

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:

Ведущая

организация:

Защита состоится «___» _____ 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,

Е-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 целый комплекс лопаток различного назначения. При этом лопатки компрессора работают в принципиально различных условиях по сравнению с лопатками турбины. Это обусловлено, прежде всего, тем, что в компрессоре действуют одни виды эксплуатационных воздействий, а в зоне турбины происходит целый 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 газоздушного 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 и специалистов, 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).

Вместе с тем, можно отметить, что выполненные ранее исследования и полученные результаты являются достаточной основополагающей базой для создания функционально-ориентированных отделочно-упрочняющих технологий, структура которых базируется на основных закономерностях между технологическими воздействиями, свойствами и эксплуатационными функциями для групп лопаток компрессора и турбин.

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, в работе 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 вари-

антов 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 технологическое 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 лопа-

ток 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 положения и принципы технологии машиностроения; основные принципы и методология синтеза функционально-ориентированных технологий в машиностроении; системный 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 основные 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 ФОР, эффективностью внедрения результатов работы в производство.

Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих 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 13 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; 2 положительных решения на выдачу патентов на изобретения (Россия).

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. А также ГТУ совершенствуются в направлении улучшения их эксплуатационных свойств, компактности, эргономичности и экологической безопасности. При этом показано, что в нефтегазовой промышленности используются различные варианты принципиально-структурных схем ГТУ и эти технические системы являются открытыми к развитию и повышению эксплуатационных параметров.

На основании этих исследований в работе установлено, что структурные группы лопаток турбокомпрессора, а именно, 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. Кроме того, каждая лопатка компрессора имеет свои особенности разрушения относительно лопатки турбины, которые обусловлены возникновением неравномерностей разрушения элементов пера лопаток. Все это снижает общий ресурс ГТУ и не позволяет реализовать равный эксплуатационный потенциал лопаток компрессора и турбины.

Анализ существующих технологических методов, применяемых для повышения параметров качества лопаток турбокомпрессора ГТУ, позволил сделать выводы, 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. При этом реализуемые свойства лопаток компрессора выполняются не независимо относительно лопаток турбины, и наоборот. 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.

Таким образом, 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

ра и турбины, работающих в различных условиях эксплуатации, на базе функционально-ориентированного подхода и технологических связей.

Выполненный анализ особенностей эксплуатации лопаток турбокомпрессора позволил установить, что лопатки компрессора эксплуатируются в принципиально различных условиях по сравнению с лопатками турбины, что вызывает неравномерность их разрушений. Поэтому для решения вопросов повышения работоспособности ГТУ и выравнивания ресурсов лопаток компрессора и турбины в работе разработан технологический подход комплексного обеспечения ФОС их 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:

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

$$\text{или} \\ k_1 R_1 = k_2 R_2, \quad (2)$$

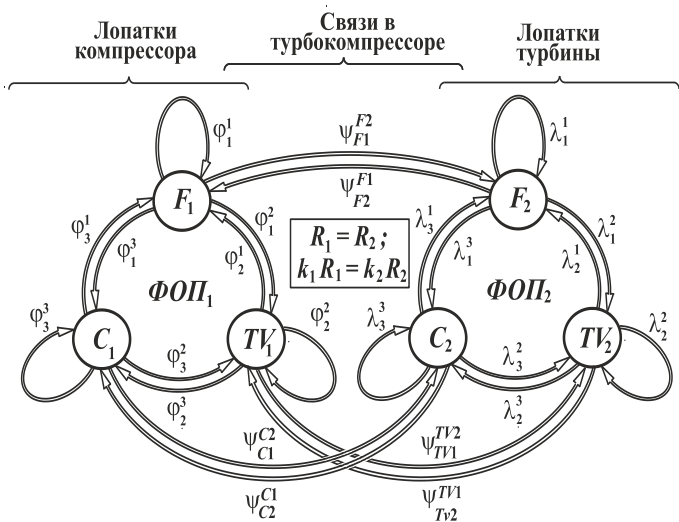


Рисунок 1. Гипотетическая схема технологического подхода в обеспечении ФОС лопаток турбокомпрессора

