

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

На правах рукописи



Пичко Артем Павлович

**СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО
ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НЕФТЕГАЗОВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2019

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

Научный

руководитель:

Михайлов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Бутенко Виктор Иванович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственной технической университет»,
г. Ростов-на-Дону, профессор кафедры «Технология
машиностроения»

Волков Игорь Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Луганской
народной республики «Луганский национальный
университет имени Владимира Даля»,
г. Луганск, доцент кафедры «Технология
машиностроения и инженерный консалтинг»

Ведущая
организация:

Государственная образовательная организация
высшего профессионального образования
«Донецкий институт железнодорожного транспорта»,
г. Донецк

Защита состоится «26» декабря 2019 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: ауд. 6.202,а, пр. Дзержинского, 1, г. Донецк, 283001.

Тел: +380 71 3060879,

E-mail: tm@fimm.donntu.org

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

<http://donntu.org>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 01.014.02



Грубка Р.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в нефтегазовой промышленности широко используются газотурбинные установки (ГТУ) для решения заданных технологических задач. ГТУ представляет собой сложную техническую систему, состоящую из целого комплекса подсистем и элементов. К основным подсистемам ГТУ относятся компрессор и турбина, которые образуют турбокомпрессор и имеют комплекс лопаток различного назначения. При этом лопатки компрессора работают в принципиально различных условиях по сравнению с лопатками турбины. Это обусловлено, тем, что в компрессоре действуют одни виды эксплуатационных воздействий, а в зоне турбины происходит комплекс других воздействий. Это приводит к принципиально различным разрушениям лопаток компрессора относительно лопаток турбины, что значительно снижает ресурс ГТУ и происходит неполное использование эксплуатационного потенциала лопаток компрессора по сравнению с лопатками турбины.

Кроме того, в процессе эксплуатации ГТУ вследствие особенностей формы каждой лопатки, ее расположения, кинематики и движения пыле газо-воздушного потока по тракту установки происходит неодинаковый и неравномерный износ каждой лопатки турбокомпрессора ГТУ. Все это значительно снижает ресурс установки и приводит к снижению ее эксплуатационного потенциала.

Для повышения ресурса лопаток турбокомпрессора в настоящее время применяется множество различных технологических отделочно-упрочняющих методов. Однако они обеспечивают только равномерные одинаковые свойства, как по каждой лопатке, так и по группам лопаток компрессора и турбины. Это, в условиях действия неравномерных неодинаковых эксплуатационных функций, не позволяет вести дальнейшее повышение эксплуатационных показателей ГТУ.

Поэтому для дальнейшего повышения эксплуатационных параметров ГТУ необходимо выполнить комплексные исследования особенностей действия эксплуатационных функций в компрессоре и турбине, установить связи между свойствами их лопаток, обеспечить специальные свойства лопаток турбокомпрессора и разработать необходимое технологическое обеспечение. При этом создать технологический подход комплексного обеспечения специальных свойств каждой лопатки и групп лопаток компрессора и турбины, из условия равенства или кратности их ресурсов. Решение этих вопросов является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение для повышения работоспособности ГТУ.

Степень разработанности темы. Выполненные в данной работе исследования направлены на комплексное повышение ресурса лопаток турбокомпрессора ГТУ, которые работают в принципиально различных условиях действия эксплуатационных функций, за счет выравнивания ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств (ФОС) посредством реализации специальных отделочно-упрочняющих технологий, структура которых базируется на основных закономерностях между технологическими воздействиями, свойствами и эксплуатационными функциями для групп лопаток компрессора и турбин.

В настоящее время, этим вопросам посвящено большое количество исследований отечественных и зарубежных ученых, работающих в области создания новых технологий для лопаток турбокомпрессоров ГТУ. Данные исследования позволяют создавать прогрессивные технологии и обеспечение для повышения ресурса лопаток турбокомпрессора ГТУ. Однако, эти исследования не решают вопросы повышения их работоспособности путем выравнивания ресурсов всех лопаток турбокомпрессора в условиях действия неодинаковых эксплуатационных воздействий в компрессоре и турбине. Это связано с тем, что в данное время нет данных, отделочно-упрочняющих технологий и технологического обеспечения для реализации ФОС отдельно для лопаток компрессора и лопаток турбин, которые эксплуатируются в принципиально различных условиях. Для этого необходимо создание основ синтеза специальных отделочно-упрочняющих технологий, структура которых базируется на основных закономерностях между технологическими воздействиями, свойствами и эксплуатационными функциями для групп лопаток компрессора и лопаток турбин с функционально-ориентированными покрытиями (ФОП).

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является комплексное повышение ресурса лопаток компрессора и турбины ГТУ, которые работают в сложных и принципиально различных условиях эксплуатации, на основе обеспечения ФОС и выравнивания их ресурсов путем разработки технологического обеспечения и установления связей между параметрами покрытий лопаток компрессора и турбины.

Для достижения этой цели, необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ особенностей эксплуатации ГТУ в нефтегазовой промышленности. Исследовать существующие методы и технологии повышения ресурса лопаток турбокомпрессора ГТУ.

2. Предложить технологический подход и принципы комплексного повышения ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины, работающих в различных условиях эксплуатации. Разработать методику и алгоритм синтеза технологического обеспечения по комплексному повышению ресурса различных групп лопаток турбокомпрессора ГТУ. Установить связи между технологическими параметрами обеспечения свойств лопаток компрессора и турбины.

3. Выполнить синтез структурно-технологического обеспечения лопаток турбокомпрессора. Разработать методы синтеза структуры комплексных технологических процессов обработки новых и восстановленных лопаток с ФОП. Предложить методику направленного поиска рациональных структурных вариантов технологических процессов обработки лопаток компрессора и турбины с ФОС.

4. Разработать технологическое обеспечение повышения ресурса групп лопаток турбокомпрессора ГТУ. Предложить новый способ обеспечения ФОС лопаток турбокомпрессора. Разработать методику и алгоритм синтеза структуры комплексного технологического процесса обеспечения ФОС лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом равенства их ресурсов. Исследовать структурную надежность системы лопаток турбокомпрессора на этапе ее проектирования.

5. Выполнить анализ технологических особенностей реализации ФОП лопаток компрессора и турбины на основе связей параметров. Разработать тех-

нологическое обеспечение для реализации ФОП лопаток компрессора и турбины с учетом связей их параметров.

6. Разработать методику проведения экспериментальных исследований. Выполнить разработку экспериментальной установки для сравнительных испытаний лопаток компрессора и лопаток турбины с покрытиями, работающих в принципиально различных условиях эксплуатации. Экспериментально установить связь параметров покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины.

7. Разработать рекомендации по повышению ресурса лопаток турбокомпрессора на основе обеспечения ФОС и равенства ресурса лопаток компрессора и турбины. Внедрить результаты работы в производство.

Объект и предмет исследования. *Объектом* исследования является структура технологического процесса для обеспечения ФОС и равенства ресурсов лопаток компрессора и турбины ГТУ, работающих в принципиально различных условиях эксплуатации, а *предметом* – закономерности связей параметров между операциями технологического процесса обеспечения ФОС из условия равенства ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины.

Научная идея работы заключается в создании структуры отделочно-упрочняющего технологического процесса для обеспечения ФОС и равенства ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины ГТУ, которые работают в принципиально различных условиях эксплуатации, на основе реализации ФОП и установления связей параметров этих покрытий для лопаток компрессора и турбины.

Научная новизна полученных результатов. В работе выполнено комплексное повышение ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины ГТУ, которые работают в сложных и принципиально различных условиях эксплуатации, за счет обеспечения ФОС и выравнивания их ресурсов, на основе разработки технологического обеспечения в реализации ФОП и установления связей между их параметрами. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Предложено, для повышения ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины, которые работают в сложных и принципиально различных условиях эксплуатации, обеспечивать ФОС и равенство ресурсов этих групп лопаток в соответствии с принципом структурного соответствия свойств, технологических воздействий и эксплуатационных функций групп лопаток.

