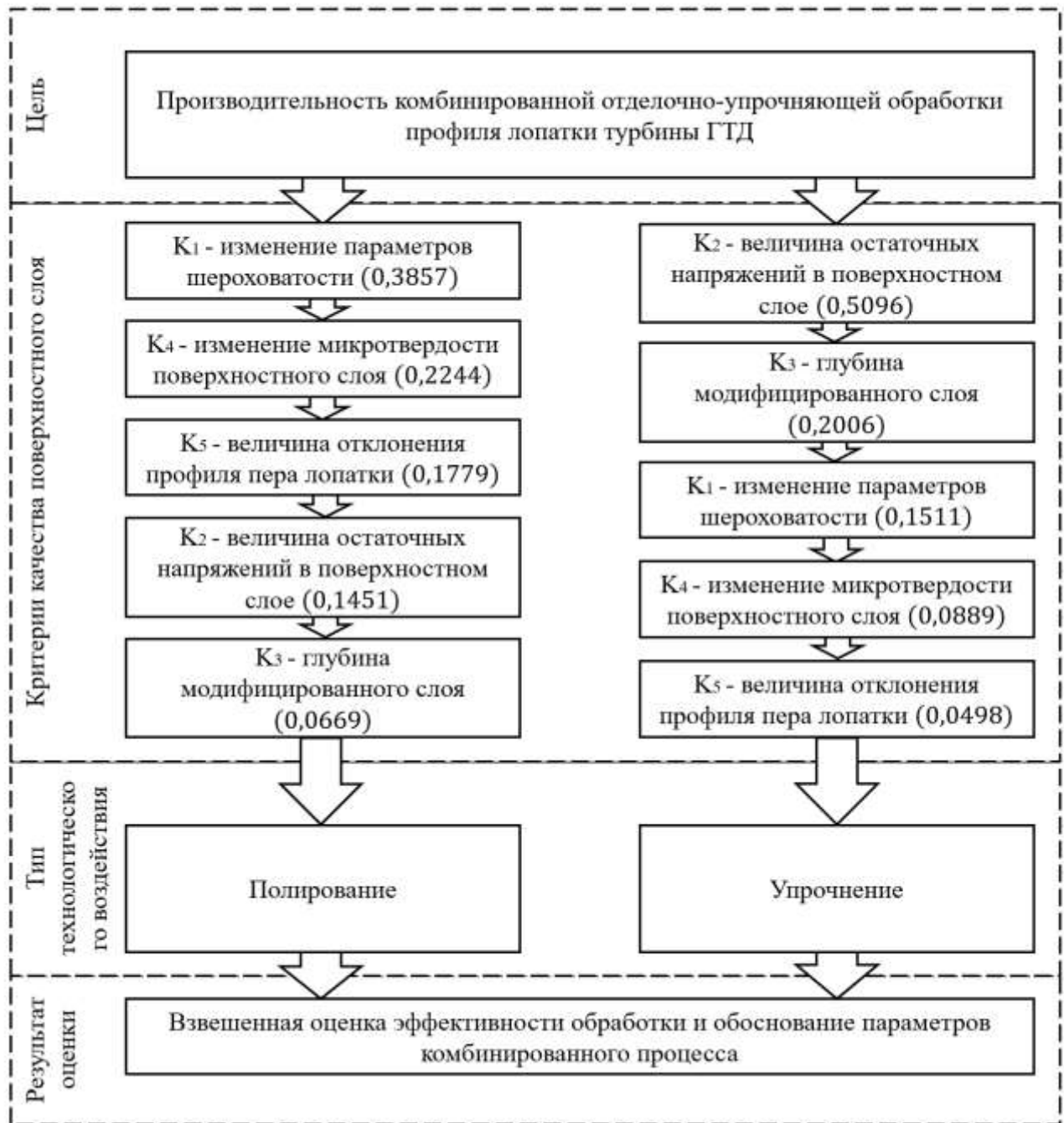


Рисунок 2.7 – Иерархическая схема с учётом весовых коэффициентов

Проведённый анализ показал, что применение метода парных сравнений на основе шкалы Т. Саати позволяет формализовать и количественно оценить различия в приоритетности критериев качества поверхностного слоя лопаток турбины ГТД в зависимости от характера технологических воздействий – полирования и упрочняющей обработки методами поверхностно-пластического деформирования.

Установлено, что при полировании доминирующее значение имеет критерий изменения параметра шероховатости поверхности, весовой коэффициент которого составляет 0,3857. Это свидетельствует о том, что полирование в первую очередь ориентировано на формирование благоприятной микрогеометрии поверхности и снижение концентрации напряжений, тогда как упрочняющий эффект выражен вторично. Существенную роль также играют изменение микротвёрдости поверхностного слоя (весовой коэффициент 0,2244) и величина отклонения профиля пера лопатки (весовой коэффициент 0,1779), что указывает на необходимость поиска компромисса между качеством поверхности и сохранением геометрической точности тонкостенного профиля. В то же время глубина модифицированного слоя при полировании характеризуется минимальной значимостью (весовой коэффициент 0,0669), что подтверждает ограниченность влияния данного процесса на объёмное упрочнение материала.

В отличие от этого, при упрочняющей обработке методами поверхностно-пластического деформирования определяющим критерием является величина остаточных напряжений в поверхностном слое, весовой коэффициент которой достигает 0,5096. Данный результат отражает ключевую функциональную роль ППД в формировании сжимающих остаточных напряжений, непосредственно влияющих на усталостную прочность и ресурс лопаток турбины. Существенную значимость также имеет глубина модифицированного слоя (весовой коэффициент 0,2006), что указывает на важность обеспечения достаточной толщины упрочнённой зоны для стабильности эксплуатационных свойств. При этом изменение микротвёрдости поверхностного слоя (весовой коэффициент 0,0889) и величина отклонения профиля пера (весовой коэффициент 0,0498) выступают как вторичные критерии и технологические ограничения, а не как целевые показатели процесса.

Сопоставление полученных весовых коэффициентов для двух видов технологических воздействий наглядно демонстрирует принципиальное различие физической сущности полирования и ППД. Полирование ориентировано преимущественно на качество поверхности и точность профиля, тогда как ППД –

на формирование упрочнённого поверхностного слоя с заданным напряжённо-деформированным состоянием. Это подтверждает целесообразность отдельного определения весовых коэффициентов критериев для данных процессов и обосновывает необходимость их комбинированного применения при обработке профиля лопаток турбины ГТД.

Таким образом, использование метода парных сравнений позволяет не только количественно оценить приоритетность критериев, но и служит инструментом обоснования рациональной последовательности и параметров комбинированной отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающей требуемое сочетание эксплуатационных и геометрических характеристик лопаток турбины.

Полученные весовые коэффициенты позволяют целенаправленно выбирать и комбинировать параметры полирования и ППД в зависимости от приоритетных требований к поверхностному слою лопаток турбины ГТД. Это обеспечивает повышение эффективности комбинированной обработки при сохранении геометрической точности профиля.

2.7 Выводы

В представленном разделе работы получены следующие результаты:

1. На основании анализа ряда работ ведущих отечественных и зарубежных ученых установлено, что в процессе работы лопатки турбины подвергаются воздействию высоких температур, а также высоким статическим и циклическим нагрузкам. Так, основными видами повреждений являются коррозионные повреждения профильной части под действием высокотемпературного газового потока, и абразивный износ по входной и выходной кромкам, под действием статических, циклических и центробежных нагрузок.

2. На основе результатов сопоставительного анализа распределения температурных воздействий и локализации механических повреждений было установлено, что эти зоны не одинаковы, что существенно усложняет процесс адаптации поверхностей ЛТ к действующим на них эксплуатационным воздействиям.

3. Для решения вопроса ориентации технологических воздействий, с целью получения необходимых свойств изделия были определены принципы функционального, топологического и количественного соответствия функциональных элементов.

4. На основе функционально-ориентированных технологий разработан общий принцип повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки ЛТ ГТД путем обеспечения минимально необходимого и достаточного качества всех функциональных элементов.

5. Составлена структурная схема диссертационной работы, связывающая основные этапы выполнения исследования, обеспечивающая её единство и целостность.

6. Сформирована система критериев оценки эффективности ОУО на основании метода анализа иерархий.

РАЗДЕЛ 3 СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

3.1 Общие положения и принципы повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины

Как было отмечено ранее, ЛТ подвергаются следующим основным действующим эксплуатационным функциям, приводящим к разрушению – действию высокой температуры газового потока, статических и циклических нагрузок, а также действию процессов газовой коррозии (рисунок 3.1).

На этапе обработки ЛТ осуществляется последовательное повышение точности параметров каждого этапа обработки, и достигаются необходимые характеристики материала и поверхностей лопатки. При этом, на этапе механической обработки достигается обеспечение и соблюдение требуемых показателей качества. Особое значение имеет отделочно-упрочняющая обработка, так как позволяет, при минимальном отличии от базового технологического процесса – значительно повысить эксплуатационные характеристики, такие как ресурс и т.д. [86, 88, 89].

Лопатки турбин ГТД имеют широкую номенклатуру применяемых материалов, конструктивных исполнений и особенностей, как в пределах различных ступеней турбины одного двигателя, так и в целом, с учетом широкого спектра существующих ГТД.

При обработке лопаток турбин наиболее широко используются методы механической обработки и основанные на них комбинированные методы обработки. Благодаря современным высокоточным методам получения заготовок, например для лопаток статора турбины, заготовки изготавливают литые без

припуска по перу, что сводит механическую обработку к обработке поверхностей хвостовиков [7].



Рисунок 3.1 – Основные эксплуатационные воздействия, приводящие к выходу из строя лопаток турбины ГТД

Операции отделочно-упрочняющей обработки, могут включать в себя: черновое и чистовое шлифование, полирование, гляцевание, ультразвуковое упрочнение шариками, дробеструйную обработку, нанесение покрытий различными методами, термическую обработку. Точный состав и количество операций определяется в зависимости от типа и характеристик конкретной ЛТ, и выдвигаемых к ней эксплуатационных требований.

В данной части исследования будет рассматриваться структурно-технологический синтез процессов повышения производительности ОУО лопаток турбины [13].

3.2 Анализ традиционной структуры технологических операций отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины

Особенности технологических операций отделочной обработки лопаток турбин обусловлены их сложной пространственной формой, которая в отличие от классических форм поверхностей имеет менее четкие границы фасонных поверхностей.

Согласно классификации фасонных поверхностей профессора А.П. Бабичева [13], лопатки турбины относятся к III классу фасонных поверхностей, а именно – пространственных фасонных поверхностей. Это во многом определяет особенности технологических операций отделочной обработки. В то время, как для черновой и чистовой обработки могут использоваться копировальные станки и станки с ЧПУ, наиболее распространенными отделочными операциями для такого типа поверхностей являются слесарно-механические.

Надежность работы рабочих лопаток турбины зависит не только от их конструктивной прочности, сопротивления циклическим и длительным статическим нагрузкам, но и от технологии их изготовления, которая непосредственно влияет на качество поверхностного слоя хвостовика и пера лопаток [7, 162]. Это связано с тем, что в поверхностном слое образуются конструктивные и технологические концентраторы напряжений, он испытывает влияние наклепа и внутренних остаточных напряжений при механической обработке, а также под воздействием внешних нагрузок. В связи с этим, процессы повышения производительности обработки не должны приводить к ухудшению качества обрабатываемых поверхностей.

Все основные параметры элементов лопаток турбин стандартизированы, так конструкция соединения лопатки с диском путем «елочного» замка регламентируется ОСТ 1.10975-81 «Соединение лопаток с дисками елочного типа газотурбинных двигателей. Конструкция и размеры», а точность изготовления пера – ОСТ 1.02571-86 «Лопатки компрессора и турбин. Предельные отклонения

размеров, формы и расположения пера». Согласно стандарту [2], лопатки турбины делятся на 4 размерные группы, характеризующихся длиной пера и хорды профиля пера, приведенных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Размерные группы лопаток турбины

№ п/п	Диапазон значений			
	длина хорды профиля пера		длина пера	
	св, мм	до, мм	св, мм	до, мм
1	-	25	-	100
2	25	60	100	240
3	60	100	240	360
4	100	160	-	400

Размерная группа лопаток, в свою очередь выступает в качестве граничных условий при выборе технологических операций отделочной обработки. При этом, как указывалось ранее, требуемые технологически воздействия должны быть ориентированы согласно действующим эксплуатационным функциям, что является одним из требований функционально-ориентированных технологий [90, 149].

Наиболее важным элементом технологического процесса изготовления лопаток является изготовление базовых поверхностей под дальнейшую механическую обработку и распределение припусков на полке, корытце и замковой части.

Окончательная обработка профиля пера лопатки будет заключаться в последовательности операций отделочной и упрочняющей обработки, выполняемых с учетом неравномерности действующих эксплуатационных функций.

Основываясь на вышесказанном, структура операций отделочной обработки может быть представлена в виде алгоритма, представленного на рисунке 3.2.

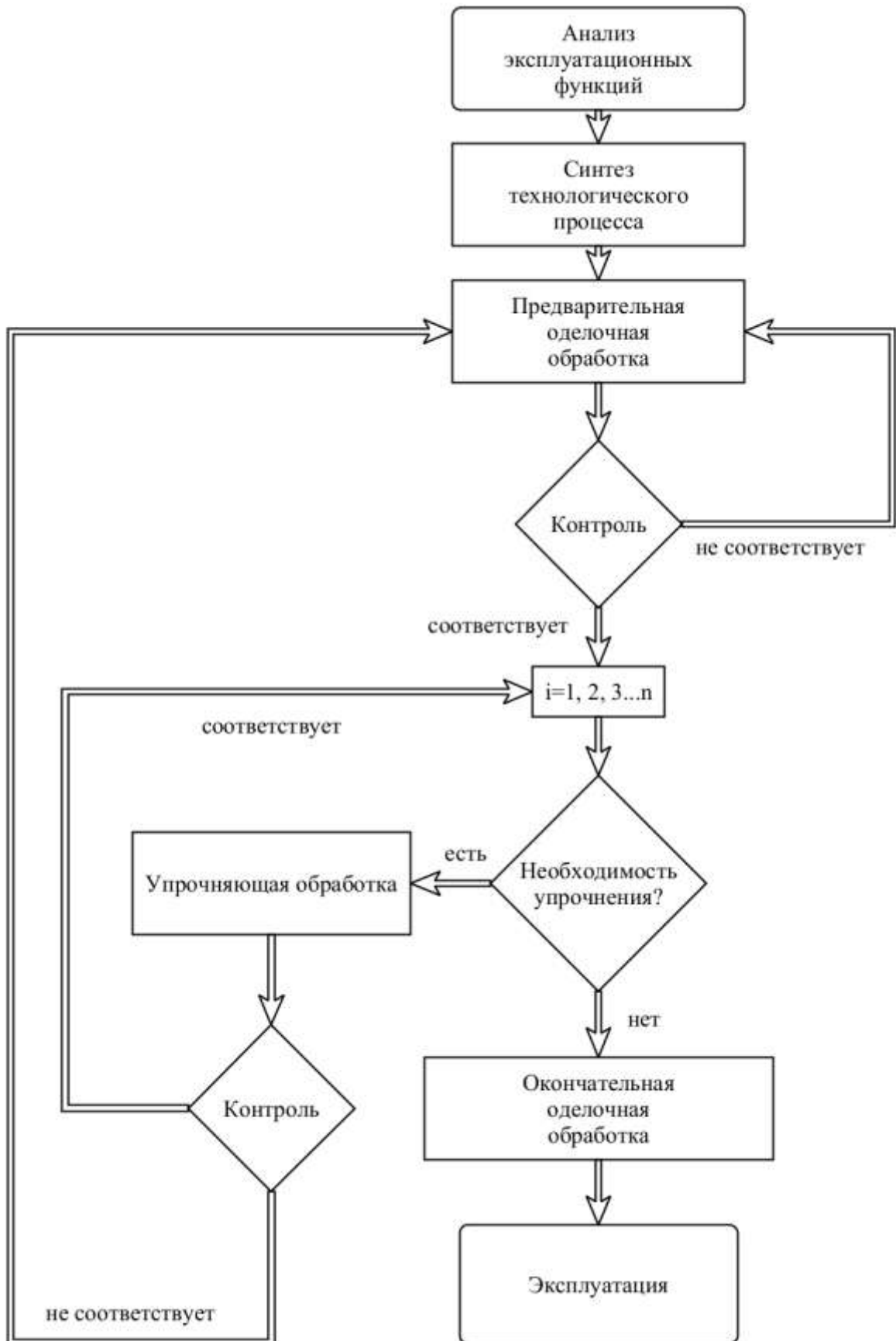


Рисунок 3.2 – Структура операций отделочной обработки

Представленная на рисунке 3.2 структура операций отделочной обработки включает в себя:

1. Анализ исходных данных, таких как требования, предъявляемые к детали согласно конструкторской документации, результаты обследований деталей, отработавших свой нормативный срок эксплуатации, анализ вышедших из строя деталей в результате аварийных ситуаций и выделение характерных типов и причин поломок.

2. Процесс адаптации типового технологического процесса отделочной обработки, с учетом особенностей эксплуатации и характерных зон, нуждающихся в особых функциональных воздействиях для каждой i -ой зоны.

3. Непосредственно процесс предварительной отделочной обработки i -ой зоны, согласно адаптированному технологическому процессу.

4. Контроль полученных параметров i -ой зоны, сравнение их с требуемыми, полученными на первом этапе, и принятие решения о дальнейшей необходимости упрочнения.

5. В случае, если для i -ой зоны необходима упрочняющая обработка, то следует проведение требуемой обработки (параметры которой определяются исходя из требуемых характеристик, полученных на втором этапе), и контроль полученных результатов, после чего принимается решение – о проведении окончательной отделочной обработки, или же повторной предварительной отделочной обработки, в случае, если параметры i -ой зоны после упрочняющей обработки не соответствуют требуемым. В случае, если для i -ой зоны не требуется упрочняющая обработка, осуществляется переход к окончательной (финишной) отделочной обработке.

6. Завершающим этапом является эксплуатация изделия, и сбор информации для более точного и детального процесса адаптации технологического процесса обработки последующих ЛТ.

3.3 Определение универсальной структуры технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки

Любой технологический процесс включает в себя определенное множество операций, являющихся законченной частью этого процесса и выполняемых в процессе преобразования изделия. Так, основываясь на базовых принципах проектирования функционально-ориентированных технологий [90], любая операция технологического процесса будет являться результатом преобразования под действием потоков технологических воздействий (ТВ), включающих потоки материального (М), энергетического (Е) и информационного (І) типов. Модель таких преобразований представлена на рисунке 3.3. Реализация необходимых свойств детали или изделия реализуется именно за счет ТВ.

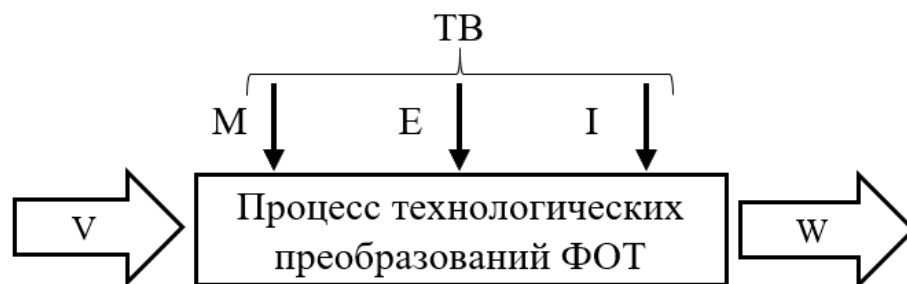


Рисунок 3.3 – Модель технологических преобразований входных потоков V (заготовки) в выходные потоки W (детали) в процессе выполнения технологических воздействий ТВ (орудий и средств обработки) потоков материи М, энергии Е и информации І в ФОТ [90]

Основываясь на рассмотренной ранее модели (рисунок 3.3) и классификации методов ОУО модель процесса под действием технологических воздействий можно представить в виде модели, представленной на рисунке 3.4.

При этом, для каждого класса методов ОУО, будут характерны свои технологические воздействия потоков материи, энергии и информации.

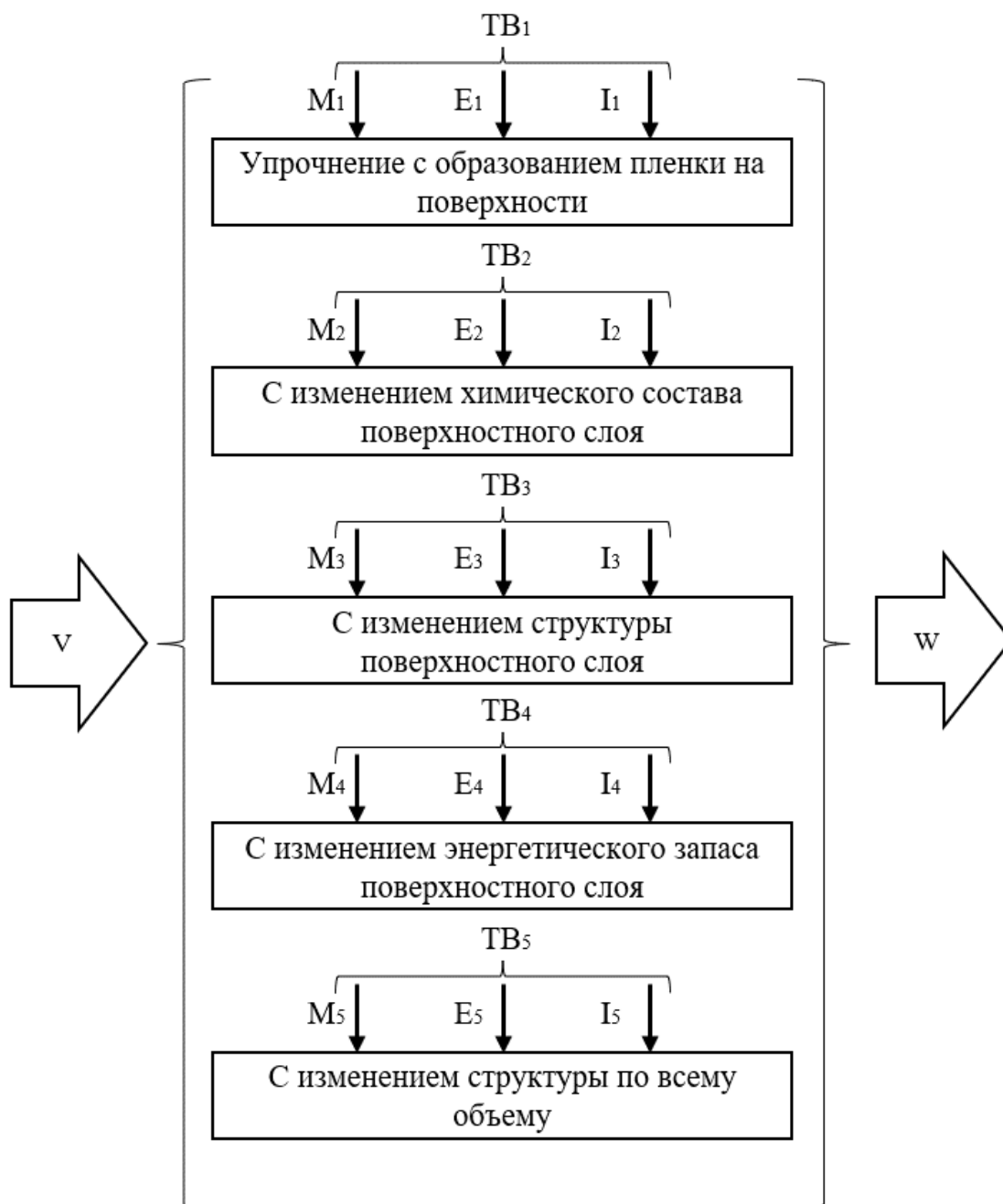


Рисунок 3.4 – Модель технологических преобразований входных потоков V в выходные потоки W в процессе выполнения процесса ОУО

Для класса методов, характеризующихся изменением структуры поверхностного слоя, данная модель примет новый вид (рисунок 3.5) [168] и будет включать в себя следующие виды обработки: физико-термическую, электрофизическую, механическую, а также наплавку.