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 рисунке 1 представлена гипотетическая схема технологического подхода в обеспечении свойств лопаток турбокомпрессора на базе ФОП. Здесь, показаны две группы элементов схем для лопаток

компрессора и лопаток турбины, которые связаны между собой прямыми и обратными связями и образуют между собой единую систему в проектировании свойств лопаток в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на базе выполнения заданных технологических воздействий.

Для обеспечения ФОС лопаток компрессора в процессе преобразований участвуют следующие элементы: F_1 и F_2 – эксплуатационные функции действующие на лопатки компрессора и лопатки турбины, соответственно; $TV_1 = TV_1$ и $TV_2 = TV_2$ – технологические воздействия на лопатки компрессора и лопатки турбины, соответственно, 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

сора и лопаток турбины, ФОС реализуются на базе $\Phi ОП_1$ и $\Phi ОП_2$, соответственно. Внутреннее развитие каждого элемента подсистемы для лопаток компрессора и лопаток турбины выполняется с помощью связей-петель φ_i^i и λ_i^i .

Можно отметить, что 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.

На рисунке 2 представлены гипотетические схемы структуры покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины. Здесь показано: на рисунке 2, а –



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

можно отметить, что она определяется в основном особенностями абразивно-эрозионного износа, который может компенсироваться за счет абразивно-эрозионно-стойкого покрытия. Однако для реализации этого вида покрытия необходимы дополнительные покрытия (технологические покрытия) – связующие покрытия, обеспечивающие связи между предлагаемым покрытием и основным материалом лопатки. На рис. 2, а показана структура покрытия лопатки компрессора 1: M_{C11} - модуль связующих покрытий 2; M_{R12} - модуль абразивно-эрозионно-стойких покрытий 3. Модуль M_{R12} абразивно-эрозионно-стойкого покрытия решает вопросы защиты лопатки от абразивно-эрозионного износа, а модуль M_{C11} связывает модуль покрытия M_{R12} с основным материалом лопатки.

Следует отметить, что структура покрытий лопатки компрессора формируется в соответствии с принципами реализации ФОП с реализацией $\Phi ОП_1$. 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 свя-

а – структура покрытий лопатки компрессора; на рисунке 2, б – структура покрытий лопатки турбины. В этом случае, покрытия лопаток формируется в соответствии с особенностями эксплуатации лопаток (рисунок 1). В турбокомпрессоре лопатки компрессора и лопатки турбины эксплуатируются в принципиально различных условиях, поэтому на рисунке 2 структура покрытий лопаток неодинакова, она определяется особенностями эксплуатации этих групп лопаток.

Анализируя структуру покрытия лопатки компрессора (рисунок 2, а)

зующих покрытий 2, общая его толщина обычно составляет 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает материал лопатки с температуро-защитным жаростойким покрытием; M_{T22} - модуль температуро-защитных жаростойких покрытий 3, общая его толщина обычно составляет 300 ... 400 мкм, данный модуль покрытий снижает проникновение температуры к основному материалу лопатки из условия $\xi = 0,8 \dots 1,5$ °C/мкм; M_{C23} - второй модуль связующих покрытий 4, общая его толщина обычно составляет 0,25 ... 0,75 мкм, этот модуль связывает температуро-защитное жаростойкое с абразива эрозионно-жаростойким покрытием; M_{R24} - модуль абразиво-эрозионно-жаростойких покрытий 5, общая его толщина рекомендуется - 8,0 ... 20,0 мкм.