2. Впервые разработаны принципы, технологический подход и методы комплексного повышения работоспособности различных групп лопаток турбокомпрессора, которые работают в принципиально различных условиях эксплуатации, за счет обеспечения ФОС и равенства ресурсов этих групп лопаток, на основе применения ФОП и обеспечения связей параметров этих покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины.

3. Впервые установлена связь и основные закономерности реализации структуры технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины из условия равенства ресурсов лопаток различных групп.

4. Получил дальнейшее развитие технологический метод в обеспечении равенства ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины, базирующийся на послойном формировании ФОП лопаток и обеспечении гомоморфного соответствия толщин и количества слоев покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины.

Теоретическая значимость работы.

1. Установлен алгоритм и последовательность технологической реализации ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины ГТУ, обеспечивающие равный ресурс эксплуатации лопаток всего турбокомпрессора.

2. Установлена закономерность обеспечения соответствия толщин покрытий лопаток компрессора и лопаток турбин ГТУ для выполнения равенства ресурсов всех групп лопаток турбокомпрессора.

3. Предложенные структурно-логические формулы надежности лопаток турбокомпрессора позволили разработать методы повышения структурной надежности ГТУ.

4. Разработано технологическое обеспечение реализации ФОС лопаток турбокомпрессора из условия равенства ресурсов групп лопаток компрессора и лопаток турбины, определены режимы и особенности технологической реализации ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины для ГТУ.

5. Разработана методика и алгоритм синтеза структуры комплексного технологического процесса на этапе нанесения покрытий, который является обобщающей системой проектирования процессов обеспечения ФОС лопаток компрессора и лопаток турбины из условия равенства их ресурсов.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные функционально-ориентированные технологические процессы и обеспечение для отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбокомпрессора ГТУ, которые работают в принципиально различных условиях эксплуатации, повышают и выравнивают ресурсы лопаток компрессора и лопаток турбины.

2. Разработанная методика и алгоритм синтеза технологического обеспечения для комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора ГТУ позволяет на основе установленных связей и закономерностей проектировать конкретные варианты технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток с ФОП для компрессора и турбины, которые работают в принципиально различных условиях эксплуатации.

3. Предложенные рекомендации комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора с ФОП позволяет на основе установленных связей и закономерностей параметров покрытий выровнять ресурсы лопаток компрессора и турбины, а также обеспечить возможность реализации полного использования эксплуатационного потенциала лопаток компрессора и лопаток турбины ГТУ, что повышает их технико-экономические показатели.

4. Результаты работы внедрены в ООО «РН – СЕВЕРНАЯ НЕФТЬ» (Россия), ОАО «Усинскгеонефть» (Республика Коми, Россия), ООО «Горловский энергомеханический завод» (г. Горловка, ДНР), ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк, ДНР) и в Филиале Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Россия). Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 294600,00 рублей РФ (двести девяносто четыре тысячи шестьсот рублей РФ).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, в представленной работе использован следующий комплекс методов, принципов и научных положений: основные по-

ложения и принципы технологии машиностроения; основные принципы и методология синтеза функционально-ориентированных технологий в машиностроении; системные подходы при создании технологий и технологического обеспечения формирования ФОП; принципы теории производительности и теории множеств; экспериментальные исследования базировались на методах планирования эксперимента; обработка результатов экспериментов проводилась с помощью статистических методов.

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

- научное положение о том, что обеспечивая свойства лопаток компрессора и лопаток турбины в соответствии со структурой эксплуатационных функций, которые имеют принципиально различный характер воздействий в компрессоре и турбине ГТУ, реализуется возможность выравнивания ресурсов всех лопаток турбокомпрессора;

- научное положение о том, что формируя структуру технологических воздействий в соответствии с особенностями и структурой действия эксплуатационных функций в ГТУ, обеспечивается возможность повышения ресурса всей ГТУ;

- научное положение о том, что структура технологического процесса реализации ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины должна формироваться гомоморфно в зависимости от структуры действующих эксплуатационных функций на лопатки компрессора и лопатки турбины ГТУ.

- технологический подход, принципы и алгоритм обеспечения ФОС свойств лопаток турбокомпрессора ГТУ, обеспечивающие повышение и выравнивание ресурсов лопаток компрессора и турбины, в принципиально различных условиях их эксплуатации;

- классификация функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины ГТУ;

- способ и методика реализации технологического процесса обеспечения ФОС лопаток турбокомпрессора.

Степень достоверности результатов и апробация результатов. Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов подтверждаются корректным использованием апробированных методов исследований и научных теорий, адекватностью разработанных моделей, применением современного математического аппарата, приборов и технологического оборудования, достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных исследований, полученных по результатам опытных испытаний лопаток компрессора и турбины с ФОП, эффективностью внедрения результатов работы в производство.

Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждены на международных научно-технических конференциях:

- «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, Россия, 2018 г., 2019 г.);

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

- студенческая научно-техническая конференция «Автоматизация, технология и качество в машиностроении» (г. Донецк, ДНР, 2018 г.).

А также на научно-техническом семинаре Усинского филиала Ухтинского государственного технического университета (г. Усинск, Республика Коми, Россия, 2019 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» и XXV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в 2018 г. в городе Севастополе (Россия).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 11 научно-технических работах, в том числе: 7 статей в ведущих рецензируемых изданиях ВАК ДНР, имеющем РИНЦ; 1 статья в ведущем рецензируемом журнале ВАК России, имеющем РИНЦ; 3 публикации в материалах международных конференций.

Структура и объем работы. Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 265 страницы, в том числе 161 страниц основного текста, 84 рисунка на 24 страницах, 17 таблиц на 10 страницах, 178 литературных источника на 19 страницах, 5 приложений на 51 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе работы проведен литературный обзор современного состояния вопроса исследований, представлены данные об особенностях эксплуатации ГТУ в нефтегазовой промышленности, проанализированы возникающие разрушения лопаток турбокомпрессора, а также выполнен анализ существующих технологических методов, применяемых для повышения параметров качества лопаток компрессора и турбины.

Выполненный анализ литературных источников показал, что развитие ГТУ идет по пути улучшения их термогазодинамических параметров, структурного, принципиально-структурного, схемно-конструктивного совершенствования, которое направлено на повышение показателей эффективности использования этих установок. В нефтегазовой промышленности используются различные варианты принципиально-структурных схем ГТУ и эти технические системы являются открытыми к развитию и повышению эксплуатационных параметров.

Установлено, что лопатки компрессора и лопатки турбин, работают в принципиально различных условиях. Это приводит к неодинаковому и преждевременному разрушению структурной группы лопаток турбин по сравнению со структурной группой лопаток компрессора. Каждая лопатка компрессора имеет свои особенности разрушения относительно лопатки турбины, которые обусловлены возникновением неравномерностей разрушения элементов пера лопаток. Это снижает общий ресурс ГТУ и не позволяет реализовать равный эксплуатационный потенциал лопаток компрессора и турбины.

Анализ существующих технологических методов повышения параметров качества лопаток турбокомпрессора ГТУ, показал, что применяемые технологии обеспечивают одинаковые и равномерные свойства исполнительных поверхностей, как лопаток компрессора, так и лопаток турбины. Существующие технологии не позволяют формировать переменные свойства исполнительных поверхностей лопаток и заданную структуру свойств по группам лопаток турбокомпрессора. Вместе с тем, для повышения эксплуатационных параметров лопаток компрессора и лопаток турбины, работающих в сложных условиях эксплуатации, целесообразно обеспечение ФОС рабочих поверхностей лопаток на базе специальных ФОП.