На основании всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

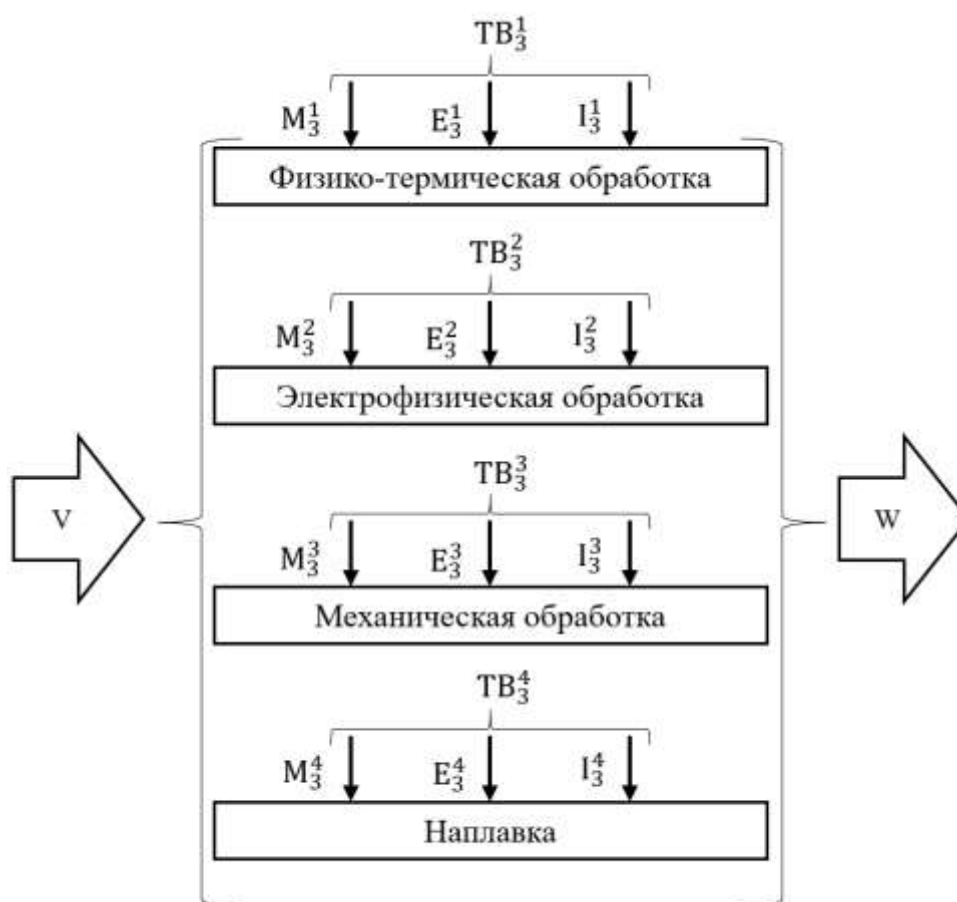


Рисунок 3.5 – Модель процесса ОУО, характеризующегося изменением структуры поверхностного слоя, под действием ТВ

1. Каждая операция технологического процесса является результатом целенаправленного воздействия потоков материи, энергии и информации, обеспечивающих формирование требуемых эксплуатационных свойств детали.
2. Характер и структура технологических воздействий зависят от класса применяемых методов отделочно-упрочняющей обработки.
3. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения функционально-ориентированного подхода к формированию параметров качества поверхности, предусматривающего задание и обеспечение дифференцированных уровней шероховатости в зависимости от назначения и условий работы отдельных зон профиля пера лопатки.

3.4 Разработка метода учета непостоянства технологических воздействий при отделочно-упрочняющей обработке лопаток турбины

Полирование является завершающим этапом обработки ЛТ ГТД. Лопатки характеризуются сложной пространственной формой пера, шероховатость которого должна находиться в пределах $Ra=0,32...0,8$ мкм, а допуск на сложный фасонный профиль в пределах $0,01...0,05$ мм [108]. Отклонение геометрических форм, размеров и параметров качества поверхности профиля пера лопатки от расчетных ухудшает рабочие характеристики двигателя, приводит к потере мощности, уменьшению КПД и снижению экономичности двигателя [73]. Все эти факторы в целом существенно затрудняют автоматизированную обработку, в следствие чего процессы отделочной обработки лопаток как у нас в стране, так и за рубежом, носят преимущественно ручной характер [73, 75, 108, 148]. Одним из активно применяемых способов отделочной обработки является полирование на полировальных бабках, с применением в качестве инструмента специальных войлочных кругов с накатанными на профиль абразивными зёрнами, или микропорошков [73, 190]. Эти процессы разделяют на такие переходы как предварительное и окончательное полирование, а также гляцевание [74].

Соблюдение постоянства режимов обработки зависит от уровня квалификации рабочего, т.к. такие параметры как усилие прижима, длительность полирования в каждой точке поверхности, угол касания и т.д. могут быть непостоянны на различных участках профиля [74, 100]. Это приводит к непостоянным технологическим воздействиям в процессе обработки, вследствие чего определенные участки готового изделия имеют локальные зоны, характеризующиеся более низким качеством обработанной поверхности, либо же процесс обработки существенно увеличивается из-за применения нерациональных режимов резания. С учетом и без того очень сложных условий эксплуатации, которым подвергаются лопатки турбины в процессе работы, таким как переменные нагрузки, действие высокотемпературного газового потока, содержащего

мельчайшие твердые частицы, наличие дополнительных вышеупомянутых участков может приводить к ускоренному выходу из строя.

Процесс полирования лопаток турбин в большей степени выполняется в ручном режиме, что обусловлено их сложной пространственной формой и особенностями технологии. При этом, в процессе полирования задействован различный инструмент и схемы обработки, такие как: полирование кругами различных профилей, полирование лентами и т.д. В данной работе рассматриваем только полирование кругами, при котором можно выделить три основные схемы обработки, которые охватывают основные типоразмеры лопаток – представленные в таблице 3.1.

При полировании спинки пера активно применяются круги прямого профиля, позволяющие обрабатывать большую площадь поверхности, при этом радиус инструмента превышает радиус обрабатываемой лопатки $R_{\text{п}} > R_{\text{л}}$ (рисунок 3.6, а); при обработке корытца пера лопаток последних ступеней турбины или свободной турбины возможно применение круга, радиус которого меньше чем радиус обрабатываемой лопатки $R_{\text{п}} < R_{\text{л}}$ (рисунок 3.6, б), а в случае обработки корытца пера лопаток кругом, радиус скругления которого меньше чем обрабатываемый радиус, обработку ведут фасонным полировальным кругом $R_{\text{п}} < R_{\text{л}}$ (рисунок 3.6, в) [23, 158]. Следует учитывать переменный характер профиля пера лопатки, характеризующийся существенным изменением режимов обработки по длине профиля пера.

Например, если рассматривать одно сечение профиля пера, то величина радиуса спинки может быть в 10...50 раз больше радиуса входной кромки, что в свою очередь окажет непосредственное влияние на величину пятна контакта, а следовательно, и на удельное давление при обработке. Результатом этого является изменение контактных напряжений в зоне обработки. Для определения которых необходимо знать сущность происходящего процесса обработки в каждой точке профиля, который имеет сложную пространственную геометрию на всей длине пера лопатки.

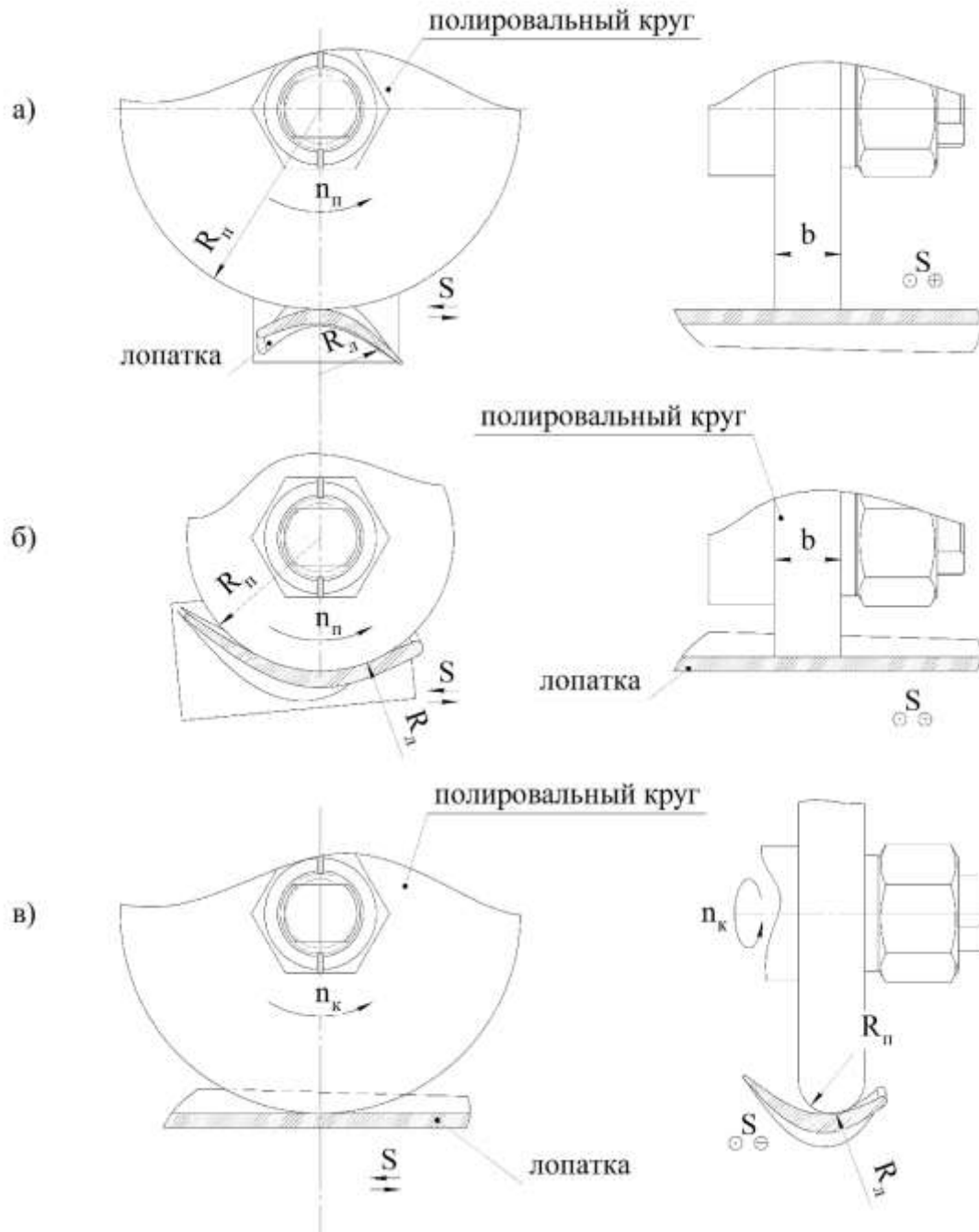


Рисунок 3.6 – Основные схемы окончательной обработки элементов пера лопатки:

а) обработка поверхности спинки лопатки; б) обработка корытца кругом, превышающим радиус обрабатываемой лопатки; в) обработка корытца кругом, радиус которого меньше обрабатываемого радиуса корытца

Решение данной проблемы требует понимания механизма протекающего процесса, для чего необходимо знать условия контакта (рисунок 3.7).

Как видно из схем обработки, представленных на рисунке 3.6 – при обработке параметры как инструмента, так и обрабатываемой заготовки варьируются в широких пределах, что должно быть обязательно учтено при определении параметров в зоне обработки, что непосредственно отразится на изменении пятна контакта при обработке, а следовательно, и на контактных напряжениях.

Таким образом, можно выделить следующие особенности, возникающие при обработке профиля ЛТ ГТД:

1. Обработка корыта и спинки лопатки проходит в различных условиях, так как поверхность корыта выступает в роли лимитирующего фактора, ограничивающего радиус инструмента, и определяющего схему обработки.

2. Сложный криволинейный профиль лопатки турбины характеризует неравномерность режимов обработки как по разным конструктивным элементам профиля (спинке, корыту, входной и выходной кромкам), так и по различным сечениям пера в целом.

3. Изменяющиеся при обработке условия контакта инструмента и пера лопатки характеризуются переменными пятном контакта и удельными усилиями прижатия.

Всё вышеперечисленные особенности приводят к тому, что на поверхности профиля могут образовываться участки, характеризующиеся более низким качеством обработанной поверхности, либо же со следами прижогов и полировальных дефектов, что приведет к ухудшению свойств готового изделия.

Для решения поставленной задачи применима задача о контактных напряжениях Герца. Следует отметить, что распределение контактной нагрузки по Герцу описано в справочной литературе и для основных схем выведены формулы расчета [100], полученные при следующих допущениях:

1. Напряжения в зоне контакта не превышают предела упругости;
2. Площадки контакта малы, по сравнению с поверхностями соприкасающихся тел;
3. Силы давления, распределенные по поверхности контакта, нормальны к этой поверхности [19, 127].

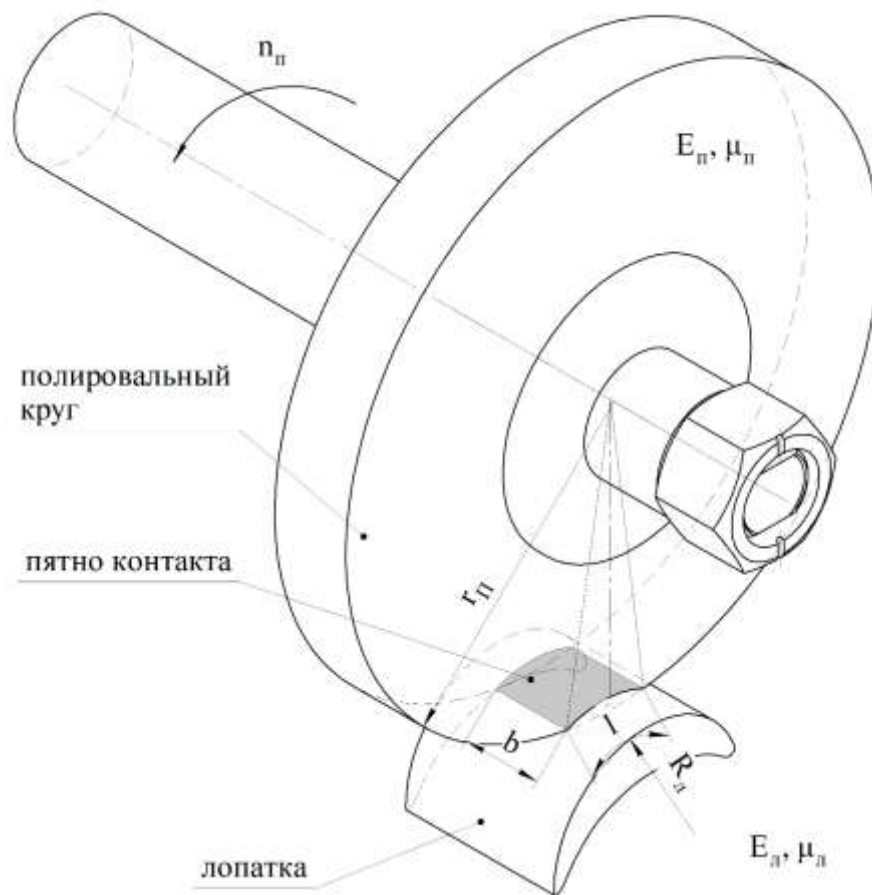


Рисунок 3.7 – Параметры процесса полирования в зоне резания

Параметры процесса полирования профиля лопатки представлены на рисунке 3.7, где E_n, E_l – модуль упругости материала полировального круга и лопатки соответственно, μ_n, μ_l – соответствующие коэффициенты Пуассона, R_n – радиус полировального круга, R_l – радиус профиля лопатки в рассматриваемый момент контакта. Процесс полирования ЛТ ГТД можно рассматривать как случай взаимного сжатия равномерно распределенной нагрузки q двух цилиндров, соприкасающихся параллельными образующими (рисунок 3.8). При этом, под действием нагрузки произойдет деформация профилей в зоне контакта полировального круга и профиля лопатки, которая приведет к увеличению параметров контактной площадки [127].

Для расчетной схемы, представленной на рисунке 3.6, а, состоящей из различных материалов лопатки и полировального круга, величину полуширины контактной площадки b можно определить по формуле [127]:

$$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_{\text{л}} R_{\text{п}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{п}}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}} \right)}, \quad (3.1)$$

Максимальное напряжение в зоне контакта будет равно [127]:

$$q_{\text{max}} = 0,5642 \sqrt{\frac{P}{l} \left(\frac{\frac{R_{\text{л}} + R_{\text{п}}}{R_{\text{л}} R_{\text{п}}}}{\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}}} \right)}, \quad (3.2)$$

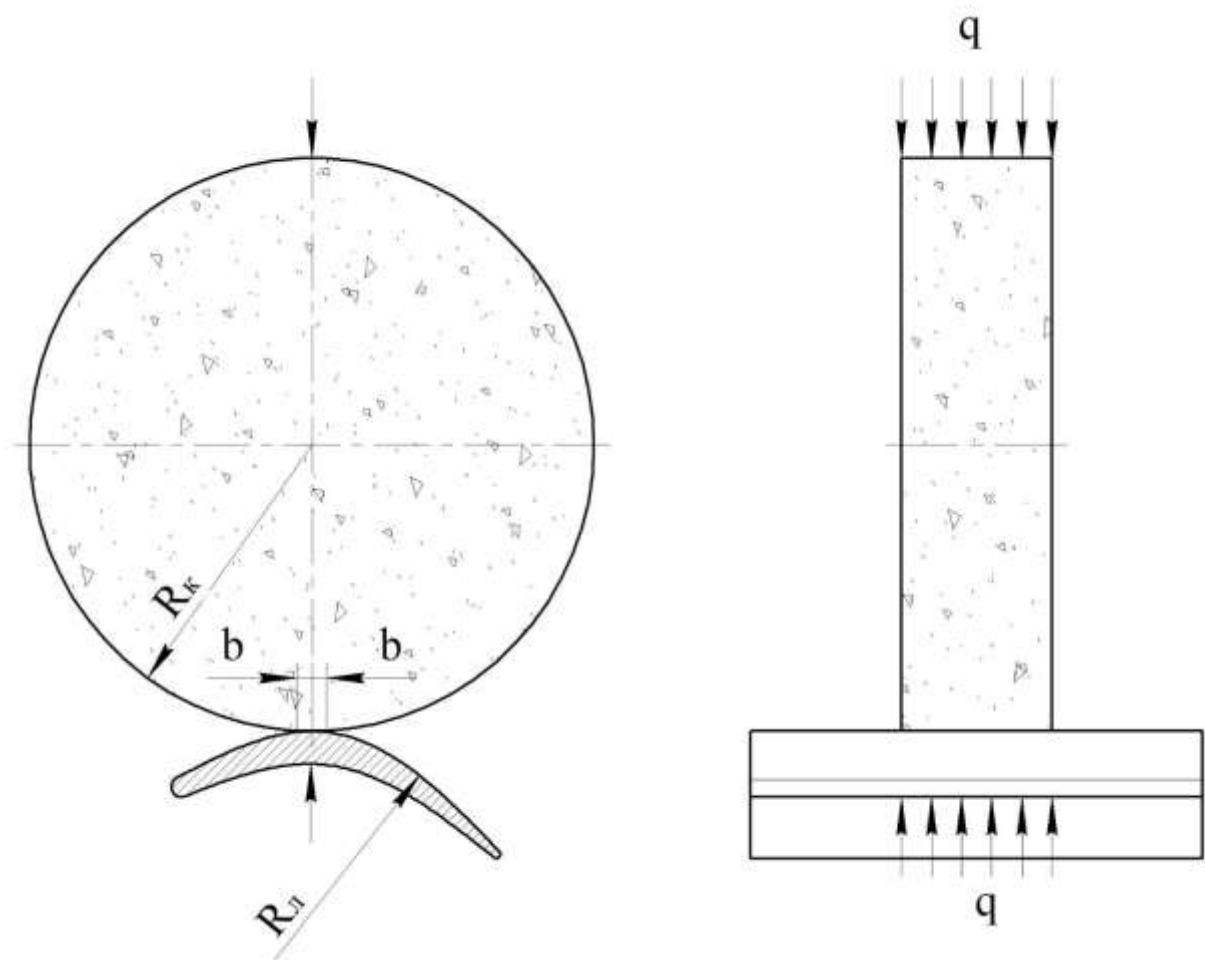


Рисунок 3.8 – Характеристики контакта при решении задачи Герца

Следует отметить, что исходя из приведенных уравнений определения величины контактной площадки (3.1) и максимального напряжения (3.2), переменный радиус профиля пера ЛТ ГТД в процессе обработки будет оказывать влияние, как на максимальные контактные напряжения в точке контакта, так и на характеристику пятна контакта, что в свою очередь будет вызывать непостоянство режимов обработки при полировании. Исходя из особенностей конструкции, радиус профиля пера всегда будет переменным, и допустив, что максимальные контактные напряжения, для решения поставленной задачи, должны иметь постоянное значение – из уравнения (3.2) получим формулу, для нахождения удельного усилия прижатия в рассматриваемой точке:

$$P = \frac{q_{max}^2}{0,318 \left(\frac{\frac{R_l + R_{\Pi}}{R_l R_{\Pi}}}{\frac{1 - \mu_l^2}{E_l} + \frac{1 - \mu_{\Pi}^2}{E_{\Pi}}} \right)}, \quad (3.3)$$

Аналогичным образом получим расчетные формулы, для определения удельного усилия прижатия для схем обработки, представленных на рисунке 3.6, б и рисунке 3.6, в.

Для случая обработки внутренней стороны лопатки (рисунок 3.6, б) формулы определения величины полуширины контактной площадки и максимального напряжения в зоне контакта будут иметь вид:

$$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_l R_{\Pi}}{R_l - R_{\Pi}} \left(\frac{1 - \mu_l^2}{E_l} + \frac{1 - \mu_{\Pi}^2}{E_{\Pi}} \right)}, \quad (3.4)$$

$$q_{max} = 0,5642 \sqrt{\frac{P}{l} \left(\frac{\frac{R_l - R_{\Pi}}{R_l R_{\Pi}}}{\frac{1 - \mu_l^2}{E_l} + \frac{1 - \mu_{\Pi}^2}{E_{\Pi}}} \right)}, \quad (3.5)$$

Из представленных уравнений (3.4) и (3.5) получим уравнение определения усилия прижатия для рассматриваемой схемы:

$$P = \frac{q_{max}^2}{0,318 \left(\frac{\frac{R_L - R_{\Pi}}{R_L R_{\Pi}}}{\frac{1 - \mu_L^2}{E_L} + \frac{1 - \mu_{\Pi}^2}{E_{\Pi}}} \right)}, \quad (3.6)$$

В случае с схемой обработки, представленной на рисунке 3.6 в, пятно контакта будет представлять собой эллипс, полуоси a и b которого определим по формулам (3.7) и (3.8) соответственно:

$$a = 1,145n_a \sqrt[3]{P \frac{R_L R_{\Pi}}{2R_L - R_{\Pi}} \left(\frac{1 - \mu_L^2}{E_L} + \frac{1 - \mu_{\Pi}^2}{E_{\Pi}} \right)}, \quad (3.7)$$

$$b = 1,145n_b \sqrt[3]{P \frac{R_L R_{\Pi}}{2R_L - R_{\Pi}} \left(\frac{1 - \mu_L^2}{E_L} + \frac{1 - \mu_{\Pi}^2}{E_{\Pi}} \right)}, \quad (3.8)$$

где, n_a и n_b , коэффициенты уравнения эллипса касания, приведенные в справочной литературе [127, с. 642, таблица 61].

Уравнение определения максимального напряжения в зоне контакта, будет иметь вид:

$$q_{max} = 0,365n_p \sqrt[3]{P \frac{\left(\frac{2R_L - R_{\Pi}}{R_L R_{\Pi}} \right)^2}{\left(\frac{1 - \mu_L^2}{E_L} + \frac{1 - \mu_{\Pi}^2}{E_{\Pi}} \right)^2}}, \quad (3.9)$$

Аналогично рассмотренным ранее схемам обработки, получаем уравнение определения усилия прижатия для рассматриваемой схемы:

$$P = \frac{q_{max}^3}{0,365^3 n_p^3 \frac{\left(\frac{2R_d - R_n}{R_d R_n}\right)^2}{\left(\frac{1 - \mu_d^2}{E_d} + \frac{1 - \mu_n^2}{E_n}\right)^2}}, \quad (3.10)$$

Таким образом, на основании анализа особенностей схем обработки сложного криволинейного профиля ЛТ ГТД, и существующих частных вариантов решения контактной задачи Герца, получили:

- расчетные схемы для наиболее распространенных операций полирования дисковыми полировальными кругами профиля пера;
- уравнения для определения требуемого усилия прижима заготовки, в процессе полирования, для обеспечения постоянства контактных напряжений в процессе обработки;
- характерные зоны профиля, при обработке которых возникают максимальные контактные напряжения.

С учетом всего вышесказанного можно сделать вывод, что при отделочной обработке ЛТ ГТД наблюдается существенное изменение возникающих максимальных напряжений, обусловленное сложным профилем и переменными удельными усилиями прижима.

Проектирование технологического процесса с учетом этого непостоянства позволит обеспечить более равномерную обработку поверхности, без увеличения длительности обработки, или управлять длительностью обработки, путем придания функционально-ориентированных свойств обрабатываемым поверхностям.

3.5 Синтез развернутой структуры технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины

В данном подразделе приводятся данные по синтезу развернутой структуры технологического процесса повышения производительности ОУО лопаток турбины ГТД, учитывающего рассматриваемые в работе способы совершенствования ОУО и возможные методы их реализации, что требует решения ряда задач, а именно:

1. На основании исследования процессов и характера разрушения лопаток турбин локализовать зоны, подвергающиеся максимальному деструктивному влиянию в процессе эксплуатации.

2. Определить рациональные способы повышения производительности обработки локализованных зон, и граничные условия их применения с учетом размерных групп лопаток.

3. Провести синтез структуры, на основании типового технологического процесса обработки, нового технологического процесса, учитывающего определенные ранее зоны и способы повышения производительности их обработки.

4. На основании полученного технологического процесса провести синтез структуры функционально-ориентированного технологического обеспечения.

Несмотря на то, что большинство традиционных технологий производства и ремонта лопаток турбин стремятся придать требуемые характеристики целиком всей детали, существует ряд работ и наработок на основе функционально-ориентированного подхода, в том числе основанных на нанесении специальных защитных ФОП.