Можно отметить, что первый M_{C21} и второй M_{C23} модули связующих покрытий связывают основной материал лопатки с модулем M_{T22} температуро-защитного жаростойкого покрытия и модуль M_{T22} температуро-защитного жаростойкого покрытия с модулем M_{R24} абразиво-эрозионно-жаростойкого покрытия. Вместе с тем, можно заметить, что ресурс всего покрытий 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 этого модуля покрытия M_{T22} резко повышается температура на основном материале лопатки и происходит его разрушение.

Следует отметить, что 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 своей 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} - интенсивность разрушения покрытия лопатки компрессора;

μ_{R24} - интенсивность разрушения покрытия 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} - толщина i – го слоя покрытия лопатки компрессора;

h_{R24j} - толщина j – го слоя покрытия лопат

n_1 - количество слоев покрытия лопатки компрессора;

n_2 - количество слоев покрытия лопатки турбины.

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

Связь структур технологических процессов нанесения покрытий для лопаток компрессора и лопаток турбины можно представить с помощью основных положений теории графов:

$$\varphi_1 : G(X_1, A_1) \rightarrow G(X_2, A_2),$$

где φ_1 - функция отображения, действующая из прообраза в образ;

$G(X_1, A_1)$ - граф технологического процесса нанесения покрытия на лопатки компрессора;

$G(X_2, A_2)$ - граф технологического процесса нанесения покрытия на лопатки турбины.

Для приведения всех исследований диссертационной работы в единую структуру и увязки выполненных разработок, в работе предложена общая блок-схема диссертационной работы. Эта блок-схема 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.

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

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

На рис. 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. Здесь показана

но, что на базе одного варианта ФОП лопаток компрессора, имеющего модуль связующих покрытий и модуль абразиво-эрозионно-стойкого покрытия, возможно создание целого множества $1, 2, 3, \dots, x_2$ различных вариантов покрытий лопаток компрессора. При этом покрытия лопаток турбины в зависимости от

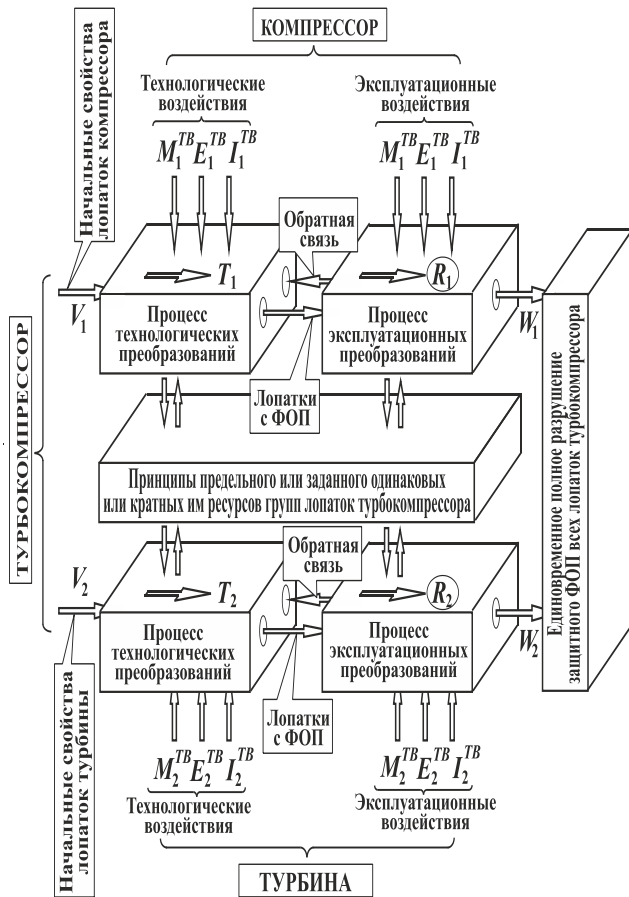


Рисунок 3. Структурная схема синтеза технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОП

X_j – этапы j -го технологического процесса;

A_j – связи между этапами j -го технологического процесса.