На основании проведенного анализа современного состояния вопроса исследований, выполненного анализа особенностей применения технологических методов повышения качества лопаток компрессора и турбины, а также сделанных выводов по существующим проблемам в данной области определена цель и сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Второй раздел диссертационной работы посвящен вопросам разработки технологических основ комплексного обеспечения свойств лопаток компрессора и турбины, работающих в различных условиях эксплуатации, на базе функционально-ориентированного подхода и технологических связей.

Для решения вопросов повышения работоспособности ГТУ и выравнивания ресурсов лопаток компрессора и турбины в работе разработан технологический подход комплексного обеспечения ФОС лопаток на основе ФОП с учетом технологических связей параметров покрытий. Этот подход заключается в комплексном проектировании технологий на базе решения триединой задачи:

- установления особенностей разрушения лопаток компрессора относительно лопаток турбины;
- обеспечения лопаткам компрессора и турбины ФОС на основе ФОП;
- формирования на основе этих особенностей связей между параметрами (свойств) ФОП на базе принципа равенства или кратности ресурсов лопаток компрессора и турбины:

$$R_1 = R_2 \quad (1)$$

или

$$k_1 R_1 = k_2 R_2 , \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – ресурс лопаток компрессора и турбины, соответственно;
 k_1 и k_2 – коэффициент кратности ресурса лопаток компрессора и турбины, соответственно.

На гипотетической схеме технологического подхода в обеспечении свойств лопаток турбокомпрессора на базе ФОП (рисунок 1) показаны две группы элементов схем для лопаток компрессора и лопаток турбины, которые образуют между собой единую систему в проектировании свойств лопаток в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на базе выполнения заданных технологических воздействий.

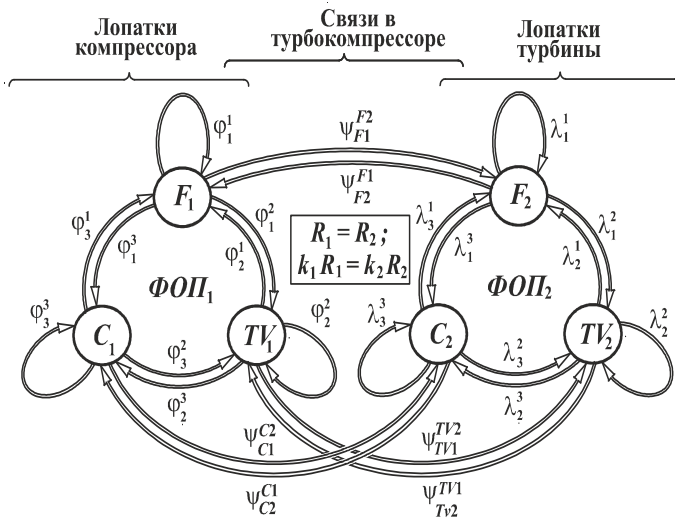


Рисунок 1. Гипотетическая схема технологического подхода в обеспечении ФОС лопаток турбокомпрессора

прессора и лопаток турбины выполняется с помощью связей-петель φ_i^j и λ_i^j .

В технологическом подходе выполняется объединение процессов проектирования ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины с помощью прямых и обратных связей ψ_i^j (рисунок 1), которые можно моделировать потоками материи, энергии и информации.

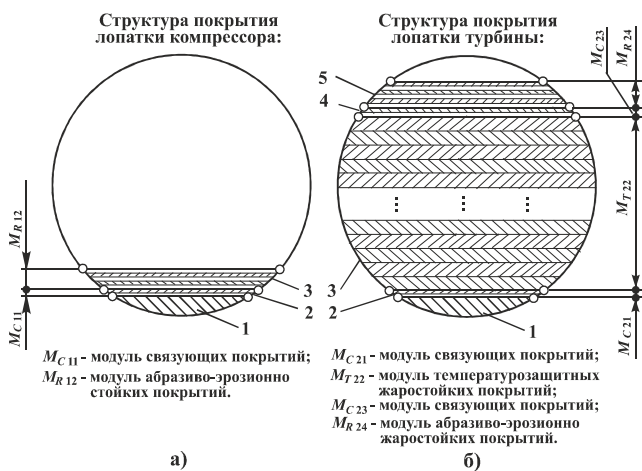


Рисунок 2. Гипотетические схемы структуры покрытий: а – лопатки компрессора, б – лопатки турбины

ется в основном особенностями абразивно-эрозионного износа, который может компенсироваться за счет абразивно-эрозионно-стойкого покрытия. Однако для реализации этого вида покрытия необходимы дополнительные связующие покрытия (технологические покрытия), обеспечивающие связи между предлагаемым покрытием и основным материалом лопатки. Структура покрытия лопатки компрессора 1 (рисунок 2): M_{C11} - модуль связующих покрытий 2; M_{R12} - модуль абразивно-эрозионно-стойких покрытий 3.

Для обеспечения ФОС лопаток компрессора в процессе преобразований участвуют: F_1 и F_2 - действующие эксплуатационные функции; $TV_1 = TB_1$ и $TV_2 = TB_2$ - технологические воздействия, необходимые для обеспечения заданных свойств; C_1 и C_2 - ФОС лопаток компрессора и лопаток турбины, соответственно. Между этими элементами действуют связи φ_i^j и λ_i^j . Для лопаток компрессора и лопаток турбины, ФОС реализуются на базе $\Phi ОП_1$ и $\Phi ОП_2$, соответственно. Внутреннее развитие каждого элемента подсистемы для лопаток ком-

На рисунке 2 представлены гипотетические схемы структуры покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины: на рисунке 2, а – структура покрытий лопатки компрессора; на рисунке 2, б – структура покрытий лопатки турбины. В этом случае, покрытия лопаток формируются в соответствии с их особенностями эксплуатации (рисунок 1), поэтому структура покрытий лопаток компрессора и турбины неодинакова (рисунок 2).

Структура покрытия лопатки компрессора (рисунок 2, а) определя-

Структура покрытий лопатки компрессора формируется в соответствии с принципами реализации ФОР с реализацией ФОР₁. Если покрытие лопатки компрессора формируется на базе ионно-плазменных покрытий, то толщина модуля покрытия M_{C11} составляет 0,25 ... 0,75 мкм, а толщина модуля покрытия M_{R12} рекомендуется в пределах 5,5 ... 12,0 мкм.

Лопатки турбины 1 эксплуатируются в принципиально отличных условиях по сравнению с лопатками компрессора. При этом покрытия лопатки турбины 1 имеют следующую структуру (рисунок 2, б): M_{C21} - первый модуль связующих покрытий 2, общая его толщина - 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает материал лопатки с модулем температуро-защитного жаростойкого покрытия M_{T22} - 3, общая его толщина составляет 300 ... 400 мкм, данный модуль покрытий снижает воздействие температуры на основной материал лопатки из условия $\xi = 0,8 \dots 1,5$ °C / мкм; M_{C23} - второй модуль связующих покрытий 4 связывает температуро-защитное жаростойкое с абразиво-эрозионно-жаростойким покрытием, общая его толщина - 0,25 ... 0,75 мкм; M_{R24} - модуль абразиво-эрозионно-жаростойких покрытий 5, общая его толщина рекомендуется - 8,0 ... 20,0 мкм.

Ресурс всего покрытия лопаток турбины определяется интенсивностью износа модуля M_{R24} абразиво-эрозионно-жаростойкого покрытия. Это обусловлено тем, что при износе и разрушении этого модуля покрытий происходит катастрофическое разрушение следующих за ним модулей покрытий. Это недопустимо - особенно для модуля покрытия M_{T22} температуро-защитного жаростойкого покрытия, при уменьшении толщины которого резко повышается температура на основном материале лопатки и происходит его разрушение.

