

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Михайлов Дмитрий Александрович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-
ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ**

05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2016

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Научный

руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Ивченко Татьяна Георгиевна

Официальные

оппоненты:

Витренко Владимир Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Луганский государственный университет им. В. Даля»,
проректор по научной работе;

Лукичев Александр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
Частное высшее учебное заведение
«Донецкая академия автомобильного транспорта»

Ведущая

организация:

**Государственная образовательная организация
высшего профессионального образования
«Донецкий институт железнодорожного транспорта»**

Защита состоится «__» _____ 2016 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при Донецком национальном техническом университете по адресу: ауд. 6.202,а, пр. Дзержинского, 1, г. Донецк, 283001.

Тел./факс: +380 62 3050104,

E-mail: tm@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 «__» _____ 2016 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 01.014.02

Грубка Р.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) являются основными элементами современных авиационных двигателей, которые определяют ресурс и надёжность их эксплуатации в условиях действия агрессивной газовой среды, температуры, влажности, жидких частиц, пыли, песка и других частиц в воздушном потоке, что приводит к возникновению химико-абразивной эрозии элементов лопаток и выходу их из строя.

Для современных двигателей лопатки компрессора изготавливают из специальных титановых сплавов со сложной пространственной формой пера, при этом они имеют тонкие входные и выходные кромки. Лопатки - это одни из самых трудоёмких и дорогостоящих изделий ГТД. Это обусловлено тем, что для их изготовления применяются сложные технологии и дорогостоящие материалы, а также используется в одном двигателе большое количество лопаток.

Для повышения ресурса и надёжности работы лопаток компрессора ГТД применяется целый комплекс различных отделочно-упрочняющих операций. Вместе с тем, используемые технологии не позволяют исключить постоянно действующие неравномерные разрушения поверхностей пера лопатки, возникающие из-за эрозионно-коррозионных воздействий внешней среды.

Неравномерность эрозионно-коррозионных разрушений поверхностей пера лопатки обусловлена ее пространственной формой и особенностью кинематики движения, спецификой движения газовых потоков в тракте двигателя и действием частиц пыли, песка, жидкости и других веществ. Разрушение лопатки компрессора обычно начинается с входной кромки пера в зоне пересечения входной и периферийной кромок. Далее, разрушения распространяются по входной кромке вниз к замку лопатки и по периферийной кромке к выходной кромке. Затем, от этих зон начинает неравномерно разрушаться поверхностный слой корыта лопатки. Поэтому в целом, элементы пера лопатки разрушаются неравномерно и имеют определённые закономерности разрушений в процессе эксплуатации лопаток в ГТД.

В этом случае, для повышения ресурса лопаток компрессора используют различные типы покрытий постоянной толщины, которые, к сожалению, не исключают их неравномерных эрозионно-коррозионных разрушений. Поэтому для дальнейшего повышения общего ресурса лопаток компрессора в условиях действия неравномерных разрушений предлагается применять специальные покрытия с функционально-ориентированными свойствами (ФОС). Эти свойства для лопаток компрессора ГТД обеспечиваются на базе функционально-ориентированных покрытий (ФОП), которые исключают их разрушения в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий внешней среды.

На основании этого, разработка общего подхода, принципов и технологического обеспечения для реализации ФОП для лопаток компрессора ГТД является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение.

Степень разработанности темы. Выполненные в данной работе исследования направлены на разработку технологического обеспечения для реализации ФОП, обеспечивающих повышение ресурса лопаток компрессора ГТД в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных разрушений.

В настоящее время, этим вопросам посвящено большое количество исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов, работающих в области

создания новых технологий для авиационных двигателей. Данные исследования позволяют разрабатывать технологии, способные обеспечивать повышение ресурса лопаток компрессора ГТД. Однако эти исследования не решают вопросы повышения их работоспособности в условиях действия неравномерных разрушений по поверхности пера лопаток и по номерам их ступеней. Это связано с тем, что в данное время нет данных, технологий и технологического обеспечения синтеза специальных свойств лопаток компрессора, способных компенсировать неравномерные воздействия среды и разрушения их элементов. При этом на базе ФОП можно решать вопросы дальнейшего повышения ресурса лопаток и ГТД в целом. Для этого необходимо создание основ синтеза технологий отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) лопаток компрессора с ФОП.

Вместе с тем, можно отметить, что выполненные ранее исследования и полученные результаты являются хорошей базой для создания технологического обеспечения повышения работоспособности лопаток компрессора ГТД на основе ФОП.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является повышение полного ресурса лопаток компрессора ГТД, которые эксплуатируются в условиях действия изменяющихся по перу и по номерам ступеней компрессора эрозионно-коррозионных воздействий среды, за счет увеличения межремонтного ресурса и числа восстановлений лопаток на основе комплексной ОУО лопаток с формированием ФОП и требуемой структуры технологического процесса.

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

1. Выполнить исследования особенностей работы лопаток компрессора ГТД. Провести анализ применяемых методов ОУО лопаток компрессора для повышения их работоспособности.

2. Разработать общий подход и принципы синтеза технологического обеспечения реализации ОУО лопаток компрессора с ФОП. Предложить методику синтеза структуры технологического процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД.

3. Усовершенствовать технологическое обеспечение механической отделочной обработки пера лопатки компрессора. Провести исследования особенностей процесса полирования поверхностей пера лопатки из титановых сплавов без покрытия и с нитрид титановым покрытием.

4. Исследовать особенности съема оставшихся при износе неразрушенных покрытий поверхностей пера лопатки компрессора. Предложить схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки.

5. Разработать классификацию ФОП для лопаток компрессора ГТД. Провести синтез структурных вариантов технологических процессов реализации ФОП.