Можно отметить, что каждый технологический процесс ОУО лопаток компрессора или турбины с ФОП обычно формируется из трех этапов:

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

В выполненной 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 в данной работе разработана структура комплексных технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОП при их восстановлении и ремонте с учетом технологических связей.

действия эксплуатационных функций, особенностей охлаждения и материала лопаток могут быть двухмодульные и многомодульные (рисунке 4). В этом случае, при синтезе вариантов ФОП (рисунке 4) необходимо определять соответствия и связи параметров между покрытиями лопатки компрессора и лопатки турбины.

В работе исследованы особенности синтеза структуры комплексного технологического процесса ОУО лопаток турбокомпрессора с ФОП, реализуемого на основе технологических связей для лопаток компрессора и лопаток турбины. При этом структуру такого комплексного технологического процесса можно представить системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Str \Pi\Pi_1 &= \{X_1, A_1\}; \\ Str \Pi\Pi_2 &= \{X_2, A_2\}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

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

Для повышения эффективности синтеза комплексных технологических процессов ОУО лопаток компрессора и турбины с ФОП для ГТУ в данной работе 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.

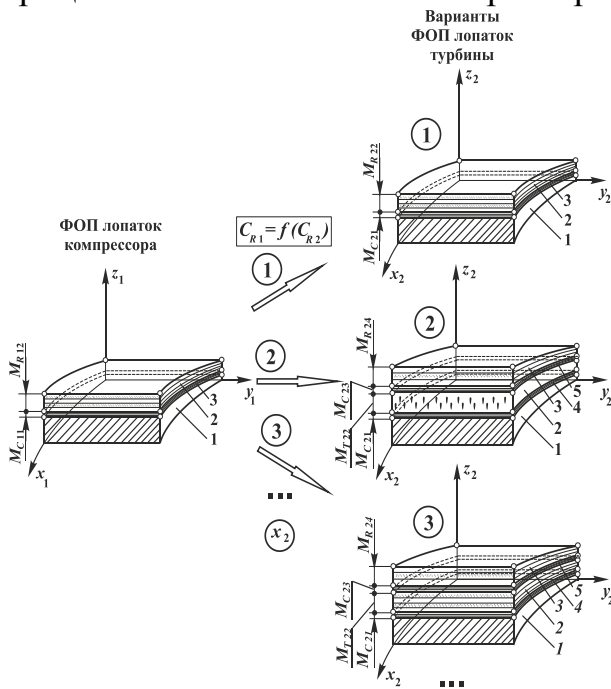


Рисунок 4. Особенности синтеза вариантов ФОП с учетом технологических связей

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.

В выполненной диссертации разработан новый способ обеспечения ФОС на базе ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины (заявка на изобретение № 2018107164/02(010972). Российская Федерация, МПК 8 С 23 С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя (положительное решение)).

На рисунке 5 представлено поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из слоев постоянной толщины. Разработанный способ реализуется следующим образом.

При эксплуатации лопатки ГТУ происходит неравномерный абразивно-эрозионный износ элементов и поверхностей пера лопатки, особенно это про-

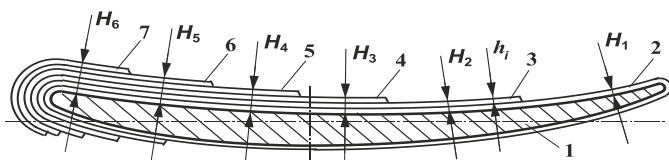


Рисунок 5. Поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из слоев постоянной толщины