Так, для рассматриваемых в работе лопаток турбины двигателя ТВ3-117, максимальная температура газа на входе в турбину может достигать 990°C, а на выходе из турбины – до 650°C. При этом, лопатки подвергаются действию не только высоких температур, а еще и агрессивной среды, а также подвергаются

большим центробежным нагрузкам, испытывают растяжения изгиба, и переменные напряжения, вызванные вибрационными и тепловыми нагрузками.

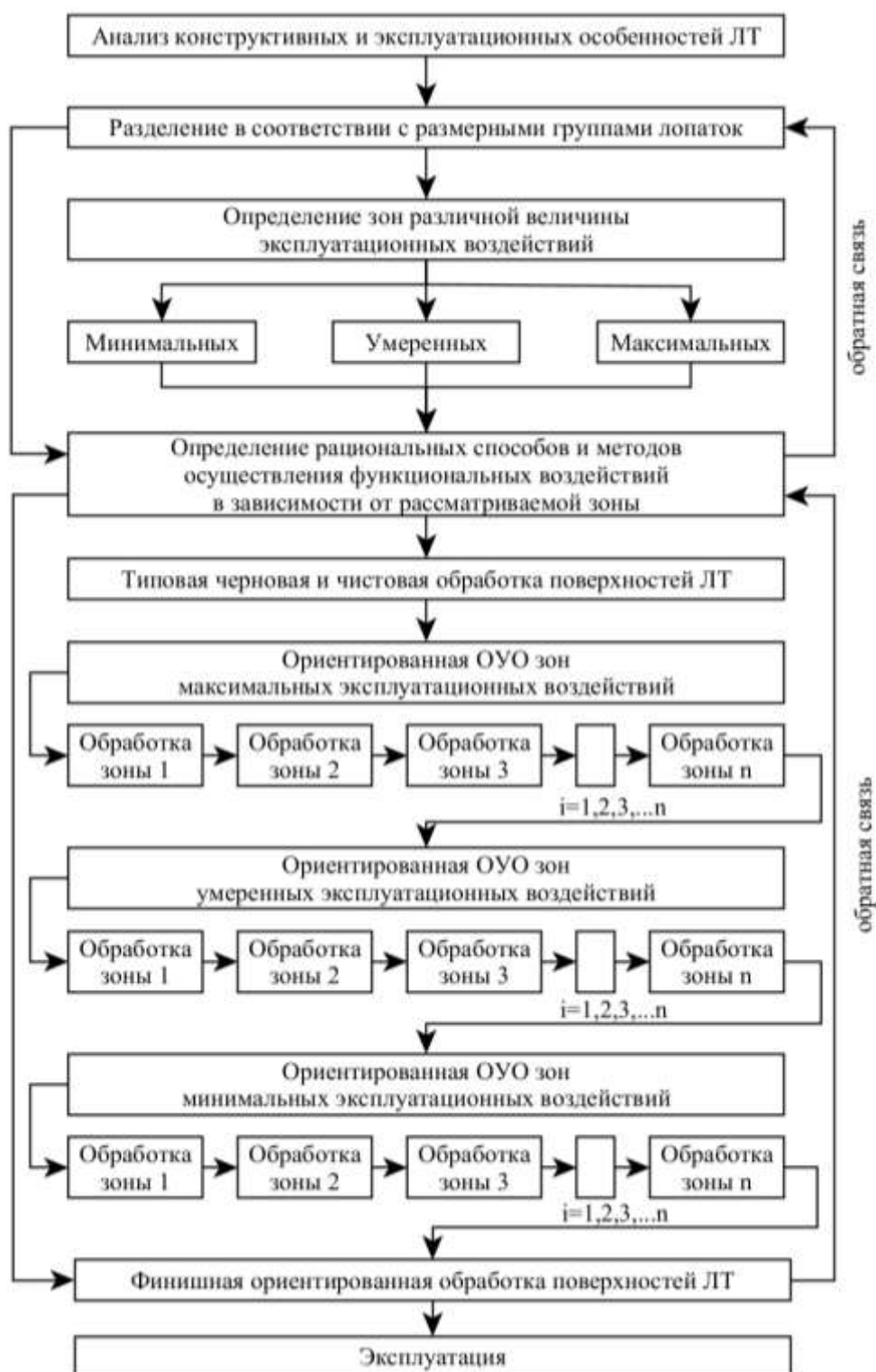


Рисунок 3.9 – Схема развернутой структуры технологического процесса обработки ЛТ

Учитывая конструктивные особенности двигателя, а именно наличие в нем турбины компрессора и свободной турбины, состоящих из двух ступеней каждая соответственно, лопатки турбины в одном двигателе относятся к различным размерным группам, приведенным в таблице 3.1. В связи с вышесказанным, следует отметить, что для различных размерных групп лопаток, могут применяться различные методы и способы повышения производительности, что будет зависеть как от особенностей их условий эксплуатации, так и от их геометрических параметров. Так, схема развернутой структуры технологического процесса примет вид, представленный на рисунке 3.9.

3.6 Выводы

Таким образом, в представленном разделе выполнены исследования по структурно-технологическому синтезу процессов повышения производительности ОУО ЛТ, в результате которых получено следующее:

1. В результате проведенного анализа ряда работ определено, что основными эксплуатационными воздействиями, оказывающими влияние на работоспособность ЛТ ГТД, выступают механические и дальнейшее внимание необходимо сосредоточить на способах обеспечения устойчивости к ним.

2. Разработана модель процесса ОУО, характеризующегося изменением структуры поверхностного слоя, под действием технологических воздействий различного характера, таких как физико-термическая, электрофизическая, механическая обработка, наплавка и т.д.

3. При выполнении операций по отделочной обработке ЛТ ГТД наблюдается существенное изменение условий обработки, которое обусловлено сложным пространственным профилем лопатки. Проектирование технологического процесса с учетом этого непостоянства позволит обеспечить более равномерную обработку поверхности и сокращение длительности

обработки. При этом, учитывать это непостоянство позволят уравнения, выведенные из известной методики контактного взаимодействия Герца, после соответствующего экспериментального подтверждения.

4. Разработана схема развернутой структуры технологического процесса повышения производительности ОУО ЛТ ГТД.

5. Создана основа для разработки метода совершенствования технологического обеспечения повышения производительности ЛТ путем применения комбинированных методов обработки, а также специального функционально-ориентированного технологического обеспечения, включающая в себя модель процесса ОУО, схему развернутой структуры технологического процесса.

РАЗДЕЛ 4 ОБЩИЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

4.1 Общие положения

Постоянно повышающиеся требования к эксплуатационным характеристикам ГТД существенно увеличивают трудоемкость их изготовления, что делает особо актуальной задачу повышения производительности ОУО, как одной из важных и трудоемких операций. Существует несколько общих методов синтеза технологического обеспечения для решения этой задачи, таких как оптимизация процессов механической обработки путем применения высокоточных и высокопроизводительных методов обработки, применение специальных и комбинированных инструментов, применение современных технологий упрочнения поверхности, применение комбинированных методов обработки, а также использование систем автоматизированного проектирования и моделирования на всех этапах жизненного цикла изделий.

Целью проводимого исследования является совершенствование технологического обеспечения ОУО лопаток турбины ГТД на основе комбинированных методов обработки, для повышения производительности процессов за счет решения вопросов функциональной ориентации технологических воздействий. Использование этих методов синтеза технологического обеспечения позволяет повысить производительность комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя и обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики.

Технологическое обеспечение для повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки может включать в себя различные методы и техники, например создание новых, или адаптация имеющихся режущих инструментов, применение новых инструментальных материалов или схем обработки, позволяющих учитывать эксплуатационные особенности обрабатываемых деталей и т.д. Эти методы часто используются в комбинации друг с другом для создания комплексных систем технологического обеспечения, направленных на повышение производительности отделочно-упрочняющей обработки с сохранением или повышением качества обработки.

4.2 Разработка методики синтеза вариантов технологического обеспечения отделочной обработки лопаток турбин

Лопатки турбин ГТД имеют широкую номенклатуру применяемых материалов, конструктивных исполнений и особенностей, как в пределах различных ступеней турбины одного двигателя, так и в целом, с учетом широкого спектра существующих ГТД. Для решения этих задач в работе будет рассмотрен синтез специального, функционально-ориентированного полировального инструмента, для совершенствования операций отделочной обработки ЛТ ГТД, а также устройства для зонального упрочнения функциональных элементов на уровне, соответствующем действующим на них функциональным воздействиям. На процесс синтеза требуемого технологического обеспечения будут влиять такие факторы как: характеристики заготовки и детали, режимы резания, параметры режущего инструмента.

Учитывая приведенные факторы обобщенно и в частности, можно провести синтез технологического обеспечения комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины. При этом полученный результат будет зависеть от выбранных граничных условий.

На основании проведенного в работе анализа конструктивных особенностей и эксплуатационных функций были выделены следующие граничные условия, характеризующие деталь и заготовку:

- варианты материала лопатки;
- варианты защитных покрытий;
- варианты возможного исходного состояния лопатки;
- варианты возможных параметров неравномерности эксплуатационных воздействий;
- варианты групп шероховатости поверхности после ОУО.

Группа граничных условий, характеризующих режимы резания, включает в себя:

- возможные варианты скорости резания;
- варианты возможной величины снимаемого припуска;
- варианты величины прижима при полировании.

Характеристики инструмента и применяемых полировальных паст образуют третью группу граничных условий, включающих:

- варианты используемых полировальных материалов;
- варианты технологических средств для реализации процессов полирования;
- варианты параметров соотношения элементов технологических средств полирования.

Тогда процесс синтеза технологического обеспечения комбинированной ОУО лопаток турбины ГТД можно выразить в виде множества факторов, при этом каждый элемент множества состоит из подмножеств:

$$M = \{A, B, C, D, E, F, G, H, K, U, V\}, \quad (4.1)$$

где A – факторы, учитывающие варианты материала лопатки;

B – факторы, учитывающие варианты защитных покрытий;

C – факторы, учитывающие состояние заготовки до процесса обработки;

D – факторы, учитывающие варианты возможных параметров неравномерности эксплуатационных воздействий;

E – факторы, учитывающие варианты групп шероховатости поверхности после ОУО;

F – факторы, учитывающие возможные варианты скорости резания;

G – факторы, учитывающие варианты возможной величины снимаемого припуска;

H – факторы, учитывающие варианты величины прижима при полировании;

K – факторы, учитывающие варианты используемых полировальных материалов;

U – факторы, учитывающие варианты технологических средств для реализации процессов полирования;

V – факторы, учитывающие варианты параметров соотношения элементов технологических средств полирования.

При этом каждый элемент множества (4.1) состоит из подмножества элементов, тогда, подмножество факторов, учитывающих варианты материала лопатки, примет вид:

$$A = \{A_1, A_2 \dots A_{i-1}, A_i\}, \quad (4.2)$$

где A_1, A_2, A_i – возможные варианты используемых материалов ЛТ ГТД.

Аналогичными подмножествами можно представить все факторы, учитываемые в множестве (4.1). Таким образом, получим множество подмножеств факторов, учитывающих варианты нанесенных защитных покрытий, состояние заготовки до процесса обработки, параметры неравномерности эксплуатационных воздействий, группы шероховатости поверхности, варианты возможной скорости резания и величины снимаемого припуска, используемых материалов и технологических средств для реализации процессов полирования.

Рассмотренные подмножества, влияющие на процесс синтеза технологического обеспечения, представим в виде морфологической матрицы:

$$M = \begin{pmatrix} A_1, A_2 \dots A_{i-1}, A_i \\ B_1, B_2 \dots B_{j-1}, B_j \\ C_1, C_2 \dots C_{n-1}, C_n \\ D_1, D_2 \dots D_{m-1}, D_m \\ E_1, E_2 \dots E_{l-1}, E_l \\ F_1, F_2 \dots F_{o-1}, F_o \\ G_1, G_2 \dots G_{p-1}, G_p \\ H_1, H_2 \dots H_{q-1}, H_q \\ K_1, K_2 \dots K_{r-1}, K_r \\ U_1, U_2 \dots U_{s-1}, U_s \\ V_1, V_2 \dots V_{w-1}, V_w \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Графически это множество факторов можно выразить с помощью теории графов [18, 20, 122]. Полученный граф приведен на рисунке 4.1.

Для матрицы (4.3) полное число генерируемых вариантов технологического оснащения (ТО) ОУО N можно определить как произведение вариантов каждой строки факторов:

$$N = i \cdot j \cdot n \cdot m \cdot l \cdot o \cdot p \cdot q \cdot r \cdot s \cdot w,, \quad (4.4)$$

Следующим шагом является уточнение количества вариантов в каждом факторе, от чего будет зависеть количество генерируемых вариантов ТО ОУО.

В настоящее время при производстве ЛТ ГТД применяется множество различных материалов, поэтому выбор будет напрямую зависеть от рассматриваемого двигателя. В работе будет рассматриваться двигатель ТВ3-117 и его производные ВК-2500, лопатки которых изготавливают из титановых сплавов ВТ12, ВТ14, ВТ22 и ВТ8М-1.

Факторы, учитывающие варианты защитных покрытий, укрупненно можно разделить на следующие группы: с нанесенными одно или многослойными в т.ч.

градиентными жаростойкими покрытиями; с защитными износостойкими покрытиями и без защитных покрытий.

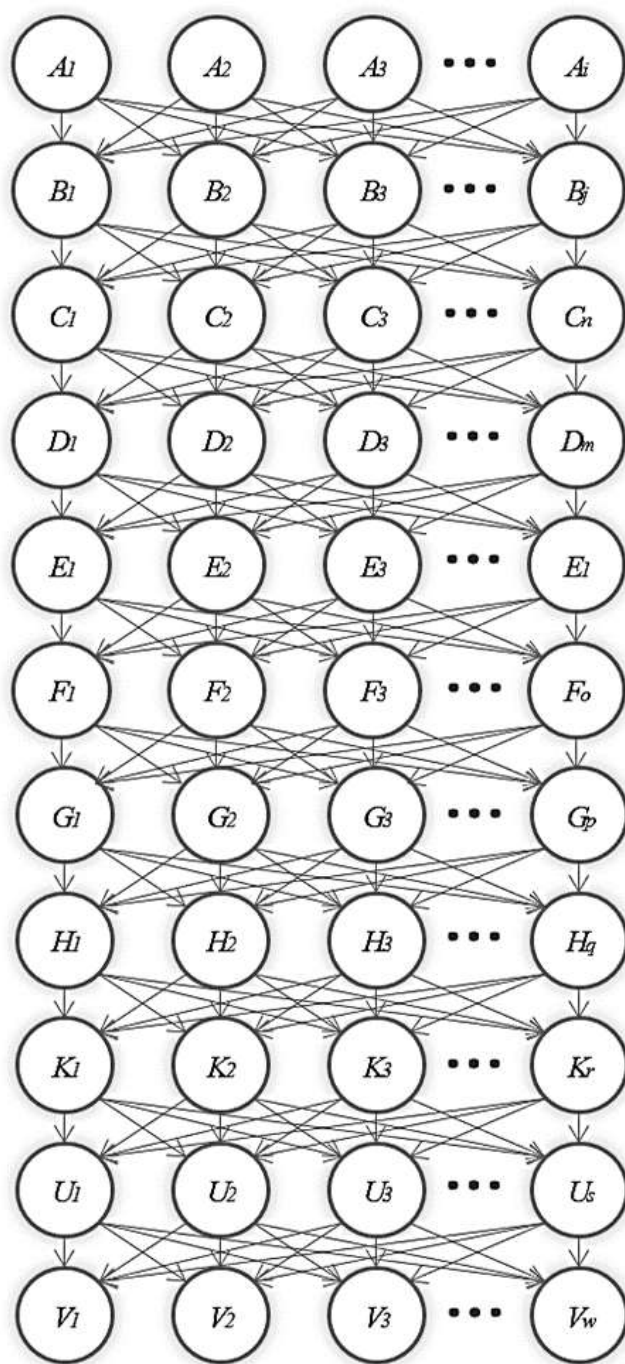


Рисунок 4.1 – Граф процесса синтеза технологического обеспечения

Факторы, учитывающие состояние заготовки до процесса обработки можно разделить на 2 группы, характеризующие исходную заготовку как новую (с

равномерным распределением припуска), или восстанавливаемую, характеризующуюся неравномерным распределением припуска.

В зависимости от конструкции, ступени и т.д. ЛТ ГТД подвергаются различным эксплуатационным воздействиям, так, лопатки первой ступени подвергаются значительным температурным воздействиям, с перепадами температур по профилю пера лопатки 200°C и выше, и существенному абразивному воздействию по входной кромке [3], факторы неравномерности воздействия разделяем на 3 вида: с минимальной, умеренной и высокой неравномерностью эксплуатационных воздействий. Исходя из характеристик рассматриваемых лопаток определяем пределы значений ряда факторов, а именно:

- факторы, учитывающие варианты групп шероховатости поверхности после ОУО включают в себя значения шероховатости $Ra - 0,32, 0,63, 1,25$ [12, 52];
- возможные варианты скорости резания при полировании $10 \text{ м/с}; 30 \text{ м/с}$ и 50 м/с [144, 169];
- величина снимаемого припуска при изготовлении новых лопаток может составлять до $0,1 \text{ мм}$, в то время как при восстановлении может достигать до $0,3 \text{ мм}$ [21, 22, 33].

Для уменьшения количества генерируемых вариантов ограничиваемся тремя значениями данного фактора – до $0,1 \text{ мм}$, от $0,1 \text{ мм}$ до $0,2 \text{ мм}$ и свыше $0,2 \text{ мм}$.

Величина прижима при полировании может варьироваться в диапазоне до 100 Н , что будет целесообразно разделить на 3 возможных варианта – 10 Н , 50 Н и 100 Н .

Существующие материалы, используемые при полировании, разделим на 3 группы:

1. Фетровые и войлочные круги.
2. Круги из различных тканей и прессованной бумаги.
3. Круги из резины или других эластичных материалов.

При полировании используется широкий спектр технологических средств полирования, включающих естественные (крокус, мел, венская известь, тальк,

диатомит, трепел) и искусственные (оксиды железа FeO, хрома CrO, алюминия Al₂O₃) абразивные порошки и пасты.

Наиболее распространенными соотношениями элементов технологических средств полирования являются следующие: 1:1, 1:3 и 1:5 [53, 58].

Подставив выбранные значения факторов в уравнение (4.4), получим:

$$N = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 3 = 472392 \text{ (вариантов)}$$

Для дальнейшего анализа такое огромное количество вариантов является избыточным, и выбрать искомый вариант затруднительно. С учетом того, что процесс синтеза технологического оснащения ОУО производится под конкретные варианты ЛТ ГТД, значения группы факторов, характеризующих деталь и заготовку будут известны, тем самым количество факторов *A, B, C, D, E* будет равно 1, а количество возможных вариантов технологических средств для полирования уменьшится с 9 до 6, что связано с обрабатываемым материалом. Подставив полученные значения факторов в уравнение (4.4), получим:

$$N = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 3 = 1458 \text{ (вариантов)}$$

С учетом выбранных граничных условий, граф процесса синтеза (рисунок 4.1) примет вид, представленный на рисунке 4.2.

Таким образом, на основании анализа конструктивных особенностей и механизмов разрушения ЛТ ГТД определены основные факторы, используемые в качестве граничных условий в предложенной методике синтеза технологического обеспечения ОУО. Выбранные граничные условия, характеризующие процесс синтеза технологического обеспечения ОУО, разделены на следующие группы, характеризующие:

- деталь и заготовку;
- режимы резания;

- применяемый инструмент и оснастку.

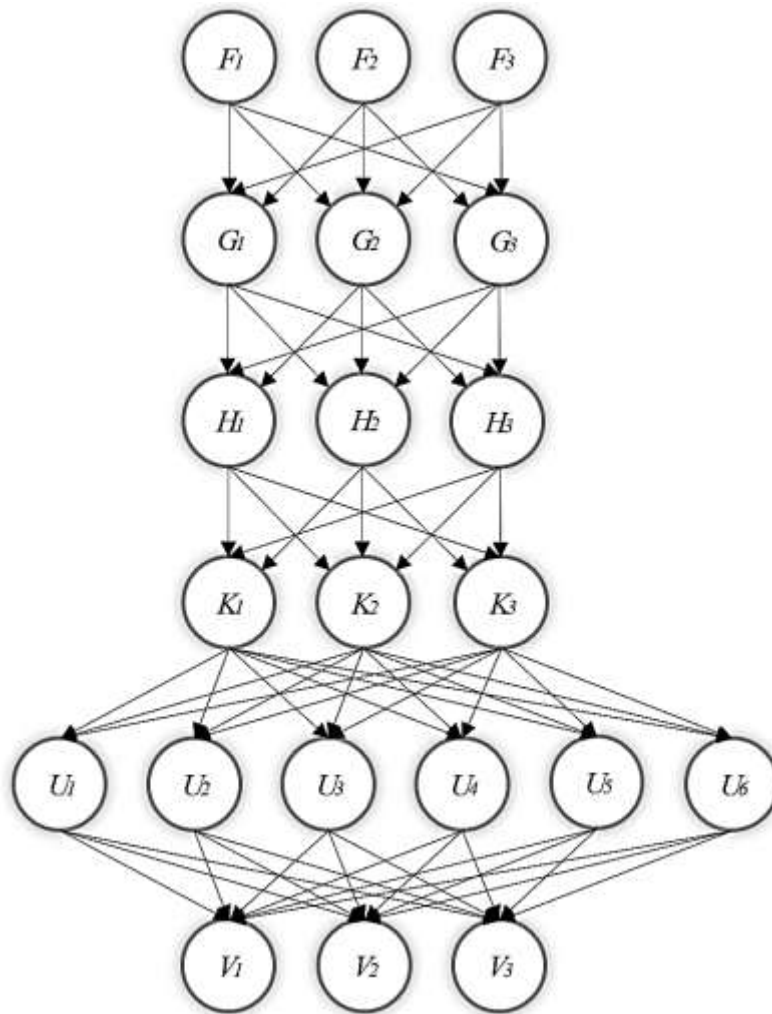


Рисунок 4.2 – Уточненный граф процесса синтеза технологического обеспечения

Основываясь на выбранных граничных условиях составлена, матрица и граф множества. Для дальнейшего определения рационального метода синтеза технологического обеспечения среди множества сгенерированных вариантов возможно применение существующих алгоритмов, активно используемых в теории графов, например алгоритм Дейкстры [175]. Алгоритм Дейкстры позволяет находить кратчайшие пути от одной из вершин взвешенного ориентированного графа ко всем остальным его вершинам, при условии отсутствия дуг отрицательного веса.

Выделенные и классифицированные граничные условия позволили сформировать морфологическую матрицу и граф возможных вариантов технологического обеспечения ОУО лопаток турбин ГТД. Применение алгоритмов теории графов, в частности алгоритма Дейкстры, обеспечивает рациональный выбор параметров обработки при заданных эксплуатационных требованиях, что повышает эффективность и адаптивность технологического процесса.

4.3 Основы синтеза технологического обеспечения повышения производительности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин

Процесс синтеза вариантов технологического обеспечения отделочной обработки ЛТ ГТД является сложной комплексной задачей, требующей учета многих факторов. Учитывая широкий диапазон применяемых материалов и большую номенклатуру существующих лопаток турбин конструирование полировальных кругов, которые должны обеспечивать эффективное и качественное удаление микронеровностей с поверхности лопатки, является одним из важных аспектов.

Для достижения требуемых результатов полировальный круг может быть изготовлен из нескольких слоев различных полировальных материалов, каждый из которых выполняет определенную функцию. Одним из вариантов такого круга может быть применение трех различных материалов, а именно: слоя для предварительной полировки, предназначенного для удаления крупных неровностей и дефектов с поверхности лопатки на начальных стадиях полировки; промежуточного слоя, для окончательной чистовой полировки с получением требуемых характеристик поверхностного слоя и слоя отделочной обработки, из мягкого полировального материала, обеспечивающего финишную обработку поверхности, например глянецование.

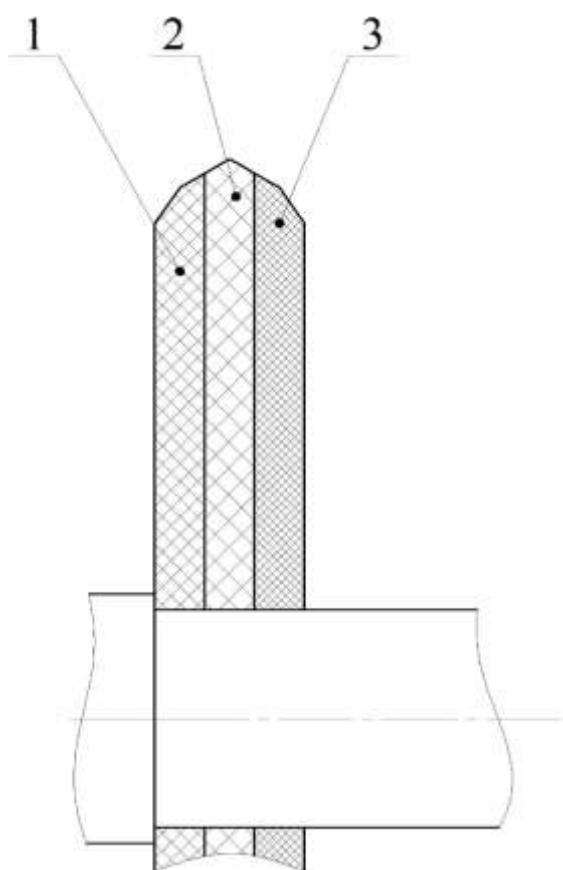


Рисунок 4.3 – Общий вид
комбинированного
полировального круга

Одним из таких инструментов может выступать комбинированный полировальный круг, выполненный из трех слоев равной толщины выполненных из различных полировальных материалов, фасонной, симметричной, образованной рядом сопряженных конических поверхностей с различным углом конусности с общей центральной вершиной формы, приведенный на рисунке 4.3., где 1, 2 и 3 – слои различного полировального материала, отличающегося своими абразивными и механическими свойствами, позволяющие выполнять операции предварительного и окончательного полирования, а также глянцеваания, без необходимости смены инструмента.