Для выполнения условий (1) и (2) между свойствами модулей M_{R12} и M_{R24} должны действовать определенные связи.

Если ресурс лопаток определяется толщиной покрытий, то закономерности формирования их свойств по толщине можно представить:

- при выполнении условия (1)

$$H_{R12} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} H_{R24}, \quad (3)$$

- при выполнении условия (2)

$$H_{R12} = \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} H_{R24}; \quad (4)$$

где H_{R12} - толщина абразиво-эрозионно-стойкого покрытия лопатки компрессора; H_{R24} - толщина абразиво-эрозионно-жаростойкого покрытия лопатки турбины; μ_{R12} , μ_{R24} - интенсивность разрушения покрытия лопатки компрессора и лопатки турбины;

В случае если абразиво-эрозионно-стойкие покрытия многослойные, выражения (3) и (4) будут иметь следующий вид:

- при выполнении условия (1)

$$\sum_{i=1}^{n_1} h_{R12i} = \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \sum_{j=1}^{n_2} h_{R24j}, \quad (5)$$

- при выполнении условия (2)

$$\sum_{i=1}^{n_1} h_{R12i} = \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_{R12}}{\mu_{R24}} \sum_{j=1}^{n_2} h_{R24j}; \quad (6)$$

где h_{R12i} , h_{R24j} - толщина i - го слоя покрытия лопатки компрессора и j - го слоя покрытия лопатки турбины;

n_1 , n_2 - количество слоев покрытия лопатки компрессора и лопатки турбины;

Полученные выражения (3) ... (6) позволяют определять технологические связи параметров покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины на основе равенства или кратности их ресурсов.

Для приведения всех исследований диссертационной работы в единую структуру и увязки выполненных разработок предложена общая блок-схема диссертационной работы, которая базируется на общем подходе и комплексном повышении работоспособности лопаток на основе равенства ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины на базе обеспечения ФОС с применением ФОП.

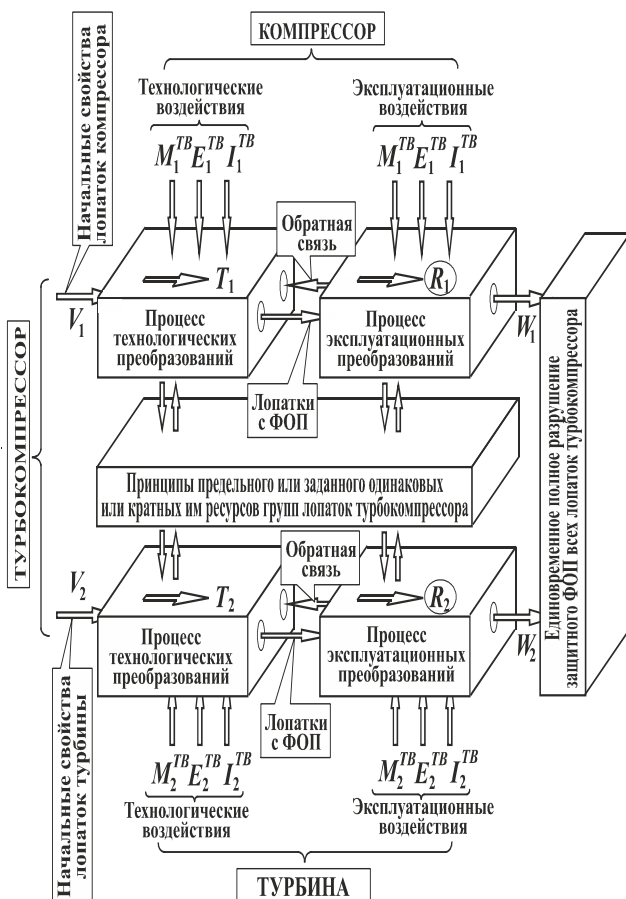


Рисунок 3. Структурная схема синтеза технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОП

В третьем разделе работы представлено структурно-технологическое обеспечение ОУО лопаток турбокомпрессора, выполняемое на базе комплексного обеспечения ФОС лопаток компрессора и турбины.

Заданное структурно-технологическое обеспечение ОУО лопаток турбокомпрессора с ФОП формируется на базе разработанной структурной схемы синтеза технологических процессов, представленной на рисунке 3. В соответствии с этой схемой, процесс создания структуры технологических процессов с ФОС выполняется в два потока: первый направлен на синтез структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП; второй направлен на синтез структуры технологического процесса ОУО лопаток турбины с ФОП. При этом структура технологических процессов формируется на основе связей параметров или свойств ФОП.

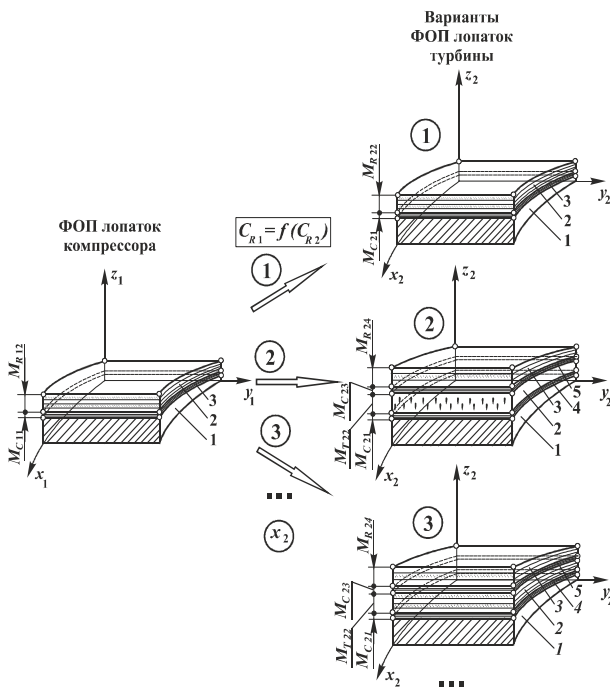


Рисунок 4. Особенности синтеза вариантов ФОП с учетом технологических связей

лопатки компрессора и лопатки турбины.

Исследованы особенности синтеза структуры комплексного технологического процесса ОУО лопаток турбокомпрессора с ФОП, реализуемого на основе технологических связей для лопаток компрессора и лопаток турбины, которую можно представить системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Str\ TП_1 &= \{X_1, A_1\}; \\ Str\ TП_2 &= \{X_2, A_2\}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $Str\ TП_j$ - структура j -го технологического процесса ($j = 1, 2$; 1 - технологический процесс ОУО лопаток компрессора, 2 - технологический процесс ОУО лопаток турбины);

X_j - этапы j -го технологического процесса;

A_j - связи между этапами j -го технологического процесса.

Каждый технологический процесс ОУО лопаток компрессора или турбины с ФОП формируется из трех этапов:

- 1-й этап: предварительной обработки до нанесения покрытия,
- 2-й этап: нанесения ФОП _{j} ,
- 3-й этап: завершающей обработки после нанесения покрытия.

В работе представлены конкретные структурные варианты комплексных технологических процессов реализации ФОП лопаток компрессора и турбины с учетом технологических связей, определяемых выражениями (3) ... (6), на основе принципов (1) и (2). А также разработана структура комплексных технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОП при их восстановлении и ремонте с учетом технологических связей.

На рисунке 4 представлены особенности синтеза вариантов ФОП лопаток турбины в соответствии заданным вариантом ФОП лопатки турбины в зависимости от закономерностей свойств $C_{R1} = f(C_{R2})$ этих покрытий. На базе одного варианта ФОП лопаток компрессора, имеющего модуль связующих покрытий и модуль абразиво-эрозионно-стойкого покрытия, возможно создание множества 1, 2, 3, ..., x_2 различных вариантов покрытий. При этом покрытия лопаток турбины в зависимости от действия эксплуатационных особенностей охлаждения и материала лопаток могут быть двухмодульные и многомодульные (рисунок 4). В этом случае, при синтезе вариантов ФОП необходимо определять соответствия и связи параметров между покрытиями

Для повышения эффективности синтеза комплексных технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОП для ГТУ разработана методика направленного поиска рациональных или близких к оптимальным значениям структурных вариантов процессов. Эти процессы позволяют учитывать технологические связи между параметрами ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины из условия равенства или кратности их ресурсов.