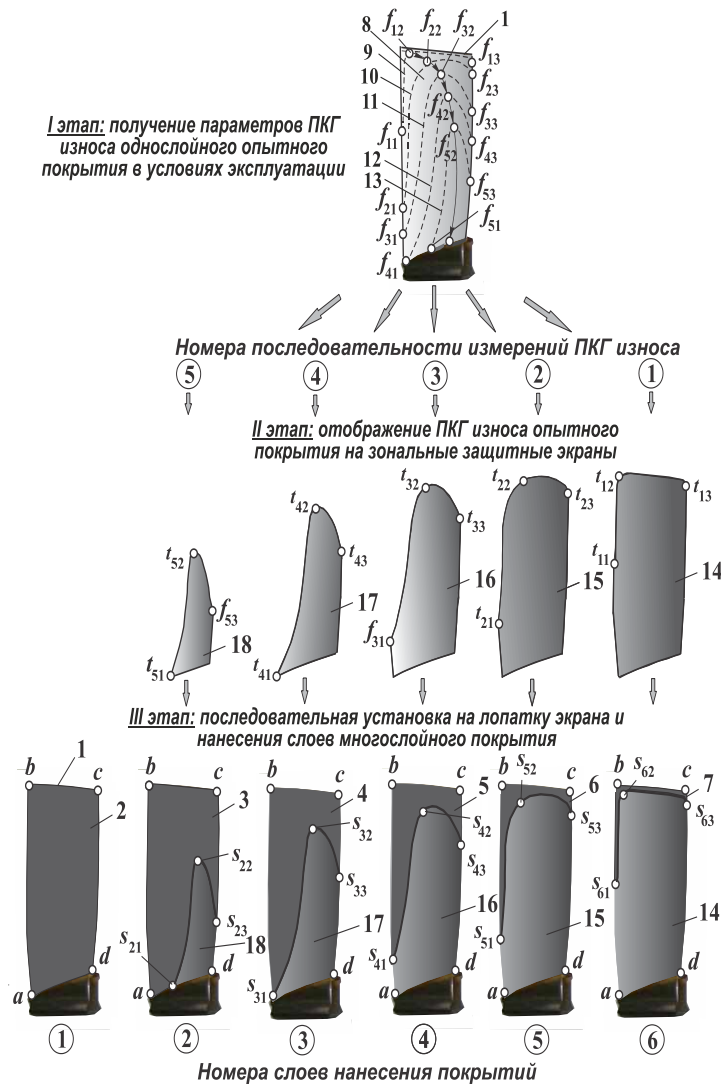
является у лопаток компрессора и турбины. Для компенсации неравномерного износа необходимо наносить на перо лопатки специальное ФОП, которое бы компенсировало действие этих неравномерностей. В этом случае, на поверхностях и элементах пера лопатки 1 (рисунок 5) необходимо формировать многослойное покрытие

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 аб-

разивно-эрозионного износа однослойного опытного покрытия постоянной толщины на лопатке в условиях эксплуатации.

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

Сначала, на первом этапе, предварительно производится испытание, в условиях эксплуатации ГТУ, опытного однослойного покрытия 8 постоянной



толщины на пере 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.

Далее, на третьем этапе, производится последовательный процесс нанесения каждого слоя покрытий. При этом первое покрытие 19 на пере лопатки наносится без зонального защитного экрана, а покрытия 20, 21, 22, 23, 24 выполняются с зональными защитными экранами, на которых отображены ПКГ. Поэтому на пере лопатки 1 получают многослойное ФОП переменной

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

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.

Разработанный принципиально новый способ реализации ФОП для лопаток компрессора и лопаток турбины обеспечивает следующее:

- 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.

В представленной работе разработана методика обеспечения ФОС на базе ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины на основе принципа равенства ресурсов, которая имеет следующую последовательность:

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

2. Определение 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 компрессора через равные промежутки времени T_j .