Фасонная, симметричная форма круга позволяет выполнять операции полирования одновременно только одним слоем полировального материала, при этом, обеспечивая возможность перехода к другим слоям с минимальными затратами времени. Последовательный переход от обработки первым к обработке последним слоем позволит реализовать предварительное и окончательное полирование вместе с глянцеваанием за один переход, без необходимости в смене инструмента.

При этом, очередность расположения, форма и толщина каждого слоя круга может быть различна. Например, спрофилирована по радиусу, обеспечивающему возможность проведения обработки каждым слоем материала, при этом слои абразивных материалов различной зернистости выполнены равной толщины, или

же из слоев материала различной толщины, для обеспечения более равномерного износа каждого функционального слоя.

Изготовленные по данной схеме круги, представлены на рисунке 4.4, состоят из слоев различного абразивного материала, а именно: рисунок 4.4, а) для обработки рабочих лопаток турбин, состоящий из слоя жесткошерстного войлока 1; слоя из полиуретана 2 и слоя из мягкошерстного войлока 3; рисунок 4.4, б) для обработки сопловых лопаток, состоящий из слоя жесткошерстного войлока 1, слоя из нетканого нейлонового материала с абразивной пропиткой из оксида алюминия 4, и слоя из мягкошерстного войлока 3; рисунок 4.4, в) для зональной обработки лопаток направляющего аппарата, состоящего из слоя трехмерного волокна с нанесёнными абразивными зернами оксида алюминия 5 и слоя из мягкошерстного войлока 3.

Каждый слой обеспечивает определенный вид обработки, так слой из жесткошерстного войлока (рисунок 4.4, позиция 1) предназначен для выполнения операций предварительного полирования, слой из полиуретана (TPU-95A) (рисунок 4.4, позиция 2) и нетканого нейлонового материала с абразивной пропиткой из оксида алюминия (рисунок 4.4, позиция 4) предназначены для окончательного полирования; слой из мягкошерстного войлока (рисунок 4.4, позиция 3) предназначен для операции глянцевого, с учетом обеспечения соответствующих режимов обработки; а слой из трехмерного волокна с нанесёнными абразивными зернами оксида алюминия на связке из синтетических смол (рисунок 4.4, позиция 5) – для обеспечения зональной функционально-ориентированной обработки.

Применение данных кругов позволяет сократить затраты времени на смену инструмента при обработке, что является очень актуальным при ручном способе полирования.

Процесс выбора варианта подобного решения, с учетом рассматриваемой ранее методики синтеза, может быть выражен в виде множества факторов, представленных в виде структурной формулы, учитывающей материал и количество слоёв, отношение их толщины к толщине всего круга, форму профиля

и т.д. Пример реализации такого функционально ориентированного полировального круга, состоящего из трех слоёв различных материалов неравномерной толщины, для обеспечения равномерного износа каждого слоя приведен на рисунке 4.5 [81].

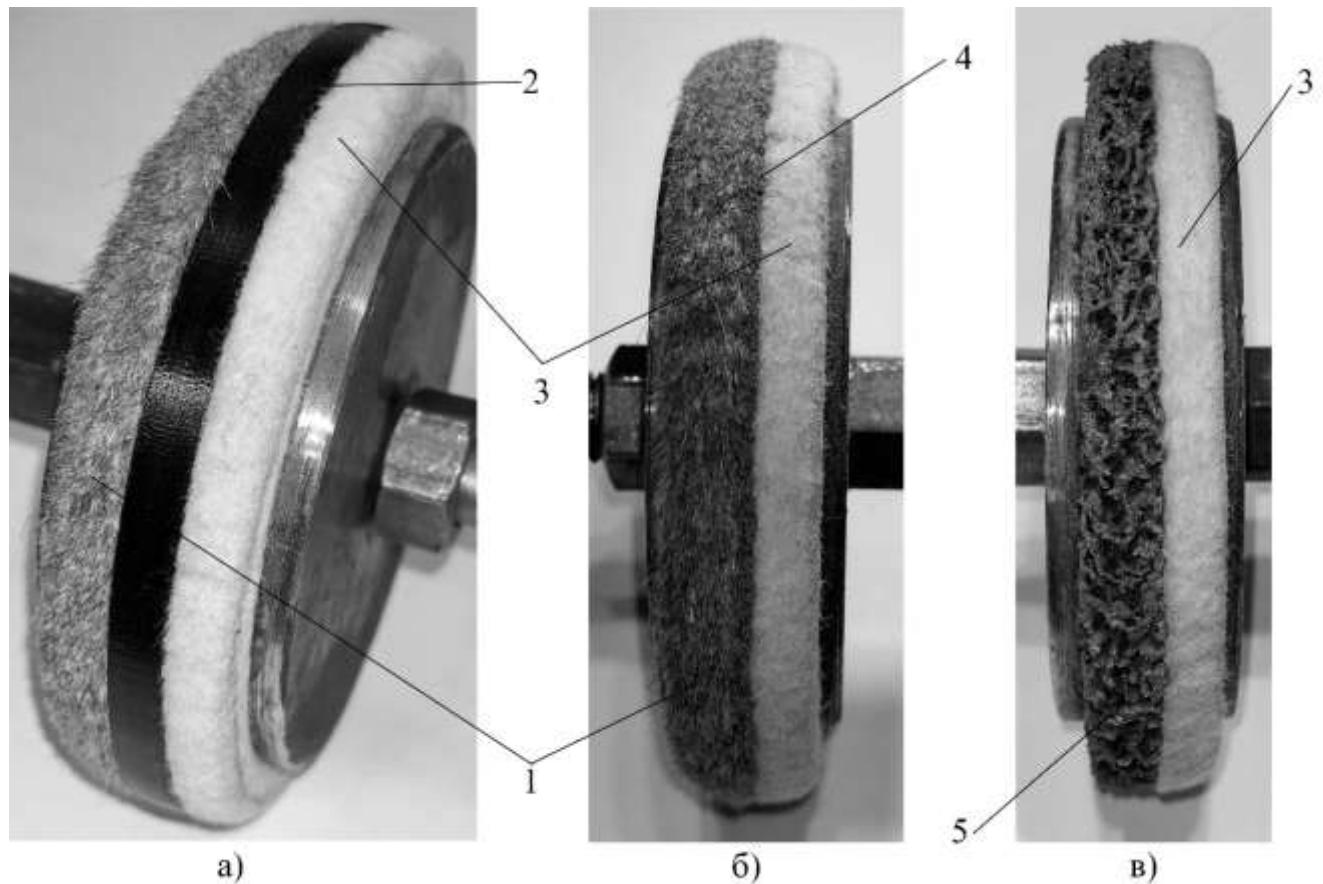


Рисунок 4.4 – Варианты общего вида комбинированного полировального круга:

а) с тремя слоями различных материалов разной толщины; б) с тремя слоями различных материалов разной толщины; в) с двумя слоями различных материалов равной толщины; 1 – слой из жесткошерстного войлока; 2 – слой из полиуретана (TPU-95A); 3 – слой из мягкошерстного войлока; 4 – слой нетканого нейлонового материала с абразивной пропиткой из оксида алюминия; 5 – слой трехмерного волокна с нанесёнными абразивными зернами оксида алюминия на связке из синтетических смол.

Важным аспектом, помимо выбора материалов, является профилирование полировального круга. Круг может быть специально спрофилирован с учетом

геометрии лопатки турбины, что обеспечит оптимальный контакт с поверхностью и позволит достичь высокого качества полирования даже на сложных участках. Профилирование может осуществляться различными способами, например, с помощью механической обработки, аддитивных технологий или специальных форм для прессования.



Рисунок 4.5 – Общий вид функционально-ориентированного полировального круга

Применение таких полировальных кругов напрямую связано с применением различных полировальных паст, позволяющих достичь поставленных результатов. Так, в качестве составов для полирования можно применять как твердые полировальные пасты (например, выполненные в виде брусков отечественные пасты «Шлифовальные технологии» GTOOL) или жидкие составы (например, 3M Finesse-It Polish), а также абразивные суспензии.

В таблице 4.1 приведены рекомендации производителей различных абразивных материалов по их применяемости с учетом слоев изготовленных функционально-ориентированных полировальных кругов.

Таблица 4.1 – Рекомендации по применению полировальных паст для слоев круга

Слой	Абразивная паста	
	3М	GTOOL
Жесткошерстный войлок	Finesse-It Finishing Material (белый)	Розовая паста
Мягкошерстный войлок	Finesse-It Polish K211/K215	Зеленая паста
Полиуретан (TPU-95A)	Finesse-It Final Finish (серый)	Белая паста
Нетканый нейлоновый материал	Не требует паст, абразив внедрён в материал	
Трехмерное волокно		

Таким образом, синтез вариантов технологического обеспечения отделочной обработки лопатки турбины охватывает тщательный выбор материалов, конструирование и профилирование полировального круга в соответствии с геометрией лопатки и особенностями процесса обработки. Это позволяет добиться высокого качества полировки и обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики лопатки турбины.

4.4 Функционально-ориентированные методы поверхностно-пластического упрочнения лопаток турбины ГТД

Методы поверхностно-пластического деформирования (ППД) являются одним из способов повышения эксплуатационных характеристик лопаток ГТД. Такие методы упрочняющих технологий включают в себя: раскатывающие методы чистовой обработки, вибрационные, пневмо- и гидро-дробеструйные, обкатка роликами, алмазное выглаживание, дорнование, а также другие методы чистовой обработки поверхности деталей [23, 80, 156]. Применение таких методов позволяет достичь следующих характеристик: создание благоприятного микрорельефа

поверхности при сохранении или уменьшении параметров шероховатости поверхности, стабилизацию степени наклепа и т.д. [65, 66, 169].

В силу их технологических особенностей, ряд методов ППД имеет определенные ограничения на применение [74], с точки зрения функционально-ориентированных технологий.

Как отмечалось ранее, лопадки имеют ряд характерных зон, обработке которых необходимо уделить максимальное внимание. К этим зонам можно отнести входную и выходную кромки, а также корытце в центральном сечении. Кроме того, особое внимание следует уделять обработке хвостовика, т.к. особенности его конструкции и геометрии также накладывают ряд ограничений как на возможные способы упрочнения, так и на особенности их реализации.

Рассмотрим применение операций ППД на примере экспериментального устройства для поверхностно-пластического упрочнения (ППУ). Для детального рассмотрения выберем спинку пера, как один из наиболее нагруженных функциональных элементов лопадки. Формирование упрочненного слоя происходит путем многократного соударения рабочего элемента и упрочняемой детали. Благодаря возможности применения различных типов привода и их характеристик возможна реализация широкого спектра технологических воздействий за счет большого диапазона как величины соударений, так и их амплитуды. Синтез вариантов функционально-ориентированного технологического оснащения можно проводить на основании разработанной и описанной в пункте 4.2 методики синтеза технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины.

Исходя из указанных особенностей конфигурации профиля пера, было спроектировано экспериментальное портативное устройство для поверхностно-пластического упрочнения, с возможностью адаптирования функциональных воздействий под особенности геометрии профиля пера. Общий вид указанного устройства представлена на рисунке 4.6, и включает в себя семь ударников 1, установленных в разборном корпусе 2, приводимых в рабочее положение пружинами 3. Рабочие элементы приводятся в действие пятой вала 4, на котором

закреплен подвижный торцевой кулачек 5, который, при вхождении в зацепление с неподвижным торцевым кулачком 6, зафиксированным от проворота в корпусе 2 с помощью винтов 9, обеспечивает его рабочий ход. Вал 4 приводится в движение от вала электропривода 7, соединенного через компенсирующую муфту 8. Регулировка амплитуды действия ударников регулируется за счет изменения частоты оборотов электропривода 7.

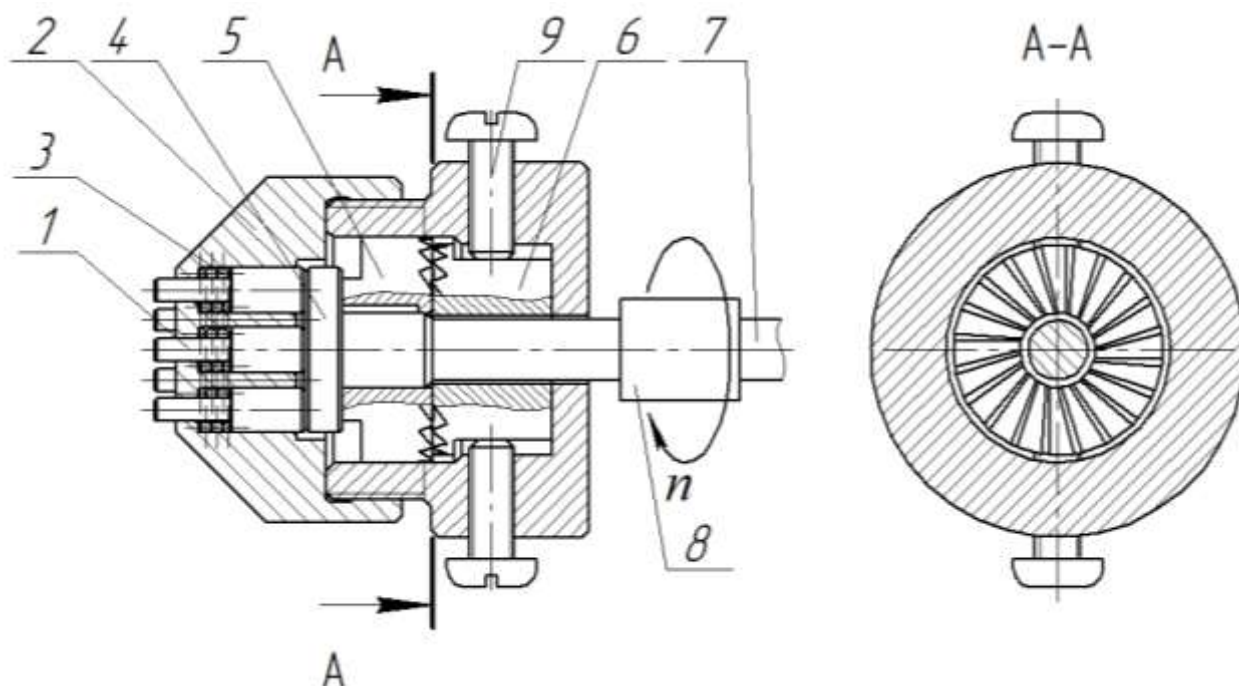


Рисунок 4.6 – Общий вид устройства для поверхностно-пластического упрочнения:
1) ударник; 2) корпус; 3) пружина; 4) толкатель; 5) подвижный торцевой кулачек; 6) неподвижный торцевой кулачек; 7) вал электропривода; 8) компенсирующая муфта; 9) винт-фиксатор торцевого кулачка.

Приведенная установка спроектирована таким образом, что имеет ход ударников 2 мм, с возможностью изменения частоты воздействий в широком диапазоне, а максимальный диаметр упрочняемой зоны без перемещения установки составляет 19 мм. При работе электропривода, ось толкателя 4 вращается и перемещает подвижный торцевой кулачек 5, относительно неподвижного торцевого кулачка 6, в следствие чего происходит ускоренное перемещение ударников 1, и их последующее соударение с упрочняемой

поверхностью. Возврат ударников 1 в исходное положение, обеспечивается за счет пружин 3. Зона контакта устройства ППУ и обрабатываемого образца представлена на рисунке 4.7.

Экспериментальная проверка, описанная в работе [93] проводилась путем циклического воздействия рассматриваемого устройства ППУ на обрабатываемый образец на протяжении равных интервалов времени, с последующим визуальным контролем и контролем параметров твердости поверхностного слоя. На основании полученных данных, построен график изменения твердости в зависимости от



Рисунок 4.7 – Зона контакта устройства ППУ
и контрольного образца

продолжительности упрочнения (рисунок 4.8). Как показывают приведенные в работе [82, 83, 93] результаты – применением такого способа обработки можно добиться локального упрочнения поверхности, при этом за счет изменения конструкции, типа и количества ударников – можно адаптировать устройство для обработки конкретных функциональных элементов.

Если рассматривать хвостовик елочного типа, его упрочнение описанным выше устройством не представляется возможным, и для его обработки потребуется адаптация ударников с учетом геометрии хвостовика. Так на рисунке 4.9 приведены возможные конструктивные решения, для упрочнения замка ударниками специального профиля единичного (рисунок 4.9, а), парного (рисунок 4.9, б), множественного (рисунок 4.9, в) и множественного парного (рисунок 4.9, г) исполнения. Приведенные варианты позволяют проводить как последовательную обработку каждого функционального элемента замка с каждой стороны (рисунок 4.9, а), так и комплексную обработку нескольких или всех элементов замка

одновременно (рисунок 4.9, в) с одной стороны, или с двух сторон соответственно (рисунок 4.9, б, г).

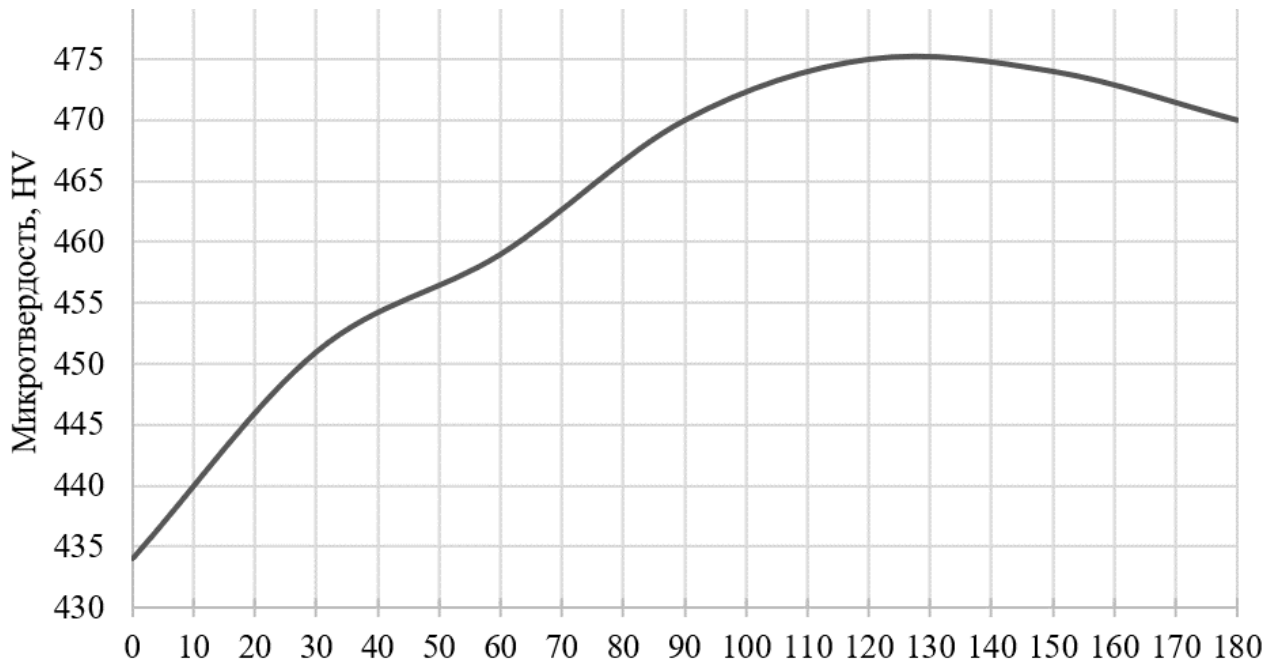


Рисунок 4.8 – График изменения твердости поверхности упрочняемого образца в зависимости от продолжительности упрочнения

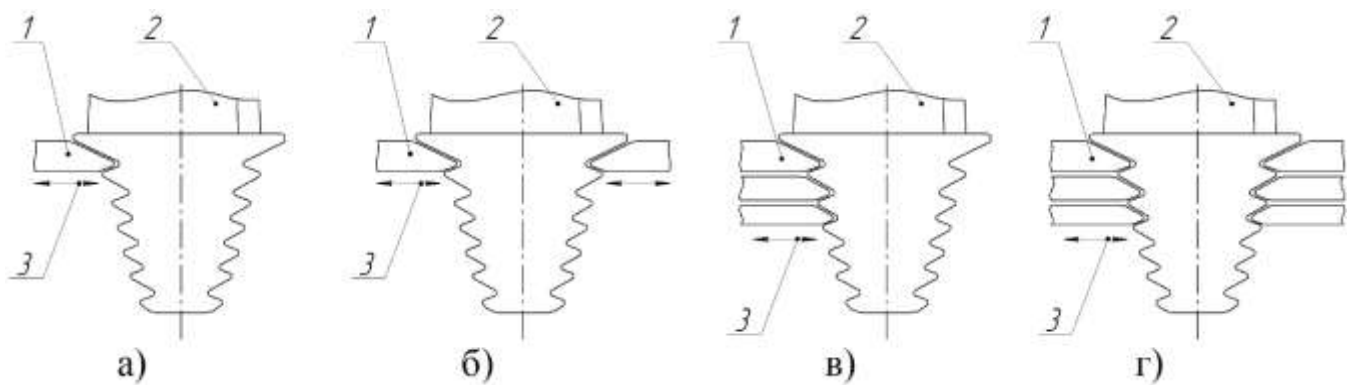


Рисунок 4.9 – Варианты конструктивного решения устройства поверхностно-пластического упрочнения хвостовика лопатки

Аналогичным образом может варьироваться длина, диаметр и материал ударников, в зависимости от геометрии обрабатываемого участка и максимальных прилагаемых усилий к нему, в том числе ограниченных как силовыми

характеристиками привода, так и особенностями конструкции обрабатываемой лопатки.

Таким образом, на основании приведенных выше данных можно сделать заключение, что применение подобного устройства для упрочняющей обработки лопаток возможно и актуально, но требует адаптации рабочих элементов, с учетом функциональных особенностей обрабатываемых изделий.

4.5 Выводы

Работа, выполненная в данном исследовании, дала следующие результаты:

1. Предложена методика синтеза множества вариантов технологического обеспечения повышения производительности ОУО, учитывающая такие факторы, как: характеристики заготовки и детали, режимы резания, параметры режущего инструмента.

2. Процесс синтеза вариантов технологического обеспечения отделочной обработки ЛТ ГТД включает в себя выбор конструкции, материала и формы инструмента, а также особенности его применения. На примере процессов полирования, такой процесс будет включать в себя тщательный выбор материалов, многослойную конструкцию полировального круга и его профилирование в соответствии с геометрией лопатки. Для достижения желаемых результатов полировальный круг может быть изготовлен из нескольких слоев различных полировальных материалов, каждый из которых выполняет определенную функцию. При этом, помимо выбора материалов, важным аспектом является профилирование полировального круга. Круг может быть специально сформирован с учетом геометрии лопатки турбины, что обеспечит оптимальный контакт с поверхностью и позволит достичь высокого качества полировки даже на сложных участках.

3. Для обеспечения максимальной производительности обработки без потери качества всех функциональных элементов профиля пера лопатки необходимо обеспечить минимально необходимое качество поверхностей каждого элемента с точки зрения заданного ресурса работы. При этом, данный подход применим как к отделочной, так и к упрочняющей обработке, что в комплексе обеспечивает сокращение длительности обработки профиля. Технологическое обеспечение может быть синтезировано по описанной ранее методике для возможности оказания требуемых функциональных воздействий в каждой зоне ЛТ ГТД.

РАЗДЕЛ 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. РЕКОМЕНДАЦИИ. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОИЗВОДСТВО

5.1 Общие положения

В работах [87, 95] установлено, что в процессе полирования лопаток турбины ГТД возникают существенные непостоянства режимов обработки, что обусловлено сложной пространственной формой и особенностями технологических схем обработки. Данные непостоянства существенно влияют на качество обработки, увеличивая вероятность отклонений от заданных параметров шероховатости поверхности и геометрии профиля ЛТ.

Для разработки практических рекомендаций по адаптации технологического процесса полирования ЛТ ГТД следует проверить разработанные основы определения технологических параметров зоны обработки, а именно пятна контакта при полировании, и на основе полученных результатов сформулировать методику адаптации технологического процесса. Достоверные данные о зоне контакта позволят более точно определить распределение нагрузок и разработать методику адаптации технологического процесса к изменяющимся условиям обработки.

В этом разделе рассмотрено следующее:

- представлена методика выполнения экспериментальных исследований;
- выполнена разработка технологической оснастки для проведения экспериментальных исследований;
- проведен ряд экспериментальных исследований с фиксацией результатов обработки в процессе проведения;
- приведены общие рекомендации диссертационной работы;
- даны особенности внедрения результатов работы в производство.

Таким образом, в данном разделе рассматриваются не только ключевые аспекты экспериментального исследования процесса полирования, но и вопросы практической реализации определённых параметров режимов резания в зоне обработки. В результате проведенной работы формируются рекомендации, направленные на оптимизацию технологического процесса, повышение качества обработки и снижение затрат на производство деталей ГТД.