В четвертом разделе диссертации представлено технологическое обеспечение, необходимое для выполнения ФОП, реализации технологических связей покрытий лопаток компрессора и турбины, а также для повышения работоспособности групп лопаток турбокомпрессора.

При эксплуатации лопатки ГТУ происходит неравномерный абразивно-эрозионный износ элементов и поверхностей пера лопатки компрессора и турбины. Для компенсации неравномерного износа необходимо наносить на перо лопатки специальное ФОП, компенсирующее действие этих неравномерностей.

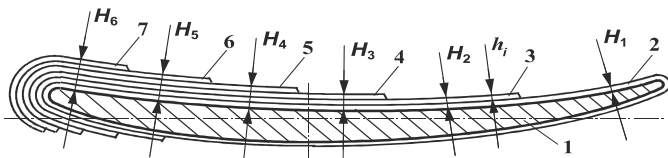


Рисунок 5. Поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из слоев постоянной толщины

В этом случае, на поверхностях и элементах пера лопатки 1 (рисунок 5) необходимо формировать многослойное покрытие переменной толщины. При этом каждый слой покрытия должен реализовываться с различными топографическими параметрами пространственного контура границ (ПКГ). Это выполняется с использованием нескольких

зональных защитных экранов, ПКГ каждого, из которых определяется по результатам абразивно-эрозионного износа однослойного опытного покрытия постоянной толщины на лопатке в условиях эксплуатации.

Процесс нанесения ФОП выполняется в три этапа (рисунок 6).

На первом этапе, предварительно производится испытание, в условиях эксплуатации ГТУ, опытного однослойного покрытия 8 постоянной толщины на перо лопатки 1, имеющего физико-механические свойства и свою толщину h_i , одинаковые с наносимым ФОП каждого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7. При этом выполняются замеры топографических параметров ПКГ 9, 10, 11, 12, 13 не износившейся части опытного покрытия на поверхности пера лопатки.

На втором этапе выполняется отображение топографических параметров ПКГ износа 9, 10, 11, 12, 13 на различные зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18, соответственно. При этом реализуются на каждом из них свои ПКГ.

На третьем этапе, производится последовательный процесс нанесения каждого слоя покрытий. При этом первое покрытие 19 на перо лопатки наносится без зонального защитного экрана, а покрытия 20, 21, 22, 23, 24 выполняются с зональными защитными экранами, на которых отображены ПКГ. Поэтому на перо лопатки 1 получают многослойное ФОП переменной толщины из слоев постоянной толщины 2, 3, 4, 5, 6, 7 с различными топографическими параметрами ПКГ каждого слоя, а именно $a b c d$ (1-й слой), $a b c s_{23} s_{22} s_{21} a$, (2-й слой), $s_{31} b c s_{33} s_{32} s_{31}$ (3-й слой), $s_{41} b c s_{43} s_{42} s_{41}$ (4-й слой), $s_{51} b c s_{53} s_{52} s_{51}$ (5-й

слой), s_{61} b c s_{63} s_{62} s_{61} (6-й слой), зависящими от особенностей эксплуатации лопатки в ГТУ.

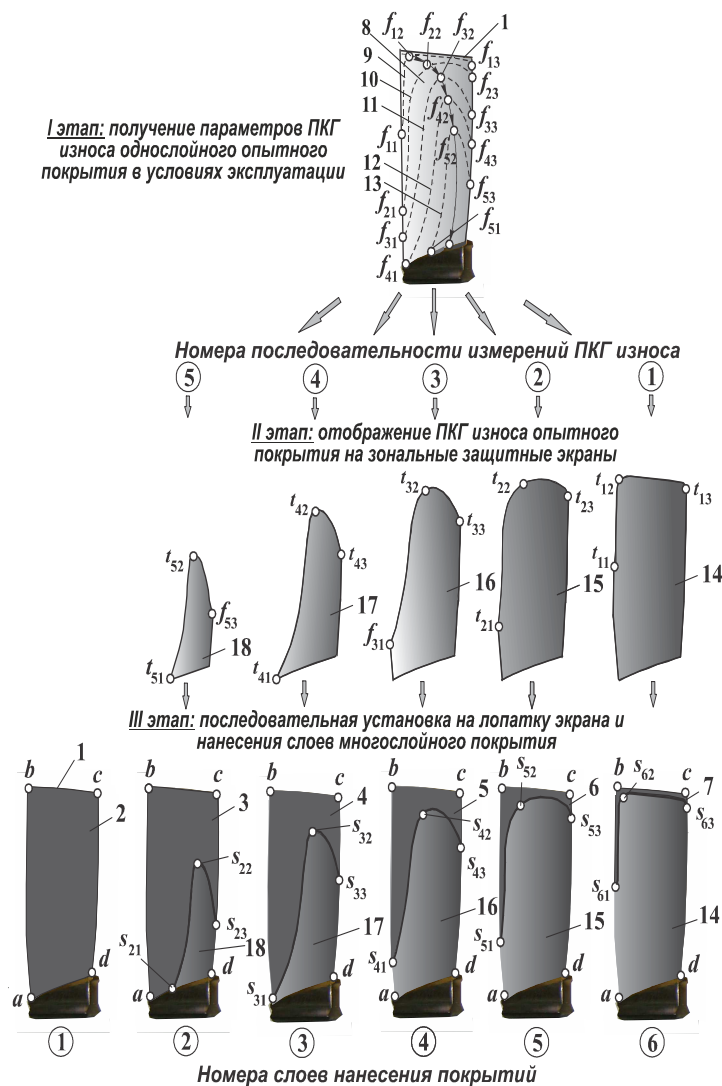


Рисунок 6. Схема (алгоритм) поэтапной реализации способа нанесения ФОП на лопатки ГТУ

особенностей разрушения лопаток компрессора. Установление конфигурации разрушения лопатки компрессора через равные промежутки времени T_i , где i – количество равных промежутков времени в общем ресурсе лопатки или количество слоев покрытий лопатки).

3. Установление толщины и конфигурации i -го слоя покрытия лопатки компрессора, выполняемой в соответствии с особенностями ее эксплуатации в зоне компрессора на основе разработанного способа.

4. Определение числа слоев s покрытий лопатки компрессора.

5. Реализация многослойного ФОП (ФОП₁) лопаток компрессора. Выполнение итерационно-рекуррентного технологического процесса нанесения ФОП. Определение общей толщины ФОП.

6. Определение особенностей разрушения лопаток турбины. Установление конфигурации разрушения лопатки турбины через равные промежутки времени T_j .

Разработанный способ реализации ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины обеспечивает:

- ФОП обеспечивают повышение ресурса лопаток компрессора и турбины;

- ФОП позволяют выровнять ресурс лопаток компрессора и лопаток турбины, а также обеспечить повышение ресурса лопаток турбокомпрессора в целом и реализовать единовременное разрушения покрытий, как на лопатках компрессора, так и на лопатках турбины, что позволяет исключить затраты на их удаление при восстановлении работоспособности лопаток.

Разработанная методика обеспечения ФОС на базе ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины на основе принципа равенства ресурсов, имеет следующую последовательность:

1. Определение заданного ресурса лопаток ГТУ в зависимости от особенностей эксплуатации.