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 в работе 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 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

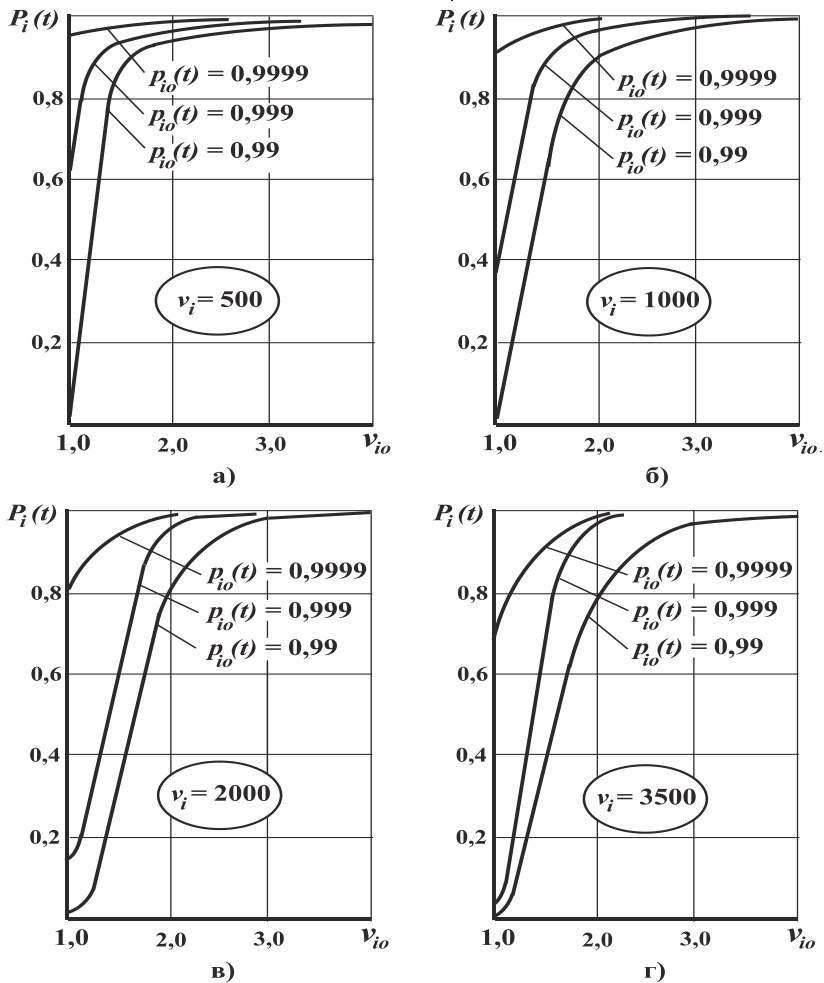


Рисунок 7. Зависимость вероятности безотказной работы i -й подсистемы ГТУ в зависимости от количества восстановлений рабочих лопаток

ния 0,9.

В пятом разделе представлены конкретные данные по технологической реализации ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины, проведены экспериментальные исследования параметров ресурса на основе установленных связей и разработаны рекомендации работы.

На рисунке 8 представлена гипотетическая схема синтеза комплексного технологического процесса напыления ФОП лопаток компрессора и турбины. Основные особенности синтеза комплексного технологического процесса реализуются в следующей последовательности:

1. Выполняется синтез технологического процесса (ТП) напыления ФОП лопаток компрессора. Этот процесс (рисунке 8) обеспечивает многослойную рекуррентную реализацию ФОП. При этом каждый слой покрытия имеет свой ПКГ.

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 значе-

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 (рисунке 8) 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. При этом для повышения производительности напыления

ФОП применялась специальная технологическая оснастка, имеющая высокую концентрацию рабочих позиций установки для напыления лопаток. Общее количество одновременно напыляемых лопаток определяется следующим выражением:

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

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.