5.2 Методика выполнения экспериментальных исследований

Проведенные экспериментальные исследования направлены на экспериментальную проверку и подтверждение теории о нахождении пятна контакта при полировании путем решения контактной задачи Герца, описанной в работе [87]. Следует отметить, что попытка подтверждения применения данной теории уже проводилась [95], и при проведении экспериментальных исследований были учтены все замечания и рекомендации, а именно: увеличение жесткости всей экспериментальной установки, уменьшение биения полировального круга перед проведением замеров, повышение мощности привода.

Экспериментальная проверка выполнялась по представленной на рисунке 3.6 а схеме полирования, а именно – при обработке полировальным кругом прямого профиля наружной поверхности пера лопатки, при условии, что радиус полировального круга больше, чем радиус обрабатываемой лопатки $R_{\text{п}} > R_{\text{л}}$ [169]. В качестве заготовки (рисунок 5.1) применялись упрощенные модели [92], эквивалентные профилю спинки пера, со следующими допущениями: материал обрабатываемой заготовки – сталь 45 по ГОСТ 1050-2013; радиус спинки профиля постоянный по всей длине заготовки; отсутствие неравномерностей профиля пера в осевом направлении.

Процесс экспериментального исследования заключается в последовательной обработке образцов со ступенчатым изменением величины прижима детали к

полировальному кругу, и последующем замере размеров полученного пятна контакта. Размеры пятна контакта, полученного в результате эксперимента, сравниваем с расчетными параметрами, полученными по зависимостям представленным как в разделе 3, так и в работах [87, 127].

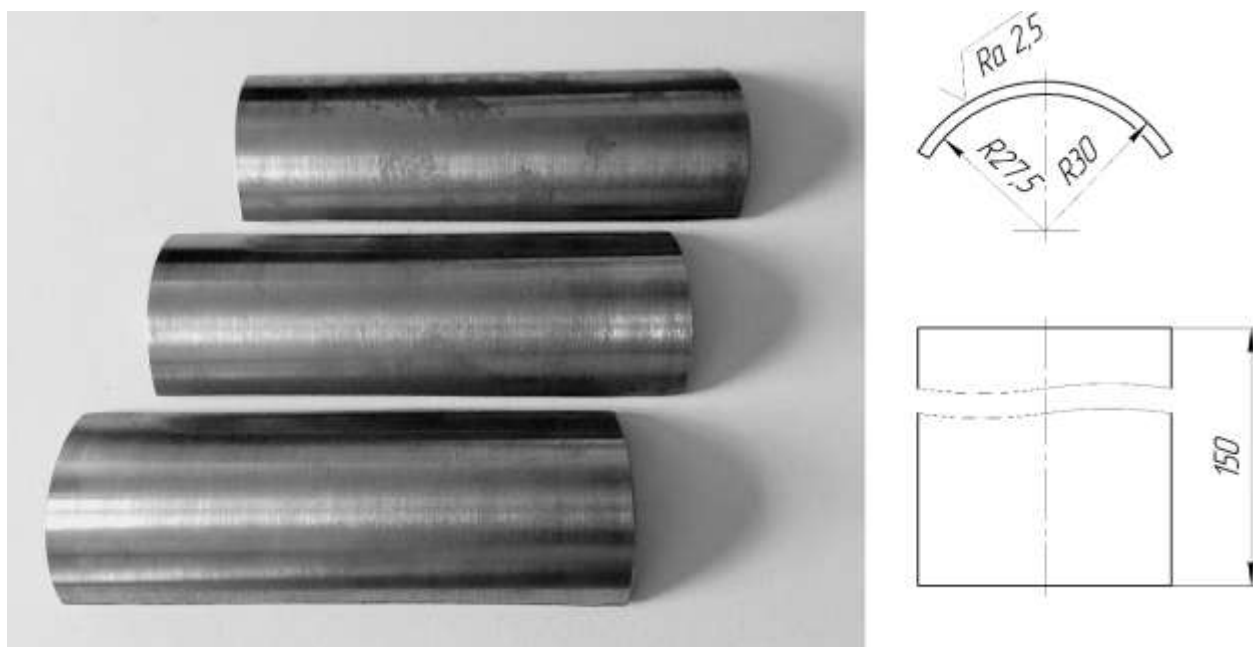


Рисунок 5.1 – Общий вид и эскиз упрощенных моделей, эквивалентных профилю спинки пера

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 5.2, и включает в себя полировальный круг 1, приводимый в движение от привода 2, а также динамометр 4 жестко соединенный с обрабатываемой заготовкой 3. При контакте заготовки с кругом, динамометр позволяет фиксировать усилие прижима, которое заносится в соответствующий протокол измерений.

Для облегчения проведения замеров пятна контакта на контрольных образцах, перед проведением экспериментальных исследований образцы покрывались тонким слоем перманентного красителя (рисунок 5.3)

В качестве основы для экспериментальной установки использовался токарно-винторезный станок модели 1А62К. Выбор был обусловлен рядом факторов, в том числе учтенных в работе [87], а именно:

- высокая жесткость системы СПИД;

- возможность закрепления инструмента в центрах, тем самым устранив потенциальную возможность отгиба полировального круга;
- механическая подача обрабатываемой заготовки на полировальный круг;
- высокая мощность привода главного движения, гарантирующая постоянство параметров обработки при увеличении силы прижима детали.

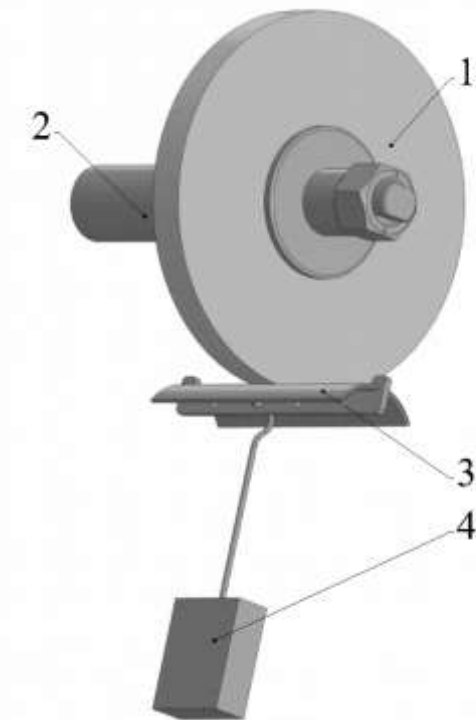


Рисунок 5.2 – Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – полировальный круг; 2 – привод; 3 – заготовка; 4 – динамометр

Станок был переоснащен для проведения эксперимента следующим образом. В патроне закреплено специальное зажимное приспособление, на котором размещен полировальный круг. Из конструктивных соображений свободный конец оправки поджат вращающимся центром, что позволяет повысить жесткость системы в целом. Обрабатываемая заготовка закреплена в специальной оправке, и установлена в штатный резцедержатель станка (рисунок 5.4).

На противоположной стороне в резцедержатель установлен кронштейн для тяги цифрового динамометра модели AMF-500 (представленного на рисунке 5.5), закрепленного на суппорте станка. Рассматриваемый цифровой динамометр позволяет проводить измерение усилий прижима в двух направлениях (как для случаев сжимающего, так и тянущего воздействия на тягу динамометра), о чем свидетельствует соответствующая пиктограмма на дисплее, в диапазоне до 500 Н, при этом устройство позволяет отображать как текущую величину усилия, так и пиковую в конкретном замере.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 5.6.



Рисунок 5.3 – Подготовленные экспериментальные образцы



Рисунок 5.4 – Закрепленная в приспособлении заготовка



Рисунок 5.5 – Цифровой динамометр модели AMF-500

Основные технологические режимы полирования упрощенных моделей ЛТ приведены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Технологические режимы полирования упрощенных моделей ЛТ ГТД

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Частота вращения полировального круга, об/мин	400
2	Материал полировального круга	Войлок грубошерстный
3	Усилие прижима, Н	5...260
4	Длительность операции полирования, с.	30
5	Количество замеров каждого усилия	3



Рисунок 5.6 – Общий вид экспериментальной установки на базе токарно-винторезного станка 1А62К

Подготовка к проведению экспериментального исследования проводилась с учетом следующих подготовительных операций: установка и проверка параллельности установки специального зажимного приспособления (рисунок 5.4) относительно оси вращения полировального круга; тарирование цифрового динамометра; комплексная проверка обоих подготовительных этапов путем последовательной обработки двух контактных площадок на краях заготовок с одинаковым усилием прижима, и их сравнение.

После подготовительных операций обрабатываемые образцы очищались от пыли и следов проверок и повторно покрывались тонким слоем перманентного красителя, после чего проводились контрольные замеры с фиксацией усилия в соответствующем протоколе. Диапазон измерения усилия прижима был заведомо расширен до 260 Н, что позволило охватить любые виды и схемы обработки полировальными кругами.

5.3 Результаты экспериментального исследования

Результатом данной части диссертационного исследования является экспериментальная проверка изменения пятна контакта при обработке профиля, эквивалентного профилю лопатки турбины [92], в зависимости от прилагаемых усилий, и сравнение полученных результатов с теоретическими данными, рассчитанными по зависимостям, представленным в разделе 3.

В результате проведения эксперимента был получен ряд значений, выдержка из которых представлена в таблице 5.2, а общий вид обработанных образцов представлен на рисунке 5.7.

Таблица 5.2 – Основные характеристики пятна контакта при изменении усилия прижима при полировании образцов из стали 45 ГОСТ 1050-2013

№ п/п	Усилие прижима, Н	Характеристики пятна контакта		
		l, мм	Ширина 2b, мм	Площадь, мм ²
1	5	17	6,5	110,5
2	10	17	7,2	122,4
3	15	17,1	7,3	124,8
4	20	17,5	7,7	134,8
5	40	17,9	7,8	139,6
6	50	18	8	144
7	75	18,2	9	163,8
8	100	18,6	9,4	174,8
9	125	19	9,6	182,4
10	150	19,1	10	191
11	260	19,8	10,5	207,9

Для рассматриваемых выше случаев расчетным путем были получены данные по формуле (3.1), а полученные результаты приведены в таблице 5.3.

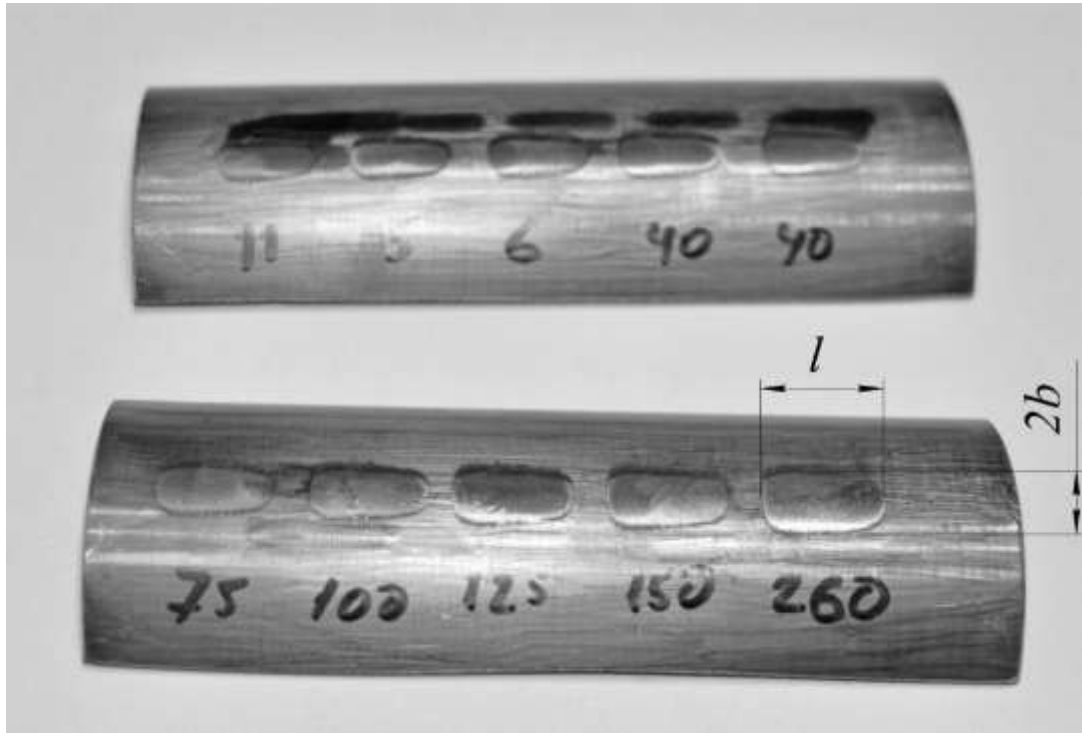


Рисунок 5.7 – Общий вид обработанных образцов

Таблица 5.3 – Теоретическое значение пятна контакта для различных материалов полировального круга

№ п/п	Усилие прижима, Н	Характеристики пятна контакта							
		Резина техническая		Каучук		Вулканитовая связка		Полиамид	
		b, мм	ширина 2b, мм	b, мм	ширина 2b, мм	b, мм	ширина 2b, мм	b, мм	ширина 2b, мм
1	5	1,03	2,06	0,83	1,66	0,08	0,16	0,07	0,14
2	10	1,46	2,92	1,18	2,36	0,12	0,24	0,1	0,2
3	15	1,79	3,58	1,44	2,88	0,14	0,28	0,12	0,24
4	20	2,07	4,14	1,67	3,34	0,16	0,32	0,14	0,28
5	40	2,92	5,84	2,36	4,72	0,23	0,46	0,2	0,4
6	50	3,27	6,54	2,63	5,26	0,26	0,52	0,22	0,44
7	75	4	8	3,22	6,44	0,32	0,64	0,27	0,54
8	100	4,62	9,24	3,72	7,44	0,37	0,74	0,31	0,62
9	125	5,17	10,34	4,16	8,32	0,41	0,82	0,35	0,7
10	150	5,66	11,32	4,56	9,12	0,45	0,9	0,38	0,76
11	260	7,45	14,9	6	12	0,59	1,18	0,5	1

При этом, основываясь на представленных в таблице 5.2 и таблице 5.3 данных, было установлено, что полученные в работе [95] данные, отражали

зависимость между экспериментальными и расчетными значениями ширины пятна контакта не в полной мере, что было обусловлено существенно ограниченным диапазоном измерений.

5.4 Обработка результатов экспериментального исследования

На основании полученных характеристик ширины пятна контакта, в зависимости от величины усилия прижима, полученных в результате проведения экспериментальных исследований и приведенных в таблице 5.2 строим график, приведенный на рисунке 5.8.

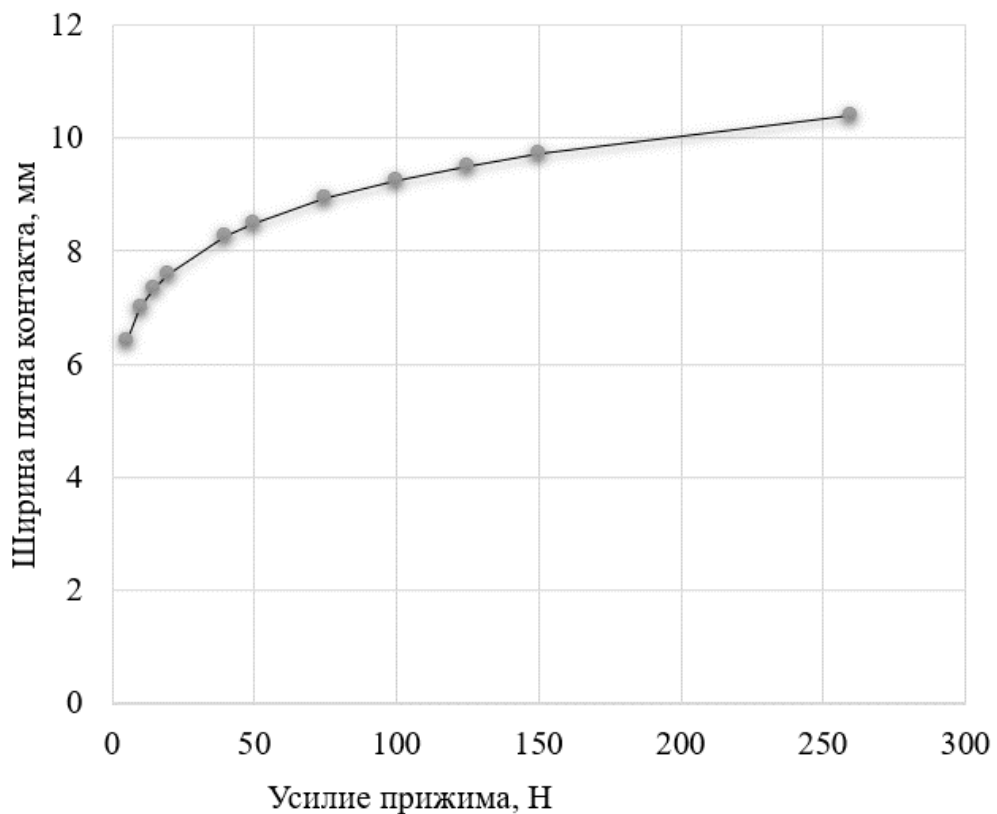


Рисунок 5.8 – График зависимости ширины пятна контакта от усилия прижима

Эмпирическую функцию зависимости ширины пятна контакта от усилия прижима определяем с применением метода наименьших квадратов. Для этого используем экспериментальные данные ширины пятна контакта, в зависимости от величины усилия прижима, полученные в результате проведения экспериментальных исследований и приведенные в таблице 5.2 и на графике (рисунок 5.8).

В общем случае, с учетом представленного графика, искомая функция будет зависеть не только от x , но и от некоторого количества параметров:

$$y = f(x, a, b, \dots), \quad (5.1)$$

При этом, искомая функция должна принимать значения, по возможности близкие к табличным, то есть график искомой функции должен проходить как можно ближе к экспериментальным точкам. Для отыскания коэффициентов $a, b, \dots$ в функции (5.1) применяем метод наименьших квадратов.

В общем случае степенная функция имеет вид:

$$y = \beta \cdot x^a, \quad (5.2)$$

Прологарифмировав по основанию функцию (5.2), получим новое уравнение:

$$\ln y = a \cdot \ln x + \ln \beta, \quad (5.3)$$

Обозначим $Y = \ln y, X = \ln x, b = \ln \beta$. Тогда равенство (5.3) примет вид $Y = aX + b$, при этом переменные X и Y связаны зависимостью, и приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Значения переменных X и Y

$X = \ln x$	1,609	2,303	2,708	2,996	3,689	3,912	4,317	4,605	4,828	5,011	5,561
$Y = \ln y$	1,872	1,974	1,988	2,041	2,054	2,079	2,197	2,241	2,262	2,303	2,351

Составим функцию двух переменных и находим, при каких значениях a, b эта функция принимает минимальное значение:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (5.4)$$

По необходимому признаку экстремума частные производные функции (5.4) должны быть равны нулю:

$$\begin{cases} S'_a(a, b) = \sum_{i=1}^n 2(ax_i + b - y_i) \cdot x_i = 0, \\ S'_b(a, b) = \sum_{i=1}^n 2(ax_i + b - y_i) \cdot 1 = 0. \end{cases} \quad (5.5)$$

После преобразования системы уравнения (5.5) получим:

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \cdot a + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot b = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i, \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot a + n \cdot b = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (5.6)$$

где $\sum_{i=1}^{11} x_i = 41,539$; $\sum_{i=1}^{11} y_i = 23,362$; $\sum_{i=1}^{11} x_i^2 = 172,301$; $\sum_{i=1}^{11} x_i \cdot y_i = 90,106$.

Таким образом, получили систему линейных уравнений с двумя неизвестными. Коэффициенты при неизвестных находим из исходной табличной зависимости (таблица 5.3).

$$\begin{cases} 172,301a + 41,539b = 90,106, \\ 41,539a + 11b = 23,362. \end{cases} \quad (5.7)$$

Решение системы линейных уравнений (5.7) находим по формулам Крамера:

$$a = \frac{\Delta_1}{\Delta},$$

$$b = \frac{\Delta_2}{\Delta},$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} 172,301 & 41,539 \\ 41,539 & 11 \end{vmatrix} = 169,822,$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 90,106 & 41,539 \\ 23,362 & 11 \end{vmatrix} = 20,732,$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 172,301 & 90,106 \\ 41,539 & 23,362 \end{vmatrix} = 282,383.$$

Тогда:

$$a = \frac{\Delta_1}{\Delta} = 0,122, b = \frac{\Delta_2}{\Delta} = 1,663.$$

Учитывая, что $b = \ln \beta$, находим $\beta = e^b = e^{1,663} = 5,275$.

Подставим найденные значения в уравнение (5.2) и получим искомую степенную функцию:

$$y = 5,2738 \cdot x^{0,1221} \quad (5.8)$$

Аналогичным образом по известной методике находим искомые функции зависимости теоретической ширины пятна контакта от усилия прижима. Основываясь на полученных графиках и эмпирических зависимостях, строим номограмму для определения ширины пятна контакта в зависимости от полученных теоретических значений, в зависимости от применяемого материала

полировального круга. Полученная номограмма приведена на рисунке 5.9. Приведенная номограмма получена для ширины полировального круга 19 мм.

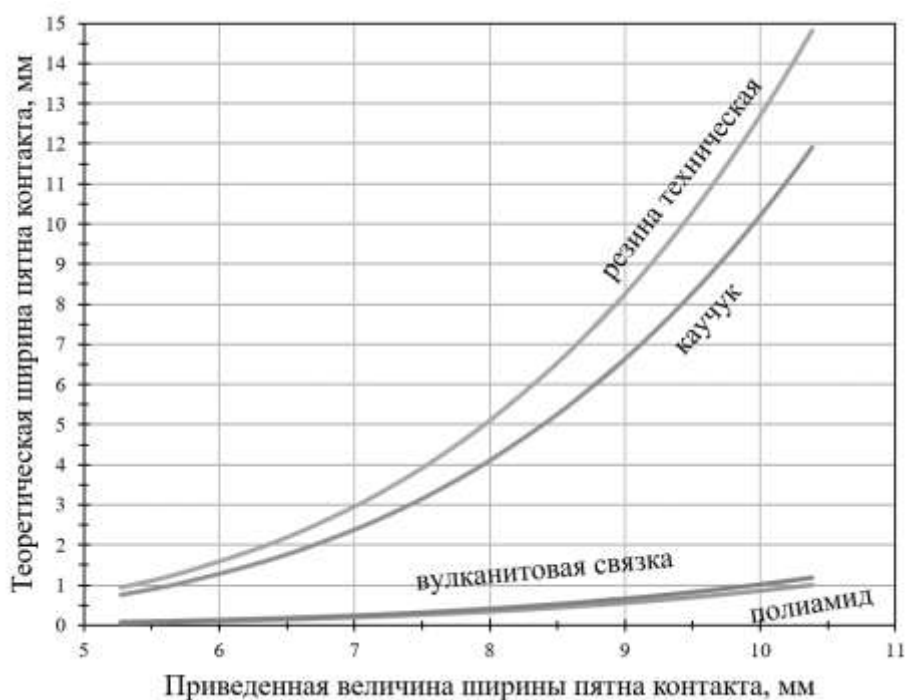


Рисунок 5.9 – Номограмма для определения ширины пятна контакта в зависимости от полученных теоретических значений

5.5 Рекомендации диссертационной работы

Как было отмечено ранее в разделах 3 и 4, и работах [83, 87, 95], профиль ЛТ ГТД, имеющий переменную геометрию профиля, в процессе отделочной обработки подвергается существенному непостоянству режимов обработки, а именно возникающими максимальными контактными напряжениями. Это обусловлено переменной геометрией пятна контакта инструмента (полировального круга) и обрабатываемой зоны пера лопатки.

Для обеспечения постоянства режимов процесса отделочно-упрочняющей обработки потребуется адаптация режимов в соответствии с переменной геометрией профиля. Основная идея такой адаптации состоит в управлении

условиями обработки в каждой конкретной точке обрабатываемой заготовки путем контроля геометрии пятна контакта инструмента и детали. Для обеспечения такой адаптации можно воспользоваться следующим алгоритмом (рисунок 5.10).

Подробнее рассмотрим каждый этап приведенного алгоритма.