2. Определение особенностей

7. Установление связей и закономерностей между параметрами ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины. Определение общей толщины покрытия лопатки турбины в зависимости от толщины покрытия лопатки компрессора, выполняемые в соответствии с выражениями (3) ... (6).

8. Установление толщины и конфигурации j -го слоя покрытия лопатки турбины, выполняемой в соответствии с особенностями ее эксплуатации в зоне турбины на основе разработанного способа.

9. Определение числа слоев t покрытий лопатки турбины.

10. Реализация многослойного ФОП (ФОП₂) лопаток турбины. Выполнение итерационно-рекуррентного технологического процесса нанесения ФОП.

Для создания конкретных вариантов технологических процессов реализации ФОП разработан алгоритм синтеза структуры комплексного технологического процесса обеспечения ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины с учетом равенства ресурсов на этапе нанесения ФОП. Этот алгоритм дает технологам подход – ориентированный на конечную цель повышения ресурса лопаток компрессора и турбины, обеспечения их равного ресурса, повышения ремонтпригодности и увеличения общего эксплуатационного потенциала лопаток турбокомпрессора.

Для обеспечения заданных параметров качества ГТУ в работе выполнен анализ

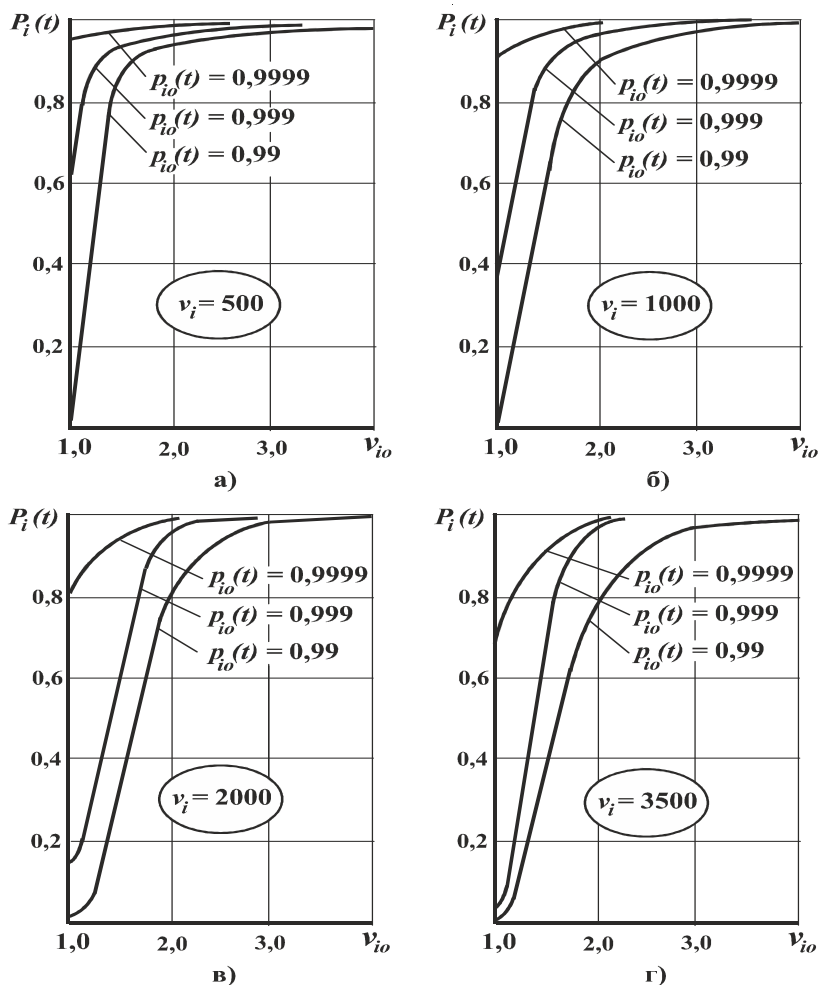


Рисунок 7. Зависимость вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ в зависимости от количества восстановлений рабочих лопаток

структурной надежности лопаток турбокомпрессора с ФОС на этапе проектирования ГТУ.

В работе проведен анализ вероятности безотказной работы подсистем лопаток ГТУ в зависимости от количества их восстановлений. На рисунке 7 представлена зависимость вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ в зависимости от количества восстановлений рабочих элементов (резервных лопаток) для различных вариантов значений общего их числа: а – $v_i = 500$, б – $v_i = 1000$, в – $v_i = 2000$, г – $v_i = 3500$. Анализируя графики (рис. 7) можно отметить, что при внешнем резервировании структурных элементов за счет периодической их

замены новыми, в количестве 2 ... 3 раз, обеспечивается достаточно высокая вероятности безотказной работы $P_i(t)$ i -й подсистемы ГТУ. На основании этого, за наработку t , достаточно выполнять 2 ... 3 раза замену структурных элементов подсистемы новыми, при этом обеспечивается вероятность безотказной работы подсистемы выше значения 0,9.

В пятом разделе представлены конкретные данные по технологической реализации

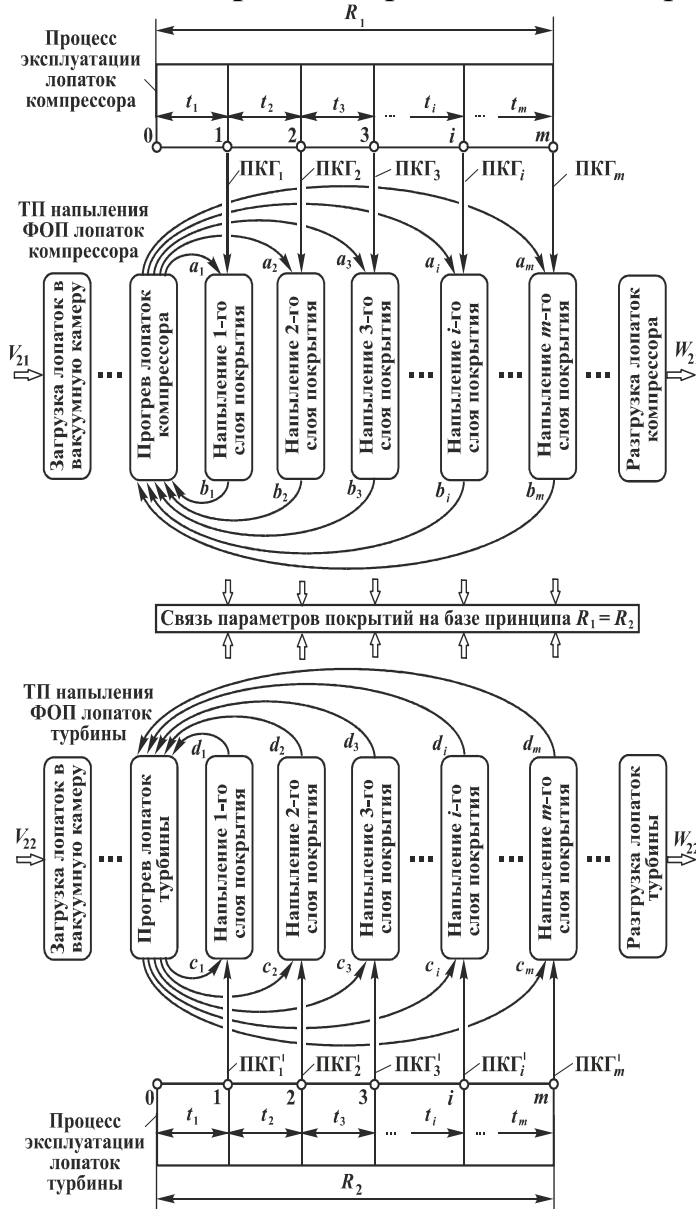


Рисунок 8. Гипотетическая схема синтеза комплексного технологического процесса напыления ФОП

ализация ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины, проведены экспериментальные исследования параметров ресурса на основе установленных связей и разработаны рекомендации работы.