Учитывая выражение (8) цикловая производительность установки для напыления ФОП определяется по следующей формуле:

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

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

n – количество слоев многослойного покрытия лопатки турбокомпрессора;

m – число составляющих вспомо-

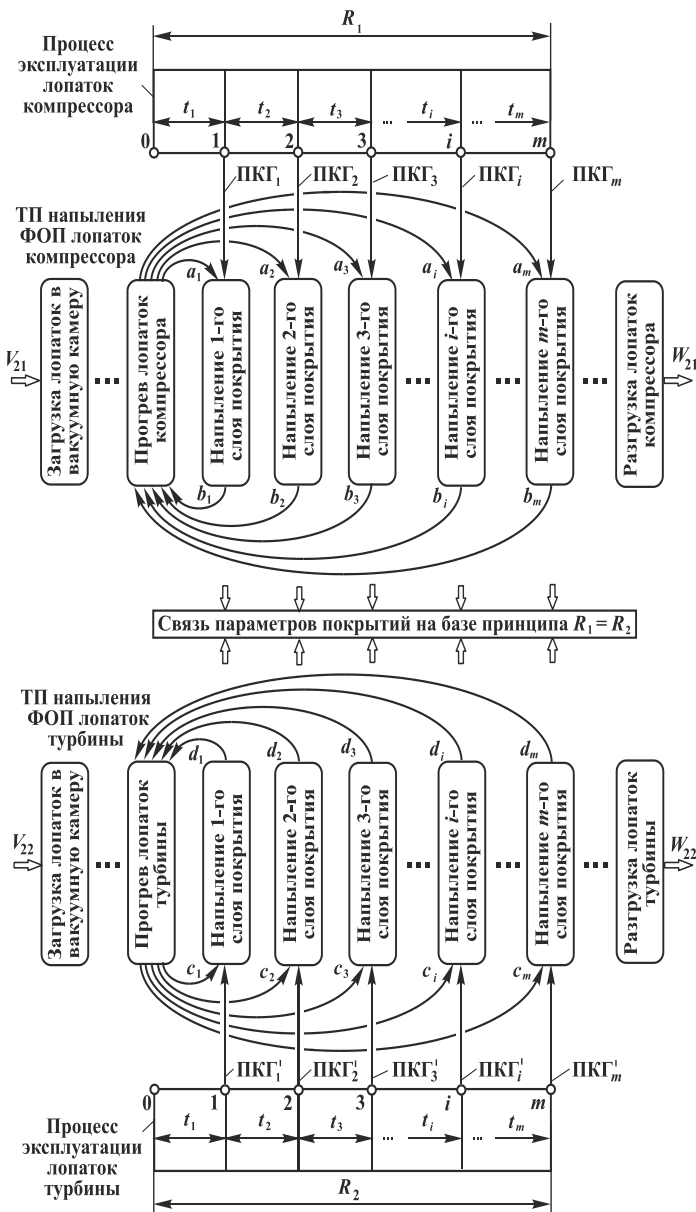


Рисунок 8. Гипотетическая схема синтеза комплексного технологического процесса напыления ФОП

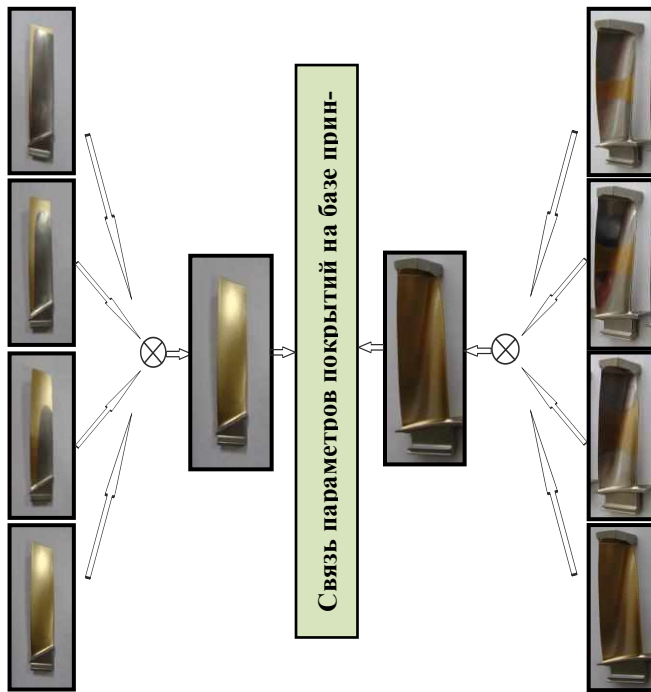


Рисунок 9. Структурная схема синтеза ФОП лопаток компрессора и турбины на базе принципа равенства ресурсов