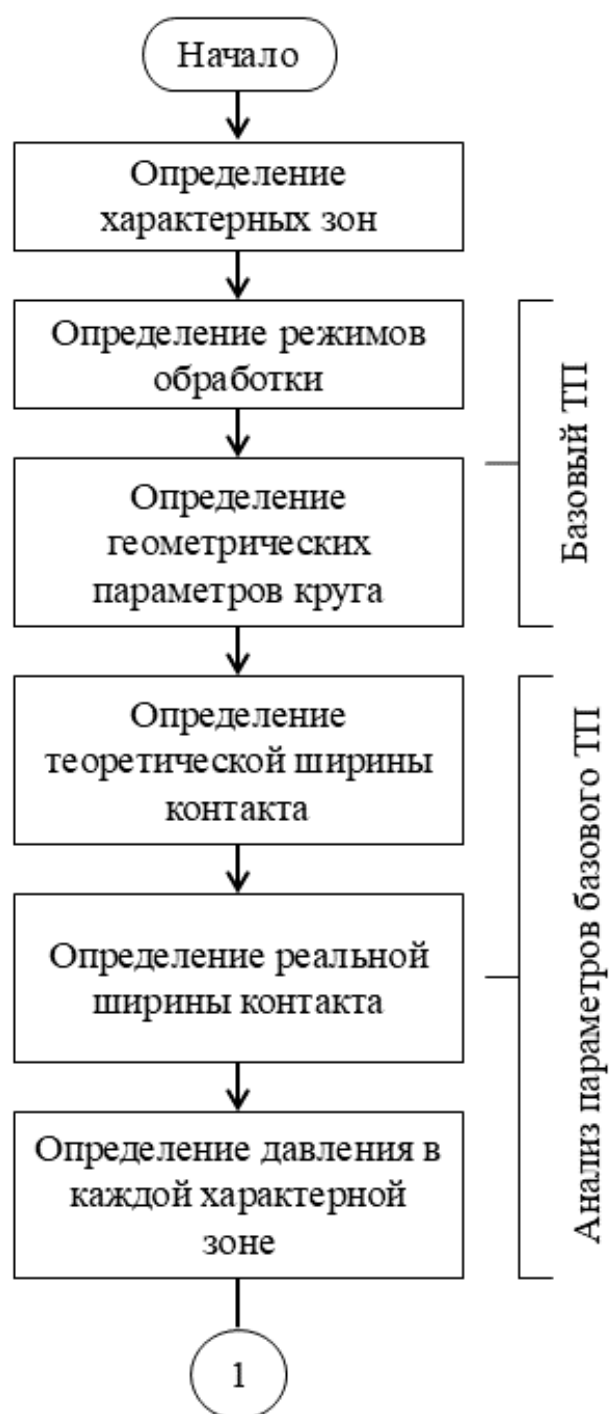


Рисунок 5.10 – Алгоритм обеспечения постоянства режимов процесса ОУО при обработке профиля ЛТ ГТД

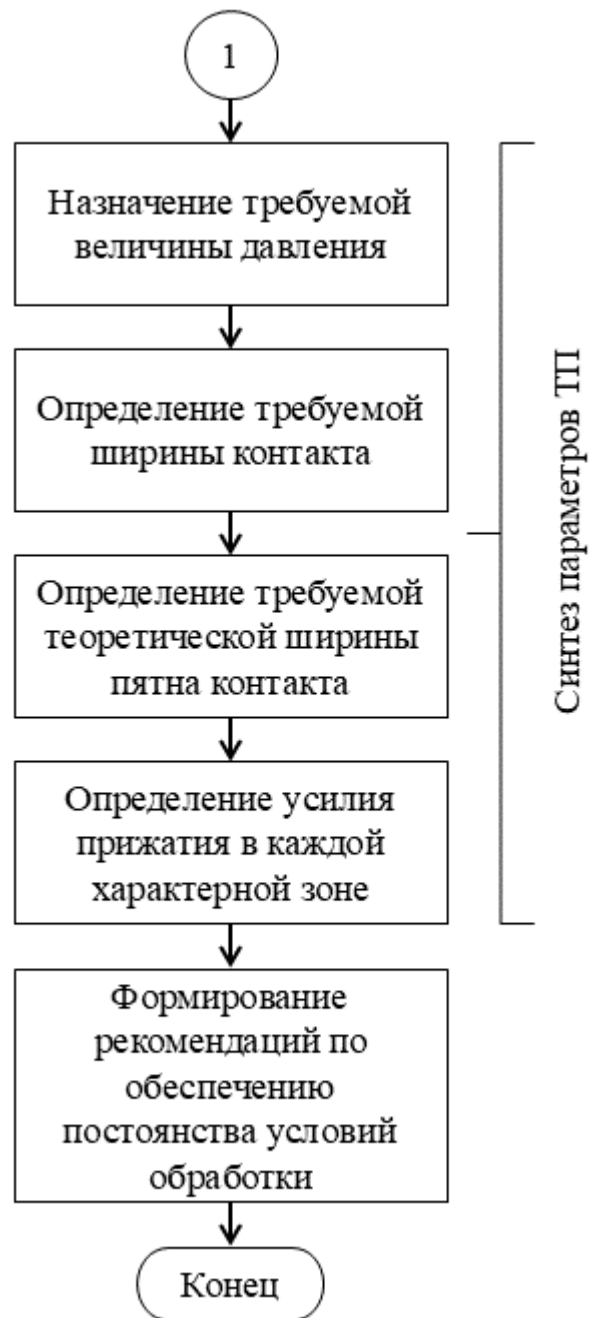


Рисунок 5.11 – Продолжение рисунка 5.10

1) Первым этапом является выделение характерных зон на профиле пера лопатки. Для этого можно использовать представленную ранее методику упрощения профиля [92].

2) Последующим этапом является определение режимов обработки, применяемого технологического оборудования и оснастки из базового технологического процесса, применяемого для изготовления рассматриваемой

детали, а именно вид обработки, тип, материал, и геометрические параметры полировального круга и т.д.

3) Анализ параметров обработки базового ТП путем последовательного определения теоретической полуширины пятна контакта, по уравнению (3.1, 3.4, 3.7-3.8) для соответствующей схемы обработки; определение реальной полуширины площадки контакта по номограмме (рисунок 5.9) и вычисление давления в каждой характерной зоне, которые были определены в шаге 1.

4) Синтез параметров нового ТП, гарантирующего обеспечение постоянства режимов процесса обработки. Процесс синтеза начинается с задания требуемой величины давления, которую необходимо будет обеспечить в каждой характерной зоне. После этого, исходя из требуемого давления определяем геометрические параметры пятна контакта, а именно его переменную составляющую – полуширину. После этого, по номограмме (рисунок 5.9) определяем расчетную полуширину пятна контакта, и определяем усилие прижатия в каждой характерной точке по формуле, полученной из уравнения (3.1):

$$P = \frac{\left(\frac{b}{1,128}\right)^2 \times l \times (R_{\text{л}} + R_{\text{п}})}{R_{\text{л}} R_{\text{п}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}}\right)}, \quad (5.9)$$

5) Завершающим этапом адаптации является формирование рекомендаций по обеспечению постоянства режимов процесса обработки в каждой характерной зоне профиля.

Результатом такой адаптации режимов обработки будет являться технологическая инструкция для обработки, при этом применяемое оборудование и основные элементы режимов обработки остаются неизменными, корректируется лишь величина прижима детали к полировальному кругу в каждой характерной точке профиля.

Рассмотрим процесс обеспечения постоянства режимов обработки при полировании профиля пера на примере лопатки 1-ой ступени турбины двигателя

ВК-2500П, геометрические параметры упрощенной модели которой представлены в таблице 5.5.

Задавшись усредненным значением давления, полученным из данных таблицы 5.5. принимаем значение давления равное 0,22 МПа. В соответствии с заданным давлением определяем требуемые параметры площади пятна контакта, для обеспечения заданного давления. При этом, по полученному расчетному значению полуширины площадки контакта b находим по номограмме (рисунок 5.9) теоретическое значение. Для каждой из характерных зон определим значения реального усилия прижима, исходя из расчетных значений давления и величины пятна контакта, подставив полученное теоретическое значение в формулу (5.9). Полученные значения для каждой характерной зоны, приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.5 – Геометрические параметры упрощенной модели лопатки 1-ой ступени турбины двигателя ВК-2500П

№ п/п	Наименование	Радиус, мм	Характеристики пятна контакта					Давление, МПа
			Теоретические		Приведенные		Площадь пятна контакта, мм ²	
			Полуширина b, мм	Ширина 2b, мм	Полуширина b, мм	Ширина 2b, мм		
1	Входная кромка	0,5	0,49	0,98	5,25	10,5	105	0,24
2	Спинка	41	3,11	6,22	7	14	140	0,18
3	Выходная кромка	1	0,68	1,36	5,5	11	110	0,23
* данные приведены для обработки полировальным кругом прямого профиля шириной 10 мм и диаметром 80 мм при усилии прижима 25 Н								

Соответственно полученным данным по усилиям прижима строим схему, с указанием характерных зон и величины требуемых воздействий, гарантирующих обеспечение постоянства режимов протекающего процесса обработки. Представленная схема приведена на рисунке 5.12 и может быть реализована как

при ручном, так и при механизированном способе обработки, путем применения специального приспособления, оснащенного динамометром или тензодатчиками.

Таблица 5.6 – Геометрические параметры пятна контакта в синтезируемом варианте ТП, и расчётные усилия прижима для их обеспечения

№ п/п	Наименование	Радиус, мм	Характеристики пятна контакта					Усилие прижима, Н
			Приведенные		Теоретические		Площадь пятна контакта, мм ²	
			Ширина 2b, мм	Полуширина b, мм	Ширина 2b, мм	Полуширина b, мм		
1	Входная кромка	0,5	11,36	5,68	2,42	1,21	113,63	151
2	Спинка	41						4
3	Выходная кромка	1						79

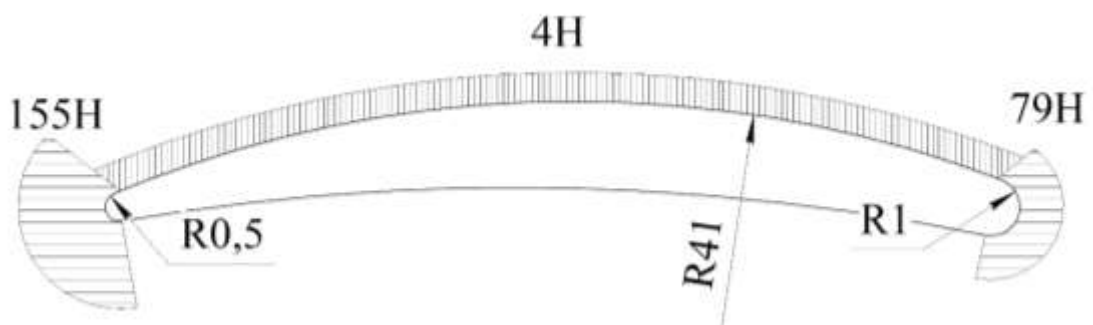


Рисунок 5.12 – Схема требуемых воздействий при обработке профиля ЛТ ГТД

При отделочной обработке ЛТ ГТД наблюдается существенное изменение возникающих максимальных напряжений, обусловленное сложным профилем и переменными удельными усилиями прижима. Проектирование технологического процесса с учетом этого непостоянства позволит обеспечить более равномерную обработку поверхности, без увеличения длительности обработки.

В качестве направлений для дальнейших исследований можно предложить применение рассматриваемой методики для повышения качества автоматизированной обработки лопаток ГТД. Однако, следует учитывать, что в этом исследовании такое применение не рассматривается, а предлагается как основа для выполнения дальнейших исследований.

С учётом результатов, полученных в работе, данная методика может быть применена при автоматизированной обработке ЛТ с применением манипуляторов или роботизированных технологических комплексов.

5.6 Внедрение результатов работы в производство

Выполненные в данной диссертационной работе исследования и полученные результаты направлены на повышение производительности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин ГТД, путем совершенствования технологического обеспечения и адаптации режимов обработки с целью придания всем функциональным элементам требуемых параметров обработки.

Для внедрения результатов исследования была разработана «Методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем» и составлена развернутая структура технологического процесса, направленного на повышение производительности ОУО ЛТ. Проведены эксперименты по подтверждению возможностей зональной ОУО с применением устройства для зонального поверхностного пластического упрочнения, которые подтвердили рациональность его применения, а также экспериментально доказана эффективность применения разработанных основ определения технологических параметров зоны обработки при полировании. Основываясь на полученных экспериментальных данных построена номограмма для определения величины полуширины площадки контакта, необходимой для

расчетов параметров пятна контакта полировального круга и обрабатываемой детали.

Разработанная «Методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем» внедрена в следующих организациях:

- АО «Горловский авторемонтный завод» (Донецкая Народная Республика, Российская Федерация);
- АО «Донецкий экспериментальный ремонтно-механический завод» (Донецкая Народная Республика, Российская Федерация);
- ГБУ «Проектно-конструкторский технологический институт» (до 12.03.2025 г. – ГУ «Проектно-конструкторский технологический институт») (Донецкая Народная Республика, Российская Федерация);
- Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Российская Федерация);
- ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (Донецкая Народная Республика, Российская Федерация).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-практическая задача, заключающаяся в установлении взаимосвязей процессов отделочной и упрочняющей обработки ЛТ ГТД и обеспечении повышения производительности их обработки за счёт применения функционально-ориентированной обработки, основанной на зональных технологических воздействиях.

По результатам работы сформулированы следующие выводы:

1. Установлено, что ЛТ ГТД в процессе эксплуатации подвергаются воздействию совокупности механических, термических и химических факторов, приводящих к неравномерному распределению эксплуатационных повреждений по профилю пера. Наибольшая концентрация повреждений характерна для входной и выходной кромок, а также поверхности корытца. Показано, что существующие методы отделочной и упрочняющей обработки обладают ограниченной универсальностью и эффективны лишь в определённых зонах и условиях эксплуатации, что обосновывает целесообразность применения комбинированных методов обработки с функционально-ориентированным зональным воздействием.

2. Разработана последовательность синтеза технологических методов комбинированной ОУО лопаток турбины ГТД и сформулированы принципы выбора их рациональных сочетаний с учётом геометрии пера и условий эксплуатации. На основе предложенной последовательности разработан подход к синтезу функционально-ориентированного технологического оснащения, включая полировальные инструменты для отделочной обработки и устройство для поверхностно-пластического упрочнения, обеспечивающий реализацию комбинированного технологического процесса.

3. Исследованы параметры и особенности разработанной схемы комбинированной ОУО, реализующей функционально-ориентированный подход к формированию свойств поверхностного слоя. Установлено, что учёт локальных

условий эксплуатации и зональное управление технологическими воздействиями обеспечивают целенаправленное формирование требуемых значений шероховатости, степени упрочнения и уровня остаточных напряжений в различных зонах профиля пера лопатки турбины ГТД.

4. Разработаны теоретические зависимости для определения технологических параметров зоны обработки, учитывающие сложную пространственную геометрию пера лопатки и непостоянство условий контакта с полировальным кругом. Разработана схема развернутой структуры технологического процесса повышения производительности ОУО ЛТ, определяющая достаточное и необходимое технологическое оснащение, требуемое для реализации разработанного технологического процесса.

5. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанных теоретических зависимостей и эффективность предложенной методики определения технологических параметров зоны обработки. На основе обработки экспериментальных данных установлена необходимость использования эмпирических коэффициентов, позволяющих учитывать реальные условия контакта инструмента и детали, по результатам чего построена номограмма для практического назначения параметров режимов обработки.

6. Разработана методика обеспечения постоянства режимов комбинированной ОУО деталей со сложным пространственным профилем, обеспечивающая стабилизацию условий формирования ФОС поверхностного слоя и повышение производительности процесса при соблюдении заданных требований к качеству функциональных элементов.

7. Результаты исследования внедрены в учебный процесс в филиале Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске и ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», а также используются в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах Государственного бюджетного учреждения «Проектно-конструкторский технологический институт» (до 12.03.2025 г. – ГУ «Проектно-конструкторский технологический институт»). Разработанная методика используется при проектировании технологических

процессов изготовления и ремонта деталей с сложным пространственным профилем, а также сложных поверхностей лопаточных машин в акционерном обществе «Горловский авторемонтный завод» (АО «ГАРЗ») и акционерном обществе «Донецкий экспериментальный ремонтно-механический завод» (АО «ДонЭРМ»). Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов исследования составляет 606000,00 рублей (шестьсот шесть тысяч рублей, 00 коп.).

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ

ГТД – газотурбинный двигатель;

ГТУ – газотурбинная установка;

ЛТ – лопатки турбины;

ОУО – отделочно-упрочняющая обработка;

ППД – поверхностно-пластическая деформация;

ППУ – поверхностно-пластическое упрочнение;

ТВ – технологические воздействия;

ТЗП – теплозащитные покрытия;

ТБП – термобарьерные покрытия;

ТО – технологическое оснащение;

ТП – технологический процесс;

ФОП – функционально-ориентированные покрытия;

ФОС – функционально-ориентированные свойства;

ФОТ – функционально-ориентированные технологии;

ФОТО – функционально-ориентированное технологическое обеспечение;

ФЭ – функциональный элемент;

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р ИСО 9000-2008** Основы менеджмента качества. Основные положения и словарь = Quality management systems – Fundamentals and vocabulary : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 декабря 2008 г. № 470-ст : введен взамен ГОСТ Р ИСО 9000-2001 / разработан Всероссийским научно-исследовательским институтом сертификации (ОАО «ВНИИС»). – Москва : Стандартинформ, 2009. – 35 с.

2. **ОСТ 1 02571-86** «Лопатки компрессора и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера». – Москва : Министерство промышленности, 1986. – 40 с.

3. **Патент № 2019575** С1 Российская Федерация, МПК С23С 14/32. Способ упрочнения инструмента и деталей: № 4946247/21 : заявл. 17.06.1991 : опубл. 15.09.1994 / Стрелюхин В. А., Базыма В. И., Абрагимович В. В.; заявитель Производственное объединение по шестерням "Минсктракторозапчасть".

4. **Патент № 2228387** С2 Российская Федерация, МКП С23С 14/06, 14/48. Способ нанесения покрытия на металлические изделия: №2002119793/02 : заявл. 22.07.2002 : опубл. 10.05.2004 / Падеров А. Н., Векспер Ю. Г. – 8 с. : ил.

5. **Патент № 2533223** С1 Российская Федерация, МКП В23Н 9/10 С23С 4/04, 14/06. Способ обработки лопатки газотурбинного двигателя: №2013121967/02 : заявл. 13.05.2013 : опубл. 20.11.2014 / Смыслов А. М., Ганцев Р. Х., Галиев В. Э., Мингажев А. Д., Таминдаров Д. Р., Фаткуллина Д. З. – 12 с. : ил.

6. **Патент № 2718877** С2 Российская Федерация, МКП С23С 14/04, 14/22. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя: №2018107164 : заявл. 26.02.2018 : опубл. 15.04.2020 / Михайлов А. Н., Михайлов Д. А., Михайлов В. А., Шейко Е. А., Пичко А. П., Пичко Н. С., Сухарев В. И. – 11 с. : ил.

7. **Абраимов, Н. В.** Авиационное материаловедение и технология обработки металлов : учебное пособие для авиационных вузов / Н. В. Абраимов, Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов. – Москва : Высшая школа, 1998. – 444 с., ил.

8. **Авдеев, Н. В.** Теория и практика металлизации / Н. В. Авдеев. – Ташкент : «ФАН», 1978. – 76 с.

9. **Амуи, А. М.** Выбор метода нанесения защитного покрытия / А. М. Амуи, Г. Р. Мирхосейни, А. Джафари, А. И. Тарасов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2016. – № 225(3). – С. 5–8.

10. **Ануров, Ю. М.** Обеспечение показателей ресурса и надежности ГТД стационарного применения / Ю. М. Ануров, В. А. Коваль, А. А. Халатов [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 3. – № 10(51). – С. 4–11.

11. **Аппен, А. А.** Температуроустойчивые неорганические покрытия / А. А. Аппен. – Ленинград : Химия, 1976. – 296 с.

12. **Ахметшина, Э. Р.** Обзор. Виды повреждений и ремонт деталей газотурбинного двигателя / Э. Р. Ахметшина, Ф. Н. Куртаева // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики "АНТЭ-2015" : Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции, Казань, 19–21 октября 2015 года / Министерство образования и науки Российской Федерации Российский фонд фундаментальных исследований Министерство образования и науки Республики Татарстан Академия наук Республики Татарстан КНИТУ-КАИ Лаборатория МФТП. – Казань, 2015. – С. 203–209.

13. **Бабичев, А. П.** Физико-технологические основы методов обработки : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов "Конструк.-технол. обеспечение машиностроит. пр-в" / М-во образования Рос. Федерации, Дон. гос. техн. ун-т ; [А. П. Бабичев и др.] ; под ред. А. П. Бабичева. – Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2003. – 429 с.

14. **Базров, Б. М.** Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. / Б. М. Базров. – Москва : Машиностроение, 2005. – 736 с.

15. **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. Богданочив, И. А. Докукина, В. М. Карасёв // Вестник СГАУ. – 2009. – № 3(19). С. 11–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/srabatyvaemye-iznosostoykie-i-teplozaschitnye-pokrytiya-dlya-detaley-gazovogo-trakta-turbiny-kompressora-i-kamery-sgoraniya-gtd> (дата обращения: 14.01.2026).

16. **Бартенев, С. С.** Детонационные покрытия в машиностроении / С. С. Бартенев, Ю. П. Федько, А. И. Григоров. – Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1982. – 215 с.

17. **Бекнев, В. С.** Турбомашины и МГД-генераторы газотурбинных и комбинированных установок : учебное пособие / В. С. Бекнев, В. Е. Михальцев, А. Б. Шабаров, Р. А. Янсоп. – Москва : Машиностроение, 1983. – 392 с.

18. **Берж, К.** Теория графов и ее применения / К. Берж. – Москва : Иностранная литература, 1962. – 320 с.

19. **Биргер, И. А.** Расчет на прочность деталей машин : Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – Москва : Машиностроение, 1993. – 640 с.

20. **Биркгоф, Г.** Теория структур / Г. Биркгоф. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1952, – 407 с.

21. **Богуслаев, В. А.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. [монография] / В. А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.

22. **Богуслаев, В. А.** Финишные технологии обработки деталей ГТД / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой – Вестник двигателестроения. – 2009. – №1. – С. 71–78. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/finishnye-tehnologii-obrabotki-detaley-gtd> (дата обращения: 14.01.2026).

23. **Бойцов, А. Г.** Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей / А. Г. Бойцов, А. П. Ковалев,

А. С. Новиков [и др.]. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2007. – 584 с.

24. **Боровский, Г. В.** Газонепроницаемые PVD-покрытия / Г. В. Боровский, С. В. Григорьев, С. У. Молодык // Наноиндустрия. – 2015. – № 3(57). – С. 40–43.

25. **Будилов, В. В.** Исследование зависимости микротвердости и фазового состава покрытия TiN от расположения деталей в вакуумной камере при осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда / В. В. Будилов, И. И. Ягафаров, М. И. Янсаитова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 1(145). – С. 20–23.

26. **Будиновский, С. А.** Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор) / С. А. Будиновский, Д. А. Чубаров, П. В. Матвеев // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S5. – С. 38–44.

27. **Быбин, А. А.** Повышение качества газотермических покрытий для лопаток газовых турбин / А. А. Быбин, А. В. Новиков // Materials. Technologies. Design. – 2020. – Т. 2. – № 1(2). – С. 15–22.

28. **Волков, Д. И.** Адаптивное ленточное шлифование лопаток ГТД на многокоординатном станочном оборудовании / Д. И. Волков, А. А. Коряжкин // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2013. – № 1(24). – С. 42–48.

29. **Волков, Д. И.** Назначение и способы нанесения износостойких покрытий режущего инструмент: конспект лекций. Учебное пособие / Д. И. Волков ; РГАТУ им. П. А. Соловьева. – Рыбинск, 2015. – 34 с.

30. **Гаямов, А. М.** Теплозащитные покрытия для рабочих лопаток турбин ГТД из жаропрочных никелевых сплавов, получаемые вакуумно-дуговым и магнетронным ионно-плазменными методами / А. М. Гаямов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. – № 1. – С. 4–12.

31. **Герасимов, В. В.** От монокристаллических неохлаждаемых лопаток к лопаткам турбин с проникающим (транспирационным) охлаждением, изготовленным по аддитивным технологиям (обзор по технологии литья

монокристаллических лопаток ГТД) / В. В. Герасимов // Труды ВИАМ. – 2016. – № 10(46). – С. 1. – DOI 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1.

32. **Герасимов, В. В.** Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава / В. В. Герасимов, Н. В. Петрушин, Е. М. Висик // Труды ВИАМ. – 2015. – № 3. – С. 3–13.

33. **Гецов, Л. Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин. / Л. Б. Гецов. – Москва : Недра, 1996. – 591 с.

34. **Гончаров, В. С.** Методы упрочнения конструкционных материалов. Функциональные покрытия : учебное пособие / В. С. Гончаров. – Тольятти : ТГУ, 2017. – 205 с.

35. **Давыдов, М. Н.** Моделирование долговечности лопаток турбин в условиях коррозионно-активной среды / М. Н. Давыдов, А. С. Гишваров, А. Х. Рахимов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2016. – Т. 20. – № 1(71). – С. 71–80.

36. **Демин, Ф. И.** Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев – Самара : СГАУ, 2012. – 324 с.

37. **Докукина, В. А.** Разработка технологии плазменного напыления по ремонту, восстановлению и упрочнению деталей энергетических агрегатов / И. А. Докукина, В. А. Барвинок, В. И. Богданович [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4–2. – С. 352–356.

38. **Долматов, А. И.** Восстановление лопаток компрессора авиационных газотурбинных двигателей / А. И. Долматов, С. В. Сергеев, И. В. Зорик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 10(57). – С. 46–49.

39. **Дубынин, П. А.** Использование метода направленной кристаллизации лопаток турбин ТНА / П. А. Дубынин, И. А. Клешина, В. Г. Яцуненко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 1. – № 13. – С. 292–294.

40. **Елкин, М. С.** Применение систем инженерного анализа при реализации механической обработки лопатки турбины ГТД методом глубинного шлифования на многокоординатном оборудовании / М. С. Елкин, А. В. Кордюков, И. В. Пашков // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2023. – № 4(67). – С. 53–57.

41. **Жадкевич, А. М.** Применение восстановительных технологий для повышения ресурса газотурбинных двигателей (анализ состояния и развития). / А. М. Жадкевич // Автоматическая сварка. – 2006. – №5. – С. 44–49.