Основные особенности синтеза комплексного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора и турбины реализуются в соответствии с последовательностью, представленной гипотетической схемой (рисунок 8):

1. Выполняется синтез технологического процесса (ТП) напыления ФОП лопаток компрессора, который обеспечивает многослойную рекуррентную реализацию ФОП. При этом каждый слой покрытия имеет свой ПКГ.

2. Используя выражения (3) ... (6) определяются связи параметров покрытий на базе принципа равенства (1) или кратности (2) ресурсов лопаток турбины.

3. Выполняется синтез технологического процесса (ТП) напыления ФОП лопаток турбины. Этот процесс обеспечивает многослойную рекуррентную реализацию ФОП.

Этот процесс обеспечивает многослойную рекуррентную реализацию ФОП. При этом каждый слой покрытия имеет свой ПКГ.

На рисунке 9 представлена структурная схема синтеза ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины на базе принципа равенства их ресурсов.

Технологический процесс напыления ФОП на лопатки компрессора и турбины выполнялся на вакуумной ионно-плазменной установке ННВ 6.6-И1. Для напыления покрытий на лопатки использовались специальные композиционные покрытия. Для повышения производительности напыления ФОП приме-

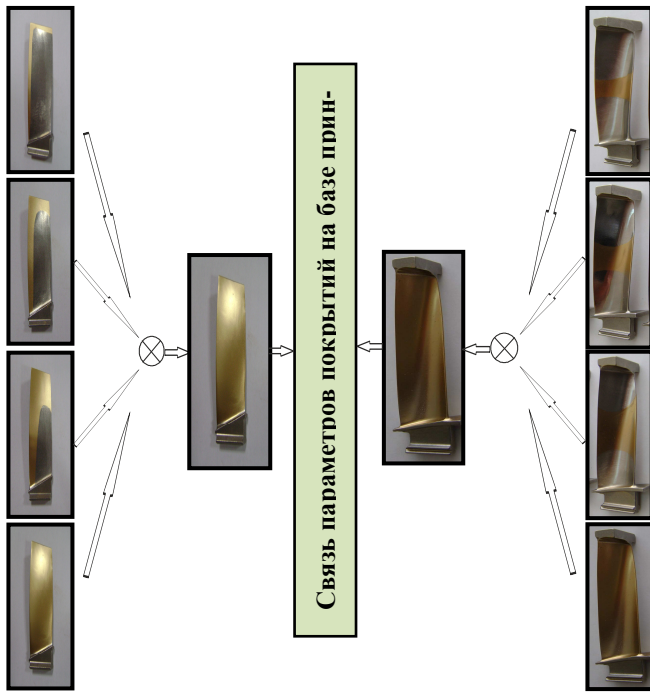


Рисунок 9. Структурная схема синтеза ФОП лопаток компрессора и турбины на базе принципа равенства ресурсов

нялась специальная технологическая оснастка, имеющая высокую концентрацию рабочих позиций установки лопаток. Общее количество одновременно напыляемых лопаток определяется:

$$u = \prod_{k=1}^p u_k, \quad (8)$$

где u – общее количество одновременно напыляемых лопаток (концентрация рабочих позиций);

u_k – количество рабочих позиций k -го класса;

p – общее количество классов подсистем технологической оснастки.

С учетом (8) цикловая производительность установки для напыления ФОП определяется:

$$P_{ц} = \frac{\prod_{k=1}^p u_k}{\sum_{i=1}^n [t_{oi} + (\sum_{j=1}^m t_{Bj})_i]}; \quad (9)$$

где $P_{ц}$ – цикловая производительность установки;

n – количество слоев многослойного покрытия лопатки турбокомпрессора;

m – число составляющих вспомогательного времени, необходимых при нанесении каждого слоя ФОП;

t_{oi} – длительность основного времени напыления i -го слоя покрытия

t_{Bj} – j -я составляющая вспомогательного времени для напыления i -го слоя покрытия.

Разработана методика ускоренных сравнительных испытаний свойств покрытий лопаток компрессора и турбины. Структурная схема экспериментальной установки для сравнительных испытаний покрытия образцов-свидетелей (рисунок 10) состоит из:

1 – образец-свидетель, 2 – покрытие образца-свидетеля, 3 – газовая горелка, 4 – температурное ацетилено-кислородное пламя, 5 – абразивно-струйная головка, 6 – абразивно-воздушный поток, 7 – пиро-

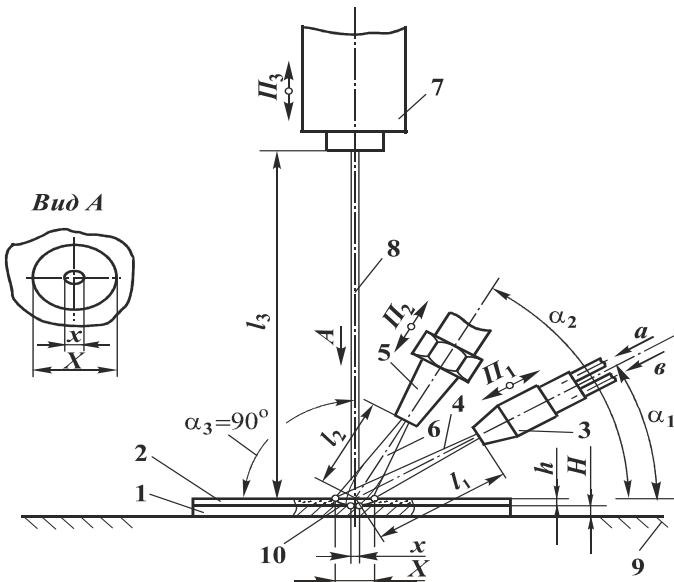


Рисунок 10. Структурная схема экспериментальной установки для сравнительных испытаний покрытия образцов-свидетелей

метр, 8 – лазерный луч пирометра, 9 – основание установки, 10 – пятно износа.

Проведенные испытания образцов-свидетелей с различными видами покрытий показали, что разность длительности их износа составляет 3-6%, что является достаточно хорошими результатами по сходимости.

Выполненные исследования позволили сформулировать общие рекомендации по увеличению ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины, работающих в принципиально различных условиях эксплуатации, на основе разработки заданного технологического обеспечения. Это выполняется посредством установления особенностей износа лопаток компрессора и турбины в ГТУ, применения ФОП лопаток турбокомпрессора и обеспечения выравнивания ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в данной работе исследования позволяют технологически методами комплексно решать вопросы повышения ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины ГТУ, которые работают в сложных и принципиально различных условиях эксплуатации, за счет обеспечения ФОС и выравнивания их ресурсов, на основе разработки технологического обеспечения реализации ФОП и установления связей между их параметрами. Это реализуется посредством специального отделочно-упрочняющего технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора и турбины.

Полученные в этой работе результаты направлены на решение следующих вопросов:

1. Анализ особенностей эксплуатации ГТУ позволил установить, что лопатки турбокомпрессора работают в сложных условиях эксплуатации, что приводит к неравномерному износу поверхностей каждой лопатки и групп лопаток компрессора и турбины. А также в работе исследованы существующие методы и технологии повышения ресурса лопаток. При этом установлено, что они не позволяют комплексно решать вопросы повышения ресурса лопаток в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций. Поэтому здесь установлено, что в настоящее время необходимы специальные подходы, методы и решения обеспечения свойств лопаток турбокомпрессора.

2. Впервые разработаны принципы, технологический подход и методы комплексного повышения ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины, работающих в различных условиях эксплуатации. Этот подход заключается в обеспечении ФОС и выравнивании ресурсов лопаток компрессора и турбины, на основе разработки технологического обеспечения в реализации ФОП и установления связей между их параметрами. Эти связи позволяют формировать заданные параметры технологий для нанесения ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины, на основе разработанной методики и алгоритма синтеза технологического обеспечения.