свидетеля, 3 – газовая горелка, 4 – температурное ацетилено-кислородное пламя, 5 – абразивно-струйная головка, 6 – абразивно-воздушный поток, 7 – пирометр, 8 – лазерный луч пирометра, 9 – основание установки, 10 – пятно износа.

Проведенные ускоренные сравнительные испытания образцов-свидетелей с различными видами покрытий показали, что разность длительности их износа

могательного 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.

В представленной работе разработана методика ускоренных сравнительных испытаний свойств покрытий лопаток компрессора и турбины. На рисунке 10 представлена структурная схема экспериментальной установки для сравнительных испытаний покрытия образцов-свидетелей, 2 – покрытие образца

составляет 3-6%, что является достаточно хорошими результатами по сходимости.

Выполненные в диссертационной работе 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 и установления технологических связей. Это выполняется посредством установления особенностей износа лопаток компрессора и турбины в ГТУ, применения ФОП лопаток турбокомпрессора и обеспечения выравнивания ресурса

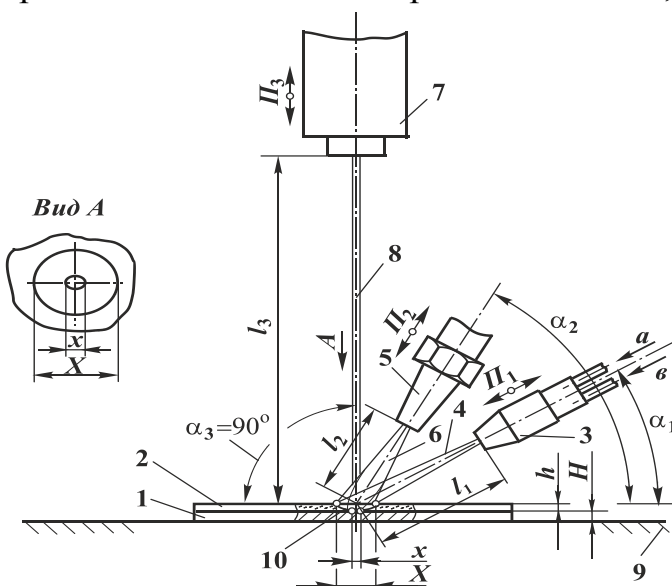


Рисунок 10. Структурная схема экспериментальной установки для сравнительных испытаний покрытия образцов-свидетелей

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 по-

крытия 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). Общий 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 ФОП).*

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 экс-

плуатация 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.

Другие научные работы

12. Михайлов, А. Н. Заявка на изобретение № 2018107164/02(010972). Российская Федерация, МПК 8 С 23 С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя [Текст] / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, **А. П. Пичко** и [др.] // Заявитель и патентообладатель УФ УГТУ. - № 2018107164/02(010972); заявл. 26.02.2018; - 10 с. (Положительное решение).

13. Сухарев, В. И. Заявка на изобретение № 2018103119/02(004506). Российская Федерация. МПК 8: В23В 51/08. Комбинированный осевой лезвийный инструмент [Текст] / В. И. Сухарев, **А. П. Пичко**, Н. С. Пичко и [др.] // Заявитель и патентообладатель УФ УГТУ. - № 2018103119/02(004506); заявл. 26.01.2018; - 11 с. (Положительное решение).

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; [12, 13] – соискателем разработаны конкретные примеры реализации свойств изделий.

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 основе 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.