42. **Завалишин, И. В.** Особенности технологической подготовки производства деталей турбины газотурбинного двигателя / И. В. Завалишин, А. Г. Финогеев. – Текст: электронный // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. – №6. – С. 1–11. – URL: <http://trudymai.ru/upload/iblock/6cc/osobennosti-tekhnologicheskoy-podgotovki-proizvodstva-detaley-turbiny-gazoturbinnogo-dvigatelya.pdf> (дата обращения 14.01.2026).

43. **Замковой, В. Е.** Защитные покрытия для рабочих лопаток турбины ГТД / В. Е. Замковой, В. Г. Малышева, О. А. Корогод // Вестник двигателестроения. – 2006. – №4. – С. 37–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschitnye-pokrytiya-dlya-rabochih-lopatok-turbiny-gtd> (дата обращения: 14.01.2026).

44. **Ивановский, Г. Ф.** Ионно-плазменная обработка материалов / Г. Ф. Ивановский, В. И. Петров. – Москва : Радио и связь, 1986. – 232 с.

45. **Ильин, В. А.** Алюминиевые покрытия и способы их получения / В. А. Ильин, А. В. Панарин // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – №4 (33). С. 37–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/alyuminievye-pokrytiya-i-sposoby-ih-polucheniya> (дата обращения: 14.01.2026).

46. **Иноземцев, А. А.** Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь : ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.

47. **Каблов, Е. Н.** Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. Н. Луценко // Металлы. – 2007. – №5. – С. 23–34.

48. **Каблов, Е. Н.** Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 60–70.

49. **Каблов, Е. Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей : Сплавы, технологии, покрытия / Е. Н. Каблов. – Москва : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2001. – 632 с.

50. **Каблов, Е. Н.** Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизации / Е. Н. Каблов // *Газотурбинные технологии*. – 2000. – № 3(6). – С. 10–13.

51. **Каблов, Е. Н.** Технологические особенности получения монокристаллических образцов и турбинных лопаток из высокорениевых жаропрочных сплавов на установках УВНК-9 и ВИАМ-1790 / Е. Н. Каблов, В. В. Герасимов, Е. М. Висик // *Авиационные материалы и технологии*. – 2004. – № 1. – С. 91–97.

52. **Качан, А. Я.** Критерии оценки выходных параметров процессов обработки деталей ГТД / А. Я. Качан, С. А. Уланов // *Вестник двигателестроения*. – 2016. – № 2. – С. 181–184.

53. **Качан, А. Я.** Определение оптимальной глубины пластически деформированного слоя при ППД деталей / А. Я. Качан, С. А. Уланов // *Теоретические и прикладные проблемы создания авиационных двигателей и энергетических установок: тез. докл. междунар. научно-техн. конф., 16-17 октября 2014 г., г. Запорожье / АО «Мотор Сич»*. – Запорожье, 2014. – С. 64–66.

54. **Качан, А. Я.** Отделочно-упрочняющие технологии обработки лопаток моноколес современных газотурбинных двигателей / А. Я. Качан, А. В. Богуслаев, Д. В. Павленко, С. В. Мозговой // *Вестник двигателестроения*. – 2010. – № 1. – С. 81–90.

55. **Качан, А. Я.** Технологическое обеспечение несущей способности деталей ГТД пластическим деформированием / А. Я. Качан, С. А. Уланов,

Е. К. Березовский // Обработка металлов давлением. – 2015. – № 2 (41). – С. 141–146.

56. **Кесаев, И. Г.** Катодные процессы электрической дуги / И. Г. Кесаев. – Москва : Наука, 1968. – 244с.

57. **Кирюханцев-Корнеев, Ф. В.** Структура и свойства Ti-Si-п-покрытий, полученных магнетронным распылением СВС-мишеней / Ф. В. Кирюханцев-Корнеев, Д. В. Штанский, А. Н. Шевейко [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т. 97. – № 3. – С. 96–103.

58. **Киселев, С. П.** Полирование металлов / С. П. Киселев – Москва : Машгиз, 1961. – 74 с.

59. **Клауч, Д. Н.** Технологические методы повышения качества изготовления и ресурса работы турбинных лопаток / Д. Н. Клауч, А. Н. Овсеенко, Г. Г. Овумян [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2008. – № 4(24). – С. 49–53.

60. **Костржицкий, А. И.** Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А. И. Костржицкий, В. Ф. Карпов, М. П. Кабанченко [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1991. – 176 с.

61. **Косьмин, А. А.** Жаро- и коррозионностойкое покрытие для рабочих лопаток турбины из перспективного жаропрочного сплава ВЖЛ21 / А. А. Косьмин, С. А. Будиновский, С. А. Мубояджян // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 1(46). – С. 17–24. – DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24.

62. **Кравченко, И. Б.** Современные методы упрочнения и их влияние на усталостные характеристики деталей газотурбинных двигателей / И. Б. Кравченко, В. Н. Курицин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 1-2. – С. 385–388.

63. **Кривобоков, В. П.** Плазменные покрытия (методы и оборудование): учебное пособие / В. П. Кривобоков, Н. С. Сочугов, А. А. Соловьев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 104 с.

64. **Кривобоков, В. П.** Плазменные покрытия (свойства и применение): учебное пособие / В. П. Кривобоков, Н. С. Сочугов, А. А. Соловьев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.

65. **Кротинов, Н. Б.** Перспективы термопластического упрочнения лопаток авиационных газотурбинных двигателей / Н. Б. Кротинов // Самолетостроение России. Проблемы и перспективы : Симпозиум с международным участием, 2–5 июля 2012 г., г. Самара / Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). – Самара, 2012. – С. 236–237.

66. **Кротинов, Н. Б.** Поверхностное пластическое упрочнение лопаток газотурбинных двигателей. / Н. Б. Кротинов // Вестник СГТУ. – 2014. – №3(76). – С. 68–71.

67. **Кротинов, Н. Б.** Продление ресурса лопаток газотурбинных двигателей упрочняющей обработкой / Н. Б. Кротинов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – №5. – С. 221–224.

68. **Крымов, В. В.** Производство газотурбинных двигателей / В. В. Крымов, Ю. С. Елисеев, К. И. Зудин – Москва : Машиностроение-Полет, 2002. – 376 с.

69. **Кузьмина, Н. Ю.** Анализ методов поверхностного упрочнения / Н. Ю. Кузьмина // Инновации в технологиях и образовании : Сборник статей участников XI международной научно-практической конференции, 28–29 апреля 2018 г., г. Белово / Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева ; отв. ред. Л. И. Законнова. – Белово, 2018. – С. 146–150.

70. **Лобанов, М. Л.** Защитные покрытия: учебное пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских; [науч. ред. Ю. Г. Эйсмонт]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.

71. **Локтев, Д. А.** Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий / Д. А. Локтев, Е. А. Ямашкин // Наноиндустрия. – 2007. – № 4. – С. 18–25.

72. **Макаров, А. Д.** Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов. / А. Д. Макаров. В. С. Мухин, Л. Ш. Шустер. – Уфа, 1974. – 372 с.

73. **Макаров, В. Ф.** Оптимизация процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В. Ф. Макаров, Е. Н. Бычина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4–3(288). – С. 41–47.

74. **Макаров, В. Ф.** Повышение надежности и качества изделий на основе снижения влияния локальных технологических концентраторов напряжений в обрабатываемых деталях / В. Ф. Макаров, С. П. Никитин, М. В. Песин, А. С. Горбунов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2017. – Т. 2. – С. 216–221.

75. **Макаров, В. Ф.** Проблемы автоматизации финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток ГТД / В. Ф. Макаров, В. А. Жукотский, Е. Н. Бычина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8–2. – С. 52–55.

76. **Макаров, В. Ф.** Разработка высокоэффективных технологических процессов обработки деталей газотурбинных двигателей для авиации и наземных установок / В. Ф. Макаров // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2017. – № 1(40). – С. 159–166.

77. **Макаров, В. Ф.** Разработка и применение новых инновационных технологий при производстве современных газотурбинных двигателей / В. Ф. Макаров // Научно-технические проблемы машиностроения. – 2017. – № 7(73). – С. 33–41.

78. **Машеков, С. А.** Проблемы штамповки турбинных лопаток из титановых сплавов и пути их решения / С. А. Машеков, К. К. Нурахметова // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2017. – № 1. – С. 21–25.

79. **Машошин, О. Ф.** Рабочие лопатки авиационных ГТД: конструкция, прочность, эксплуатация. Учебное пособие для обучающихся по направлениям подготовки 25.03.01, 25.04.01. / О. Ф. Машошин. – Москва : МГТУ ГА, 2017. – 80с.

80. **Медведев, С. Д.** Повышение эксплуатационной надежности ГПА развитием конвертированных авиационных технологий / С. Д. Медведев [и др.]. – Самара : СНЦ РАН, 2008. – 370 с.

81. **Михайлов, А. Н.** Адаптация технологического обеспечения для поверхностно-пластического упрочнения функциональных элементов лопаток турбины ГТД / А. Н. Михайлов, **А. В. Анастасьев**, Н. С. Пичко // Механики XXI века. – 2024. – № 23. – С. 245–249.

82. **Михайлов, А. Н.** Анализ влияния деструктивных факторов на выход из строя лопаток турбины ГТД и локализация зон их действия / А. Н. Михайлов, **А. В. Анастасьев**, Н. С. Пичко // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : Материалы Шестой национальной (всероссийской) научно-технической конференции, 9–10 ноября 2023 г., г. Петропавловск-Камчатский / Камчатский государственный технический университет. – Петропавловск-Камчатский, – 2024. – С. 111–113.

83. **Михайлов, А. Н.** Испытание экспериментального устройства поверхностно-пластического упрочнения при обработке сложных пространственных поверхностей / А. Н. Михайлов, **А. В. Анастасьев**, Н. С. Пичко // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, 4–5 апреля 2024 г., г. Екатеринбург / Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2024. – С. 330–333.

84. **Михайлов, А. Н.** Новые тенденции развития технологии машиностроения: конспект лекций / А. Н. Михайлов. – Донецк : ДонНТУ, 2008. – 160 с.

85. **Михайлов, А. Н.** Новые тенденции в повышении ресурса газотурбинных двигателей и установок на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.] // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : Материалы международной научно-технической конференции: в 2-х частях, 17–19 октября 2018 г., г. Петропавловск-Камчатский / Камчатский государственный технический

университет ; отв. выпуск О.А. Белов. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 106–111.

86. **Михайлов, А. Н.** Основные особенности и принципы создания композиционных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Михайлова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2012. – № 1(43). – С. 206–222.

87. **Михайлов А. Н.** Обеспечение постоянства контактной нагрузки при полировании сложного профиля пера лопатки турбины ГТД / А. Н. Михайлов, **А. В. Анастасьев**, Н. С. Пичко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2023. – № 2(81). – С. 26–34.

88. **Михайлов, А. Н.** Основы синтеза композиционных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов, Е. А. Михайлова, Д. А. Михайлов // Вестник Национального университета «Львовская политехника». – 2011. – № 713. – С. 23–31.

89. **Михайлов, А. Н.** Основы синтеза механизма повышения ресурса лопаток турбины газотурбинного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / А. Н. Михайлов, **А. В. Анастасьев**, Н. С. Пичко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2022. – № 4(79). – С. 35–43.

90. **Михайлов, А. Н.** Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов ; А. Н. Михайлов. – Донецк : Технополис, 2009. – 346 с.

91. **Михайлов, А. Н.** Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационного двигателя на базе функционально-ориентированной технологии / А. Н. Михайлов, Т. В. Хавлин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 1(56). – С. 84–100.

92. **Михайлов, А. Н.** Построение упрощенного профиля пера лопатки турбины ГТД / А. Н. Михайлов, **А. В. Анастасьев**, Н. С. Пичко // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, 6–7 апреля 2023 г., г. Екатеринбург /

Уральский государственный горный университет ; под общей редакцией Ю. А. Лагуновой ; оргкомитет: Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов. – Екатеринбург, 2023. – С. 305–308.

93. **Михайлов, А. Н.** Синтез функционально-ориентированного технологического обеспечения для поверхностно-пластического упрочнения лопаток ГТД / А. Н. Михайлов, **А. В. Анастасьев**, Н. С. Пичко // Высокие технологии в машиностроении : Материалы XXI всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 10–12 апреля 2024 г., г. Самара / Самарский государственный технический университет. – Самара, 2024. – С. 175–179.

94. **Михайлов, А. Н.** Функционально-ориентированные покрытия для повышения эксплуатационных свойств деталей машин / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Р. М. Грубка, М. Г. Петров. // Машиностроение и техносфера XXI века : Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, 14–19 сентября 2015 г., г. Севастополь / ФГБОУ ВО «ДонНТУ». – Донецк, 2015. – Т. 2. – 259 с

95. **Михайлов, А. Н.** Экспериментальное подтверждение адекватности применения контактной задачи Герца при определении пятна контакта полировального круга / А. Н. Михайлов, **А. В. Анастасьев**, Н. С. Пичко // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 9–10 ноября 2023 г., г. Самара / Самарский государственный технический университет. – Самара, 2023. – С. 84–88.

96. **Михайлов, В. А.** Общие основы и принципы повышения ресурса газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов, А. П. Пичко, А. В. Чугункин [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 3(58). – С. 32–43.

97. **Михайлов, В. А.** Основные принципы синтеза функционально-ориентированных покрытий изделий машиностроения / В. А. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века : Сборник трудов XII международной

научно-технической конференции, 12-17 сентября 2005 г., г. Севастополь / «ДонНТУ». – Донецк, – 2005. – Т. 2. – С. 277–280.

98. **Михайлов, Д. А.** Методика и алгоритм синтеза технологического обеспечения комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора газотурбинной установки / Д. А. Михайлов, А. П. Пичко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – № 2(65). – С. 16–25.

99. **Михайлов, Д. А.** Методика синтеза связного технологического процесса формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия лопаток газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – № 4(71). – С. 44–63.

100. **Михайлов, Д. А.** Некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток ГТД из титановых сплавов / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2014. – № 3(49). – С. 120–127.

101. **Михайлов, Д. А.** Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. – № 1(72). – С. 40–57.

102. **Михайлов, Д. А.** Общий подход синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века : Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции. Посвящается 100-летнему юбилею ДОННТУ, 14–20 сентября 2020 г., г. Севастополь / ФГБОУ ВО «ДонНТУ». – Донецк, 2020. – С. 235–253.

103. **Михайлов, Д. А.** Особенности структурирования многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинных двигателей /

Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – № 2(69). – С. 36–49.

104. **Михайлов, Д. А.** Особенности формирования параметров многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – № 3(70). – С. 34–44.

105. **Михальцев, В. Е.** Теория и проектирование газовой турбины: учебное пособие по курсу «Лопаточные машины газотурбинных и комбинированных установок. Газовые турбины». – Ч.1: Теория и проектирование ступени газовой турбины / Михальцев В. Е., Моляков В. Д., – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 104 с.

106. **Москвитин, Г. В.** Современные упрочняющие покрытия критических деталей механизмов и инструмента / Г. В. Москвитин, Е. М. Биргер, А. Н. Поляков, Г. Н. Полякова // Металлообработка. – 2015. – № 2(86). – С. 22–27.

107. **Мубаракшин, Р. М.** Оптимизация вариантов технологий и методов шлифования лопаток газотурбинных двигателей / Р. М. Мубаракшин // Технология машиностроения. – 2018. – № 2. – С. 10–19.

108. **Мубаракшин, Р. М.** Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток / Р. М. Мубаракшин, М. Д. Дическул, Н. Н. Николаев [и др.] // Авиационные двигатели. – 2021. – № 4(13). – С. 51–62. – DOI 10.54349/26586061_2021_4_51.

109. **Мубояджян, С. А.** Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование / С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – №5. – С. 39–54. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ionno-plazmennaya-tehnologiya-perspektivnye-protsessy-pokrytiya-oborudovanie> (дата обращения: 14.01.2026).

110. **Мубояджян, С. А.** Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. / С. А. Мубояджян, В. П. Лесников, В. П. Кузнецов. – Екатеринбург : «Квист», 2008. – 208 с.

111. **Мубояджян, С. А.** Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий / С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. М. Гаямов, П. В. Матвеев // *Авиационные материалы и технологии*. – 2013. – № 1(26). – С. 17–20.

112. **Мубояджян, С. А.** Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД / С. А. Мубояджян // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2011. – № 3. – С. 26–30.

113. **Налимов, Ю. С.** Анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей / Ю. С. Налимов // *Металл и литье Украины*. – 2014. – № 12. – С. 17–22

114. **Ненашев, М. В.** Технология и свойства наноструктурированных детонационных покрытий / М. В. Ненашев, Д. А. Деморецкий, И. Д. Ибатуллин [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13. – № 1-2. – С. 390–393.

115. **Нечаев, Ю. Н.** Теория авиационных газотурбинных двигателей / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров. – Москва : Машиностроение, 1977. – 312 с.

116. **Никитин, М. М.** Технология и оборудование вакуумного напыления / М. М. Никитин. – Москва : Металлургия, 1992. – 112 с.

117. **Новиков, В. А.** Технология производства и монтажа паровых и газовых турбин: учебное пособие. / В. А. Новиков. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – 670 с.

118. **Ножницкий, Ю. А.** Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоев / Ю. А. Ножницкий, А. В. Фишгойт, Р. И. Ткаченко, С. В. Теплова // *Вестник двигателестроения*. – 2006. – №2. – С. 8–16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-primenenie-novyh-metodov-uprochneniya-detaley-gtd-osnovannyh-na-plasticheskom-deformirovanii-poverhnostnyh-sloev-obzor> (дата обращения: 14.01.2026).

119. **Ножницкий, Ю. А.** Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей / Под ред. Ю. А. Ножницкого, Б. Ф. Шорра, И. Н. Долгополова. – Москва : ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 456 с.

120. Обеспечение эффективности технологических решений в производстве лопаток компрессора ГТД: учебное пособие для высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированного специалиста 160300 "Двигатели летательных аппаратов" по специальности 169301 "Авиационные двигатели и энергетические установки" / В. Ф. Безъязычный и др. ; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного ; [Минобрнауки, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Рыбинская гос. авиационная технологическая акад. им. П. А. Соловьева"]. – Москва : Машиностроение, 2011. – 199 с.

121. **Опокин, В. Г.** Анализ применения теплозащитных покрытий на рабочих лопатках турбины современных авиационных ГТД / В. Г. Опокин, Р. Г. Равилов, В. М. Самойленко, Г. Н. Настас // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2012. – № 1. – С. 3–5.

122. **Оре, О.** Теория графов / О. Оре. – Москва : Наука, 1980. – 336 с.

123. **Панков, В. П.** Исследования комбинированных жаростойких покрытий лопаток турбин газотурбинных двигателей / В. П. Панков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 3(135). – С. 26–30.

124. **Пантелеенко, Ф. И.** Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый. – Минск : БНТУ, 2019. – 231 с.

125. **Петрова, М. А.** Анализ условий работы поверхностных слоев рабочих лопаток турбины современных двигателей / М. А. Петрова, М. Саадатибаи, А. И. Тарасов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2015. – № 217(7). – С. 124–127.

126. **Пивоварова, М. В.** Ресурс деталей газотурбинных двигателей в условиях воздействия коррозионных сред / М. В. Пивоварова, И. Л. Гладкий // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, – 2019. – Т18, – №3. – С. 109–117. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-109–117

127. **Писаренко, Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев, – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наук. думка, 1988. – 736 с.

128. **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, Т. В. Хавлин [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – № 1(64). – С. 68–76.

129. **Полетаев, В. А.** Особенности автоматизированной механической обработки лопаток турбин / В. А. Полетаев, Е. В. Цветков // СТИН. – 2014. – № 9. – С. 20–23.

130. **Полетаев, В. В.** Основные технологические принципы автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В. В. Полетаев // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2012. – № 1(22). – С. 165–171.

131. **Полетаев, В. А.** Проектирование технологических операций автоматизированной обработки лопаток турбин / В. А. Полетаев // Сборник научных трудов SWorld. – 2013. – Т. 11, № 3. – С. 28–36.

132. **Придорожный, Р. П.** Расчетная оценка эффективности применения теплозащитных покрытий на охлаждаемых рабочих лопатках турбин высокого давления авиационных газотурбинных двигателей / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский // Вестник двигателестроения. – 2014. – №1. – С. 52–56. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnaya-otsenka-effektivnosti-primeneniya-teplozaschitnyh-pokrytiy-na-ohlazhdaemyh-rabochih-lopatkah-turbin-vysokogo-davleniya> (дата обращения: 14.01.2026).

133. **Салимзянова, А. Х.** Исследование теплового и прочностного состояния охлаждаемой рабочей лопатки турбины высокого давления / А. А. Салимзянова, А. Х. Рахимов, Г. Ф. Спиридонов [и др.] // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2020. – № 1(22). – С. 129–132.

134. **Семенов, А. Н.** Повышение производительности и качества обработки лопаток газотурбинного двигателя за счет оптимизации схемы базирования / А. Н. Семенов, И. В. Пашков // Электрофизические методы обработки в современной промышленности : Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, 14–15 декабря 2020 г., г. Пермь / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь, 2021. – С. 254–256.

135. **Семенов, А. Н.** Повышение эффективности механической обработки лопаток компрессора ГТД путем совершенствования условий и технологического оснащения / А. Н. Семенов, П. И. Фролов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2019. – № 4(51). – С. 53–56.

136. **Сергеев, С. В.** Анализ способов отделочно-упрочняющей обработки поверхности деталей ГТД свободным абразивом / С. В. Сергеев, Т. В. Лоза, А. П. Петренко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2013. – №4(76). – С. 80–88.

137. **Силуянова, М. В.** Исследование характерных повреждений авиационных газотурбинных двигателей типа SAM 146 / М. В. Силуянова, В. В. Курицына, Т. Р. Дзгоев // Наука России: цели и задачи : Сборник научных трудов по материалам XXI международной научной конференции, 10 июня 2020 г., г. Екатеринбург / НИЦ «Л-Журнал». – Екатеринбург, 2020. – С. 24–26. – DOI 10.18411/sr-10-06-2020-24.

138. **Сиротин, Н. Н.** Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей. (Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок). / Н. Н. Сиротин. – Москва : РИА «ИМ-Информ», 2002. – 442 с.

139. **Скрябин, В. А.** Повышение эффективности шлифования ёлочных замковых соединений лопаток турбокомпрессоров / В. А. Скрябин // Вестник Мордовского университета. – 2015. – Т. 25, № 1. – С. 71–81. – DOI 10.15507/VMU.025.201501.071.

140. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Г. С. Скубачевский. – Москва : «Машиностроение», 1974. – 520 с.
141. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – Москва : Машиностроение, 2002. – 300 с.
142. **Степанова, Т. Ю.** Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т. Ю. Степанова – Иваново. 2009. – 64с.
143. **Стечкин, Б. С.** Теория реактивных двигателей / Б. С. Стечкин, П. К. Казанджан, Л. П. Алексеев [и др.]. – Оборонгиз, 1956. – 549 с.
144. **Смыслов, А. М.** Технология защитно-упрочняющей обработки деталей ГТД. / А. М. Смыслов [и др.]. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Уфа : Уфимск.гос.авиацион.техн.ун-т., 2015. – 262 с.
145. **Соболь, О. В.** Апробация структурного подхода для оптимизации режимов получения покрытий повышающих износостойкость лопаток турбин. / О.В. Соболь [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №2(74). – С. 53–59.
146. **Соколов, А. Г.** Инженерия поверхности и технологии повышения эксплуатационных свойств изделий из металлических сплавов: учебное пособие / А. Г. Соколов. – Москва : Инфра-Инженерия, 2021. – 304 с.
147. **Солнцев, С. С.** Высокотемпературные покрытия на основе золь-гель технологии / С. С. Солнцев, В. А. Розененкова, Н. А. Миронова, Г. А. Соловьева // Труды ВИАМ. – 2014. – № 1. – С. 4–14.
148. **Суслов, А. Г.** Наукоемкие технологии в машиностроении / А. Г. Суслов, Б. М. Базров, В. Ф. Безъязычный и др.; под ред. А. Г. Суслова. – Москва : Машиностроение, 2012. – 528 с.
149. **Суслов, А. Г.** Научные основы технологии машиностроения. / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – Москва : Машиностроение, 2002. – 684 с.
150. **Суслов, А. Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. / А. Г. Суслов. – Москва : Машиностроение, 2000. – 320 с.

151. **Сутягин, А. Н.** Современные проблемы технологии производства авиационных двигателей: конспект лекций / А. Н. Сутягин. – Рыбинск : РГАТУ, 2016. – 142 с.
152. **Тихонов, А. М.** Регенерация тепла в авиационных ГТД / А. М. Тихонов. – Москва : Машиностроение, 1979. – 108 с.
153. **Тихонов, А. С.** Внедрение технологий "цифрового двойника" применительно к оптимизации теплового состояния и повышению ресурса охлаждаемых лопаток промышленных ГТУ / А. С. Тихонов, А. Ю. Тамм, А. В. Пивоварска // Газотурбинные технологии. – 2018. – № 6(157). – С. 34–37.
154. **Трощенко, В. Т.** Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагрузениях / В. Т. Трощенко [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1981. – 312 с.
155. **Удалов, Ю. П.** Технология неорганических порошковых материалов и покрытий функционального назначения / Ю. П. Удалов, А. М. Германский, В. А. Жабров [и др.]. – Санкт-Петербург : ООО «Янус», 2001. – 401 с.
156. **Федорченко, Д. Г.** Технологические методы повышения надёжности деталей ГТД / Д. Г. Федорченко, Д. К. Новиков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – № 1(67). – С. 62–66.
157. **Хавлин, Т. В.** Актуальность функционально-ориентированного подхода в повышении свойств изделий / Т. В. Хавлин // Машиностроение и техносфера XXI века – 2016: сб. тр. межд. науч.-техн. конф., 12-19 сентября 2016 г., Севастополь : ДонНТУ, – 2016. – Т. 2. – С 149–150.
158. **Хавлин, Т. В.** Особенности обработки поверхностей пера лопаток турбин газотурбинных двигателей / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.] // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции, 4–5 апреля 2019 г., г. Екатеринбург / Уральский государственный горный университет : под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург, 2019. – С. 312–315.