3. В работе предложена методика синтеза структурно-технологического обеспечения лопаток компрессора и лопаток турбины. При этом разработаны методы синтеза структуры комплексных технологических процессов обработки новых и восстановленных лопаток с ФОП. А также приведены конкретные

структурные варианты технологических процессов ОУО лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОС. Эти структурные варианты позволяют обеспечивать заданные свойства лопаток, а именно - одинаковый или кратный ресурс лопаток компрессора и лопаток турбины. В работе разработана методика направленного поиска рациональных структурных вариантов технологических процессов обработки лопаток компрессора и турбины с ФОС.

4. Для реализации ФОП, в работе разработано необходимое технологическое обеспечение для лопаток турбокомпрессора. При этом предложен новый способ реализации ФОП лопаток на основе вакуумных ионно-плазменных покрытий. Этот способ позволяет формировать ФОП в виде многослойного покрытия переменной толщины из слоев постоянной толщины с различными топографическими параметрами пространственного контура границ каждого слоя, параметры которого определяются в зависимости от особенностей эксплуатации опытного покрытия постоянной толщины.

В работе исследована структурная надежность ГТУ для нефтегазовой промышленности. Разработанные структурно-логические формулы надежности позволили разработать методы повышения структурной надежности ГТУ.

5. Разработанная методика обеспечения свойств лопаток компрессора и лопаток турбины позволяет реализовать принцип равенства или кратности ресурсов компрессора и лопаток турбины, а также обеспечивает повышение ресурса лопаток турбокомпрессора в целом. А также в работе предложен алгоритм синтеза структуры комплексного технологического процесса на этапе нанесения покрытий, который является обобщающей системой проектирования процессов обеспечения ФОС лопаток компрессора и лопаток турбины из условия равенства их ресурсов.

6. В работе разработана методика проведения экспериментальных исследований лопаток, которая базируется на ускоренных сравнительных испытаниях. Разработанная экспериментальная установка позволяет моделировать режимы работы лопаток компрессора и лопаток турбины с покрытиями. Проведенные исследования позволили установить связь между параметрами различных вариантов покрытий лопаток компрессора и лопаток турбины. При этом выполненные ускоренные сравнительные испытания показали, что разность длительности износа покрытий составляет 3-6%, что является достаточно хорошими результатами по сходимости.

7. Предложенные рекомендации комплексного повышения ресурса лопаток позволяет повысить и выровнять ресурсы лопаток компрессора и турбины на базе ФОП и установленных связей параметров покрытий.

8. Результаты работы внедрены в ООО «РН – СЕВЕРНАЯ НЕФТЬ» (Россия), ОАО «Усинскгеонефть» (Республика Коми, Россия), ООО «Горловский энергомеханический завод» (г. Горловка, ДНР), ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк, ДНР) и в Филиале Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Россия). Общій ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 294600,00 рублей РФ (двести девяносто четыре тысячи шестьсот рублей РФ 00 копеек).

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях

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

2. Михайлов, А. Н. Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Д. А. Михайлов, **Пичко А.П.** и [др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2018. - № 3 (81). – С. 32-41.

3. **Пичко, А. П.** К определению структурной надежности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности / А. П. Пичко и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Вып. 2 (61). - С. 64 - 74.

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

5. **Пичко, А. П.** Особенности обеспечения свойств лопаток компрессора и турбины газотурбинной установки на базе функционально-ориентированных покрытий и равенства их ресурсов / А. П. Пичко и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 1 (64). - С. 68 - 77.

6. 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: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 2 (65). - С. 16 - 25.

7. **Пичко, А. П.** Структурно-технологическое обеспечение отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбокомпрессора газотурбинных установок нефтегазовой промышленности / А. П. Пичко и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 3 (66). - С. 54 - 60.

8. **Пичко, А. П.** Технологические особенности синтеза структуры процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями / А. П. Пичко и [др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - Вып. 4 (67). - С. 56 - 71. (*Выполнен анализ технологических особенностей ОУО лопаток с ФОРП*).

Научные работы в материалах конференций

9. Михайлов, В. А. Повышение структурной надежности вертолетных газотурбинных двигателей // В. А. Михайлов, **А. П. Пичко**, Т. В. Хавлин и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 10-16 сентября 2018 г. В 2-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2018. Т. 2. С. 62-66.

10. Михайлов, А. Н. Новые тенденции в повышении ресурса газотурбинных двигателей и установок на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, **А. П. Пичко** и [др.] // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» в г. Петропавловск-Камчатский 17-19 октября 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – С. 43-47.

11. Михайлов, А. Н. Методика направленного поиска рациональных структурных вариантов процессов обработки лопаток ГТУ с учетом технологических связей / А. Н. Михайлов, **А. П. Пичко**, Д. А. Михайлов Д.А. и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - С. 311 -317.

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

АННОТАЦИЯ

Пичко А. П. Синтез технологического обеспечения комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора газотурбинных установок нефтегазовой промышленности.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения» - ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2019.

В диссертационной работе выполнено комплексное повышение ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины газотурбинных установок, которые работают в сложных и принципиально различных условиях эксплуатации, за счет обеспечения функционально-ориентированных свойств и выравнивания их ресурсов. Предложен технологический подход и принципы комплексного повышения работоспособности лопаток компрессора и турбины на основе разработки методики и алгоритма синтеза технологического обеспечения. Установлены связи между технологическими параметрами обеспечения свойств лопаток компрессора и турбины. Выполнен синтез структурно-технологического обеспечения лопаток турбокомпрессора. Предложена методика направленного поиска рациональных структурных вариантов технологических процессов обработки лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными свойствами. Разработан новый способ реализации функционально-ориентированных свойств лопаток турбокомпрессора и необходимое технологическое обеспечение его выполнения с учетом технологических связей. На ос-

нове выполненных исследований в работе разработана методика сравнительных ускоренных испытаний покрытий лопаток компрессора и турбины из условия равенства их ресурсов, при этом экспериментально установлена связь их параметров. В работе представлены рекомендации по повышению ресурса лопаток турбокомпрессора на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств и равенства ресурсов лопаток компрессора и турбины.

Ключевые слова: газотурбинная установка, компрессор, турбина, лопатки турбокомпрессора, комплексный технологический процесс, структура, связь параметров, функционально-ориентированные покрытия.

ABSTRACT

Pichko A. P. Synthesis of technological support for the comprehensive increase of the resource of turbo-compressor blades of gas turbine units of oil and gas industry.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.02.08 "Engineering manufacturing processes" - Donetsk National Technical University, Donetsk, 2019.

In the dissertation work the complex increase in the service life of compressor blades and turbine blades of gas turbine units, which operate in complex and fundamentally different operating conditions by providing function-oriented properties and leveling their resources. The general approach and principles of complex increase of serviceability of compressor and turbine blades on the basis of development of a technique and algorithm of synthesis of technological support are offered. Links between the technological parameters of ensuring the properties of compressor and turbine blades are established. The synthesis of the structural and technological support of the turbo-compressor blades was performed. The technique of directed search of rational structural variants of technological processes of processing of compressor blades and turbine with function-oriented properties is offered. A new way of implementing the function-oriented properties of the turbocharger blades and the necessary technological support of its implementation taking into account the technological connections is developed. On the basis of the executed researches in work the technique of the comparative accelerated tests of coverings of blades of the compressor and a turbine from a condition of equality of their resources is developed, thus experimentally established communication of their parameters. The paper presents recommendations on increasing the service life of turbo-compressor blades on the basis of providing function-oriented properties and equality of resources of compressor and turbine blades.

Key words: gas turbine installation, compressor, turbine, turbo-compressor blades, complex technological process, structure, connection of parameters, function-oriented coatings.