159. **Хавлин, Т. В.** Разработка метода повышения ресурса лопаток турбины вертолетного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 4-й Международной научно-практической конференции, 22–25 мая 2018 г., г. Донецк / Донецкий национальный технический университет. – Донецк, 2018. – С. 136–139.

160. **Хворостухин, Л. А.** Улучшение состояния поверхностного слоя лопаток турбины комбинированным упрочнением / Л. А. Хворостухин, В. Н. Хахин, О. И. Ильинская, Н. Г. Орехов // Авиационная промышленность. – 1993. – № 2. – С. 10–12.

161. **Хирвонен, Дж. К.** Ионная имплантация. / Дж. К. Хирвонен – Москва : Металлургия, 1985. – 392 с.

162. **Хубка, В.** Теория технических систем: пер. с нем. / В. Хубка. – Москва : Мир, 1987. – 208 с.

163. **Шварц, В. А.** Конструкция газотурбинных установок / В. А. Шварц. – Москва : Машиностроение, 1970, – 436 с.

164. **Шепель, В. Т.** Надежность авиационных ГТД. Учебное пособие / В. Т. Шепель, В. А. Пономарев. – Ярославль : ЯПИ, 1984. – 88 с.

165. **Шкретов, Ю. П.** Установки для получения жаростойких диффузионных покрытий газовым циркуляционным способом на наружных и внутренних поверхностях рабочих лопаток ГТД и ГТУ / Ю. П. Шкретов, Л. М. Викулина, А. М. Терехин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 10(58). – С. 50–54.

166. **Штанский, Д. В.** Структура и свойства покрытий Ti-B-N, Ti-Cr-B-(N) и Cr-B-(N), полученных магнетронным распылением мишеней, приготовленных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Д. В. Штанский, Ф. В. Кирюханцев-Корнеев, А. Н. Шевейко [и др.] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – № 2. – С. 242–251

167. **Чичандзе, А. В.** Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичандзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун [и др.]. – Москва : Машиностроение, 2003. – 576 с.
168. **Яблонский, С. В.** Функции алгебры логики и классы Поста / С. В. Яблонский, Г. П. Гаврилов, В. Г. Кудрявцев. – Москва : Наука, 1966. – 120 с.
169. **Ящерицын, П. И.** Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. – Минск : «Наука и техника», 1976. – 328 с.
170. **Carter, T. J.** Common failures in gas turbine blades / Tim J. Carter // Engineering Failure Analysis. – 2005. – №12. – P. 237–247.
171. **Cavaleiro, A.** Nanostructured coatings / A. Cavaleiro, J. Th. M. De Hosson. Springer-Verlag, 2006. – 648 p.
172. **Consigny, H.** Short Duration Measurements of Heat Transfer Rate to a Gas Turbine Rotor Blade / H. Consigny, B. E. Richards // J. Eng. Power. – 1982. – № 104(3), P. 542–550.
173. **Dewangan, R.** Gas turbines blades – a critical review of failure on first and second stages / R. Dewangan, J. Patel, J. Dubey, P. K. Sen, S. K. Bohidar // International journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2015. – №1. – P. 216–223.
174. **Giel, P. W.** Heat transfer measurements and predictions on a power generation gas turbine blade // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – 2000. – V. 3. – P. 1–14.
175. **Gupta, N.** Applying Dijkstra's Algorithm in Routing Process / N. Gupta, K. Mangla, A. K. Jha, M. Umar Int. J // New Technology and Research. – 2016. – V. 2 – I. 5, – P. 122–124.
176. **Kolagar, A. M.** Failure analysis of gas turbine first stage blade made of nickel-based superalloy // Case studies in engineering failure analysis. – 2017. – T. 8. – P. 61–68.
177. **Laguna-Camacho, J. R.** A study of the wear damage on gas turbine blades / J. R. Laguna-Camacho, L. Y. Villagrán-Villegas, H. Martínez-García, G. Juárez-Morales, M. I. Cruz-Orduña, M. Vite-Torres, L. Ríos-Velasco,

I. Hernández-Romero // Engineering Failure Analysis. – 2016. – № 61, – P. 88–99, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.10.002>.

178. **Leyens, C.** Advanced materials and coatings for future gas turbine applications / Proceedings: 24th International Congress of Aeronautical Sciences, 29 August - 3 September 2004, Yokohama, Japan, – P. 1–10.

179. **Meetham, G. W.** Materials for High Temperature Engineering Applications / G. W. Meetham, M. H. Van de Voorde. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. – 164 p.

180. **Mishra, R. K.** Failure analysis of an un-cooled turbine blade in an aero gas turbine engine / R. K. Mishra, Johny Thomas, K. Srinivasan, Vaishakhi Nandi, R. Raghavendra Bhatt // Engineering Failure Analysis. – 2017. – №79, – P. 836–844, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.042>.

181. **Naga, V.** Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine Engine -an overview / V. Naga Bhushana Rao, I. N. Niranjan Kumar, K. Bala Prasad, N. Madhulata, Naresh Gurajaru // International Journal of Engineering Research and Development, – 2014. – V.10. – P. 48–57.

182. **Osorio, J. D.** Thermal barrier coatings for gas turbine applications: failure mechanisms and key microstructural features / J. D. Osorio, A. Toro, J. P. Hernandez-Ortiz // Dyna. – 2012. – №176. – P. 149–158. – URL: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7712340.pdf> (дата обращения 14.01.2026).

183. **Puspitasari, P.** Failure analysis of a gas turbine blade: A review / P. Puspitasari, A. Andoko, P. Kurniawan // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – V.1034 (1). DOI:10.1088/1757-899X/1034/1/012156

184. **Rajendran, R.** Gas turbine coatings – An overview / R. Rajendran // Engineering Failure Analysis. – 2012. – №26 (2012). – P. 355–369.

185. **Rani, S.** Failure analysis of a first stage IN738 gas turbine blade tip cracking in a thermal power plant / S. Rani, A. K. Agrawal, V. Rastogi // Case studies in engineering failure analysis. – 2017. – Т. 8. – P. 1–10.

186. **Rao N.** Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine Engine—An overview / N. Rao // Int. J. Eng. Res. Dev. – 2014. – Т. 10. – P. 48–57.

187. **Reyhani M. R.** Turbine blade temperature calculation and life estimation-a sensitivity analysis / M. R. Reayani // Propulsion and power Research. – 2013. – T. 2. – №. 2. – P. 148–161.
188. **Rickerby, D. S.** Coatings for gas turbines / D. S. Rickerby, M. R. Winstone // Materials and Manufacturing Processes. – 1992. – №7. – P. 495–526.
189. **Sankar, V.** Optimized thermal barrier coating for gas turbine blades / V. Sankar, P. B. Ramkumar, D. Sebastian, D. Joseph et al. // Materials Today: Proceedings. – 2019. – №11. – P. 912–919.
190. **Swain, B.** Failure analysis and materials development of gas turbine blades / B. Swain, P. Mallick, R. Roshan, S. S. Mohapatra et al. // Materials Today: Proceedings. – 2020. – №33. – P. 5143–5146
191. **Wing, R. G.** The Protection of Gas Turbine Blades: a platinum aluminide diffusion coating / R. G. Wing, I. R. McGill // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1981. – V. 53 – № 10, P. 15–21.
192. **Xie, L.** Properties and Performance of High-Purity Thermal Barrier Coatings / L. Xie, M. R. Dorfman, A. Cipitria, S. Paul, I. O. Golosnoy, and T. W. Clyne // Journal of Thermal Spray Technology. – 2007. – V.16. – P. 804–808. DOI:10.1007/s11666-007-9079-7
193. **Xu, H.** Thermal barrier coatings / H. Xu, H. Guo. Woodhead publishing limited, 2011. – 339 p.
194. **Yang, D.** Investigation of leakage flow and heat transfer in a gas turbine blade tip with emphasis on the effect of rotation / D. Yang, X. Yu, Z. Feng // Journal of Turbomachinery. – 2010. – V. 132 (4). DOI:10.1115/1.3213560

Приложение А

**Методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей
обработки деталей со сложным пространственным профилем**

В процессе отделочной обработки деталей со сложным пространственным профилем наблюдается значительное непостоянство режимов обработки, что обусловлено переменной геометрией пятна контакта инструмента и обрабатываемой детали.

Для обеспечения постоянства процессов ОУО деталей со сложным пространственным профилем представленная методика позволяет получить технологическую карту, с указанием требуемых функциональных воздействий в каждой заданной зоне при проектировании технологического процесса обработки. Кроме того, представленная методика позволяет реализовывать функционально-ориентированные технологии, благодаря возможности точной реализации требуемых функциональных воздействий, оказываемых на каждый функциональный элемент обрабатываемой детали со сложным пространственным профилем.

Весь процесс можно условно разделить на два этапа: подготовительный этап, включающий в себя анализ исходных данных и требований к проектируемой операции и этап получения требуемых параметров обработки.

1. Первым шагом является определение характерных зон, отличающихся существенным изменением геометрических размеров по сравнению с прилегающими. Количество таких зон может быть задано исходя как из геометрических параметров обрабатываемой детали, так и исходя их производственных возможностей или эксплуатационных требований. При этом, с увеличением количества характерных зон, возрастает точность адаптации режимов обработки к особенностям обрабатываемого профиля.

2. После определения характерных зон, и их количества переходим к определению режимов обработки в соответствии с базовым технологическим процессом. Первым шагом определения режимов является анализ схемы обработки согласно рисунку А.1, в соответствии с которой необходимо по таблице А.1 выбрать формулы для определения параметров пятна контакта.

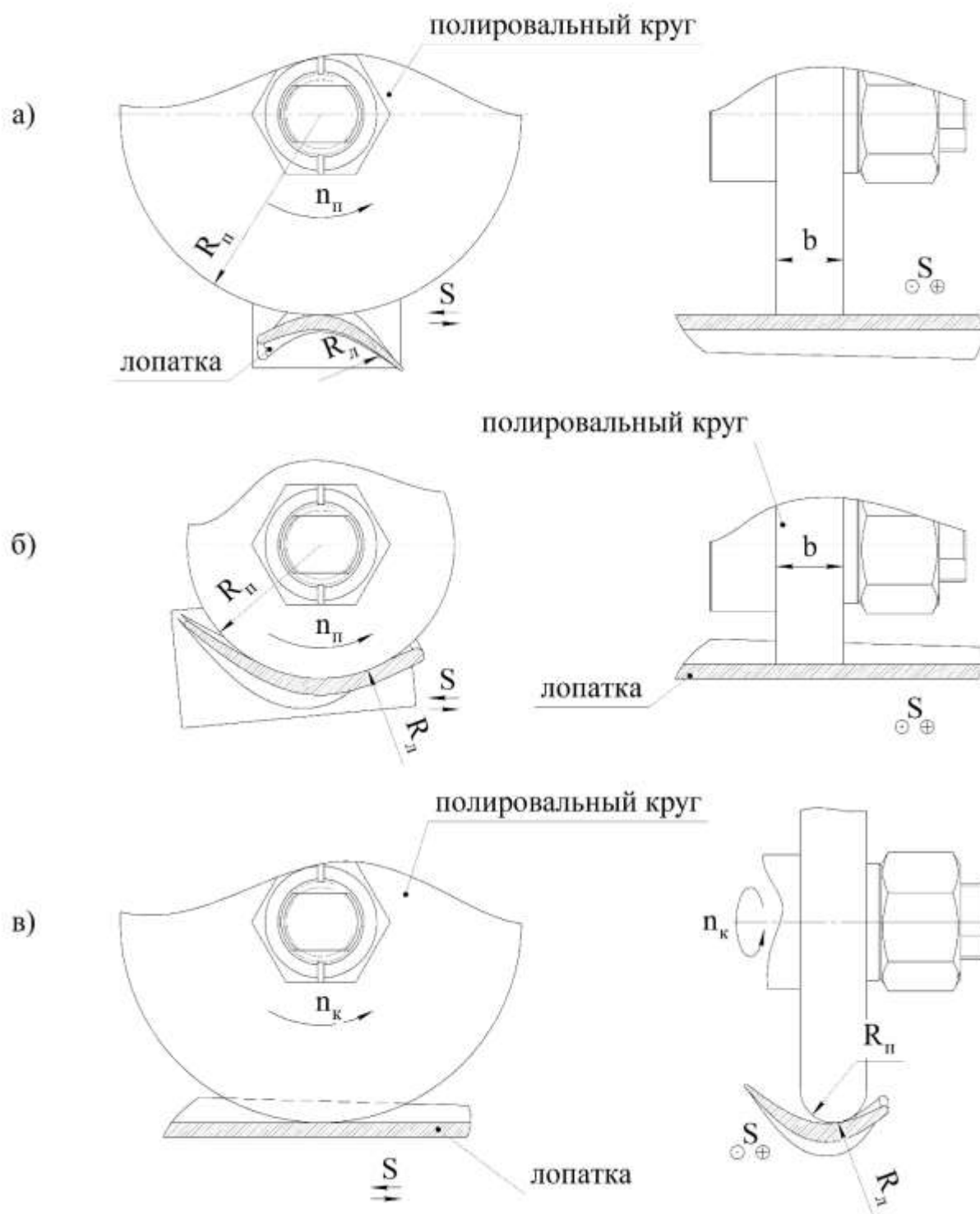


Рисунок А.1 – Основные схемы обработки (на примере лопатки ГТД)

а) обработка поверхности спинки лопатки; б) обработка корытца кругом, превышающим радиус обрабатываемой лопатки; в) обработка корытца кругом, радиус которого меньше обрабатываемого радиуса корытца

Таблица А.1 – Зависимости для определения пятна контакта

№ п/п	Расчетная схема	Полуширина, м
1	а	$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_{\text{л}} R_{\text{п}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{п}}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}} \right)}$
2	б	$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_{\text{л}} R_{\text{п}}}{R_{\text{л}} - R_{\text{п}}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}} \right)}$
3	в	$b = 1,145 \sqrt[3]{P \frac{R_{\text{л}} R_{\text{п}}}{2R_{\text{л}} - R_{\text{п}}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}} \right)}$

3. Зная величину полуширины пятна контакта, по номограмме (рисунок А.2) определяем реальное значение для соответствующего материала.

4. Зная геометрические параметры полировального круга, и приведенную величину полуширины пятна контакта – находим площадь пятна контакта и удельную силу прижатия (давление) для каждой характерной зоны.

5. Следующим этапом – задаемся фиксированным значением давления (для реализации типового технологического процесса) или требуемым для каждой зоны (для реализации функционально-ориентированного технологического процесса) по величине которого определяем необходимую площадь пятна контакта. Учитывая то, что ширина круга известна и остается постоянной – переменной является только полуширина пятна контакта, полученное значение которой, по номограмме (рисунок А.2) из реального переводим обратно в теоретическое. После чего, по таблице А.2 для расчетной схемы определяем усилие прижатия в каждой из характерных зон.

6. В результате такого расчета получим требуемые значения усилия прижима в каждой характерной зоне обработки рассматриваемой детали.

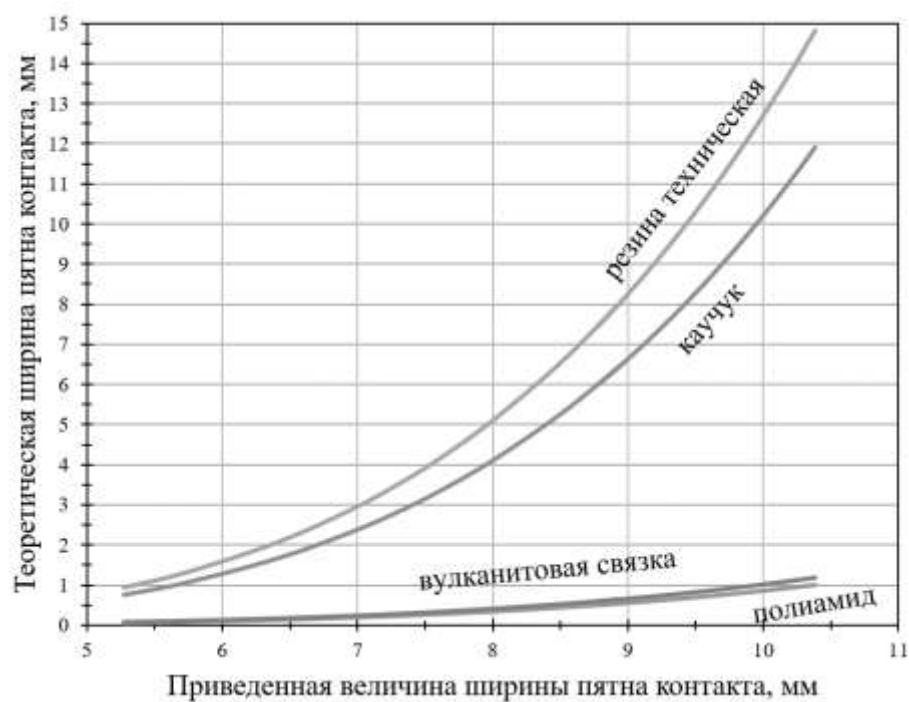


Рисунок А.2 – Номограмма определения ширины пятна контакта

Таблица А.2 – Зависимости для усилия прижима детали к полировальному кругу

№ п/п	Расчетная схема	Усилие прижатия, Н
1	а	$P = \frac{\left(\frac{b}{1,128}\right)^2 \cdot l \cdot (R_{\text{л}} + R_{\text{п}})}{R_{\text{л}} R_{\text{п}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}}\right)}$
2	б	$P = \frac{\left(\frac{b}{1,128}\right)^2 \cdot l \cdot (R_{\text{л}} - R_{\text{п}})}{R_{\text{л}} R_{\text{п}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}}\right)}$
3	в	$P = \frac{\left(\frac{b}{1,145}\right)^3 \cdot l \cdot (2R_{\text{л}} - R_{\text{п}})}{R_{\text{л}} R_{\text{п}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}}\right)}$

Приложение Б

Копии документов о внедрении результатов исследований

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОРЛОВСКИЙ АВТОРЕМОНТНЫЙ ЗАВОД»**

284627, г. Горловка, ул. Комсомольская, 60,
ОГРН 1229300072407, ИНН 9312004367, КПП 931201001
ljakhsergejj@rambler.ru



Исх. № 183 от 26.03.2025

На № _____ от _____

Диссертационный совет 24.2.491.01
на базе ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический
университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Анастасьева Александра Владимировича на тему «Совершенствование технологического обеспечения повышения производительности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки)

АО «Горловский авторемонтный завод» совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» выполняют научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Основным направлением этой совместной работы является разработка методов и принципов повышения качества отделочно-упрочняющей обработки деталей машиностроения, обладающих сложным пространственным профилем, а также сложных поверхностей лопаточных машин.

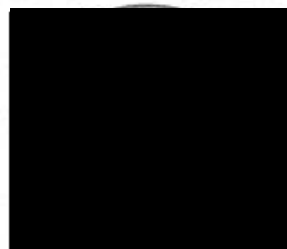
В результате этой работы была разработана методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем, которая позволяет решать задачи оптимизации процесса полирования, повышение производительности процесса и снижение вероятности повреждений обрабатываемых деталей, а также при проектировании технологических процессов автоматизированной и роботизированной полировки.

Разработанная методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем, представленная в диссертационной работе Анастасьева Александра Владимировича, используется на АО «Горловский авторемонтный завод» для повышения качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения.

Представленная методика используется при проектировании технологических процессов изготовления и ремонта деталей со сложным пространственным профилем, а также сложных поверхностей лопаточных машин из различных сталей и сплавов (112X18H10T, 07X12HMBФ-Ш, ХН65КМВЮТЛ, ХН77ТЮР и др.), к которым предъявляются высокие требования по чистоте и точности наружных поверхностей ($Ra=0,32...0,8$; с допуском на сложный фасонный профиль в пределах $0,01...0,05$ мм).

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов исследования составляет 426000,00 рублей (четыреста двадцать шесть тысяч рублей, 00 коп.).

Генеральный директор АО «ГАРЗ»



С.Н. Лях

Исх. № _____ от 9.12.2024
 На № _____ от _____

Диссертационный совет 24.2.491.01
 на базе ФГБОУ ВО «Донецкий
 национальный технический
 университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Анастасьева Александра Владимировича на тему «Совершенствование технологического обеспечения повышения производительности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки)

АО «Донецкий экспериментальный ремонтно-механический завод» совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» выполняют научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Основным направлением этой совместной работы является разработка методов и принципов повышения качества отделочно-упрочняющей обработки деталей машиностроения, обладающих сложным пространственным профилем, а также сложных поверхностей лопаточных машин.

В результате этой работы была разработана методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем, которая позволяет решать задачи оптимизации процесса полирования, повышение производительности процесса и снижение вероятности повреждений обрабатываемых деталей, а также при проектировании технологических процессов автоматизированной и роботизированной полировки.

Разработанная методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем, представленная в диссертационной работе Анастасьева Александра Владимировича, используется на АО «Донецкий экспериментальный ремонтно-механический завод» для повышения производительности обработки различных изделий машиностроения.

Представленная методика непосредственно используется в работе технического отдела в качестве научной базы для расчета режимов отделочной обработки сложных пространственных профилей деталей машин, а также сложных поверхностей лопаточных машин из различных сталей и сплавов.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов исследования составляет 180000,00 рублей (сто восемьдесят тысяч рублей, 00 коп.).

Генеральный директор АО «ДОНЭРМ»

Е.А. Куглер

Исх. № _____ от 28.11.2024г.Диссертационный совет 24.2.491.01
на базе ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический
университет»**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Анастасьева Александра Владимировича на тему «Совершенствование технологического обеспечения повышения производительности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки)

Государственное учреждение «Проектно-конструкторский технологический институт» (ГУ «ПКТИ») совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» выполняют научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Одним из основных направлений этой совместной работы является разработка методов и принципов повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки деталей машиностроения, обладающих сложным пространственным профилем, а также сложных поверхностей лопаточных машин.

Разработанная методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем, представленная в диссертационной работе Анастасьева Александра Владимировича, представляет интерес и будет использоваться в ГУ «Проектно-конструкторский технологический институт» при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с целью повышения производительности обработки различных изделий машиностроения.

Директор

В.П. Кыткин

МИНОБРНАУКИ РОССИИ



Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ухтинский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «УГТУ»)

филиал Ухтинского государственного
технического университета г. Усинске
(УФ УГТУ)

Нефтяников ул., д. 33, Усинск,
Республика Коми, 169710
Телефон: (82144) 29-1-74
Факс: (82144) 29-6-26
E-mail: mail@ufugtu.ru
<https://uf.ugtu.net/>

03.03.2026 № 38/01-240
На № _____ от _____.

Диссертационный совет 24.2.491.01
на базе ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический
университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Анастасьева Александра Владимировича на тему «Совершенствование технологического обеспечения повышения производительности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 Технология машиностроения (технические науки)

Усинский филиал Ухтинского государственного технического университета совместно с кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» выполняют научно-исследовательские работы по повышению качества и эффективности обработки различных изделий машиностроения. Одним из направлений этой работы является разработка методов и принципов повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки деталей машиностроения, обладающих сложным пространственным профилем, а также сложных поверхностей лопаточных машин.

Разработанная методика и рекомендации по обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем, представленная в диссертационной работе Анастасьева Александра Владимировича, используется в учебном процессе в Усинском филиале Ухтинского государственного технического университета в курсах «Основы конструирования и детали машин» и «Нефтегазопромысловое оборудование».

Директор

Н.С. Пичко



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артема ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

13.01.2026 № 30-12/1

Диссертационный совет 24.2.491.01
на базе ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Анастасьева Александра Владимировича на тему «Совершенствование технологического обеспечения повышения производительности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки) в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

Кафедрой «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донецкий национальный технический университет» выполняются научно-исследовательские работы по повышению производительности обработки различных изделий машиностроения. Одним из направлений этой работы является разработка методов и принципов повышения производительности отделочно-упрочняющей обработки деталей машиностроения, обладающих сложным пространственным профилем, а также сложных поверхностей лопаточных машин.

Разработанная методика обеспечения постоянства процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей со сложным пространственным профилем, представленная в диссертационной работе Анастасьева Александра Владимировича, внедрена в учебный процесс кафедры Технология машиностроения по направлению подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Представленная на кафедру «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО ДонНТУ методика дает возможность повысить качество подготовки, инженерную компетенцию и навыки студентов и магистрантов, обучающихся на кафедре.

Проректор
д-р техн. наук, профессор

Начальник учебного отдела
канд. техн. наук, доцент

Зам. заведующего кафедры «Технология машиностроения»
канд. техн. наук, доцент

А.Б. Бирюков

В.А. Попов

И.А. Горобец