6. Определить рациональные варианты концентрации лопаток компрессора в вакуумной камере ионно-плазменной установки и исследовать возможные виды их структуры. Выполнить анализ кинематики движений лопаток в вакуумной камере.

7. Разработать базовые варианты структурно-технологического обеспечения по формированию ФОП лопаток компрессора. Выполнить экспериментальные исследования по реализации ФОП лопаток.

8. Разработать рекомендации по синтезу структуры технологического процесса для реализации ФОС новых и восстановления изношенных лопаток компрессора

ГТД. Внедрить результаты работы в производство.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является структура технологического процесса ОУО лопатки компрессора ГТД с ФОП, а предметом – связи и закономерности между операциями технологического процесса ОУО рабочих поверхностей пера лопатки компрессора с ФОС.

Научная идея работы заключается в создании структуры технологического процесса ОУО поверхностей пера лопатки с напылением многослойного аппроксимированного ФОП, обеспечивающего повышение полного ресурса лопаток компрессора за счет увеличения межремонтного ресурса и числа их восстановлений в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий среды по поверхности пера и номерам ступеней лопаток ГТД.

Научная новизна полученных результатов. В работе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание технологии ОУО лопаток компрессора с ФОП, обеспечивающих повышение их общего ресурса в условиях действия переменных эрозионно-коррозионных воздействий. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Предложено для компенсации действия неравномерных эрозионно-коррозионных разрушений и повышения работоспособности лопаток компрессора ГТД применять ФОП, формируемых на базе принципа единовременного полного износа покрытия (ЕПИП), происходящего как по поверхности пера, так и по номерам ступеней лопаток компрессора.

2. Впервые разработан общий подход и методика реализации технологии ОУО лопаток компрессора с ФОП, выполняемых на базе принципа ЕПИП, в зависимости от особенностей действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий внешней среды.

3. Получила дальнейшее развитие методология реализации ФОП лопаток компрессора на базе аппроксимации изменяющейся толщины покрытия с помощью группы многослойных равнотолщинных покрытий, формируемых на базе принципа ЕПИП.

Теоретическая значимость работы.

1. Установлена физическая сущность и особенности процесса полирования поверхностей пера лопаток компрессора из титановых сплавов без покрытий и с покрытиями.

2. Разработаны схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки – титанового сплава.

3. Разработаны математические структурно-функциональные модели покрытий для лопаток компрессора ГТД.

4. Разработан метод синтеза структуры технологического процесса ОУО поверхностей пера лопатки с напылением многослойного аппроксимированного ФОП, обеспечивающего повышение полного ресурса лопаток компрессора за счет увеличения межремонтного ресурса и числа их восстановлений в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий среды по поверхности пера и номерам ступеней лопаток ГТД.

5. Разработан алгоритм синтеза структуры технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные технологические процессы и технологическое обеспечение ОУО лопаток компрессора с ФОП повышают ресурс работы лопаток компрессора между восстановлениями в 1,5 раза и количество их восстановлений до двух - трех раз в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий. Это повышает до 4,5 раза общий ресурс лопаток компрессора при двух кратном их восстановлении и снижает 1,5 ... 2,0 раза затраты на их эксплуатацию.

2. Разработанная методика синтеза структуры универсального технологического процесса позволяет проектировать конкретные варианты технологических процессов ОУО поверхностей пера лопатки компрессора ГТД с традиционными свойствами и ФОП, компенсирующих действие неравномерных эрозионно-коррозионных их разрушений.

3. Предложенные рекомендации ОУО лопаток компрессора с ФОП позволяют генерировать полное множество различных вариантов технологических процессов и определять их рациональные структурные варианты.

4. Результаты работы внедрены на Снежнянском машиностроительном заводе ОАО «Мотор-Сич», Луганском ЧП «Депла» и в Донецком национальном техническом университете. Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 998460,00 рублей РФ (девятьсот девяносто восемь тысяч четыреста шестьдесят рублей РФ).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, обладающих новизной, в данной работе использован следующий комплекс методов, принципов и научных положений: основные положения, принципы, методы и правила технологии машиностроения; основные принципы, методы и методология синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения; системный и объектно-ориентированный подходы при создании технологий и технологического обеспечения; принципы теории производительности и теории множеств; методы морфологического синтеза структуры операций технологических процессов; 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 при обеспечении изменяющейся толщины и/или физико-механических свойств покрытия по поверхности пера лопатки в функциональном соответствии с действующими переменными эрозионно-коррозионными разрушениями, происходит при эксплуатации единовременное полное или частичное (остается равнотолщинное покрытие) разрушение покрытия на всей поверхности пера лопатки в заданный период ее эксплуатации;

- научное положение о том, что последовательно формируя группу многослойных равнотолщинных ФОП обеспечивается создание аппроксимированного ФОП с изменяющейся толщиной;

- научное положение о том, что при выполнении многократного восстановления ионно-плазменного покрытия на поверхностях пера лопатки с формированием их ФОС, обеспечивается возможность реализации равной работоспособности лопат-

ки по действию эрозионно-коррозионных разрушений поверхностей пера и по действию циклических напряжений в теле пера лопатки;

- общий подход и принцип обеспечения свойств лопаток ГТД на базе ФОП;
- классификация ФОП лопаток компрессора ГТД;
- методика и алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД;
- метод опорного полирования поверхностей пера лопатки компрессора для съема старых покрытий.

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, полученными результатами опытных испытаний лопаток компрессора с ФОП, эффективностью внедрения результатов работы в производство.

Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих международных научно-технических конференциях: «Технологии и техника автоматизации - 2009» (г. Ереван, Армения, 2009 г.); «ModTech – 2011 «Les problèmes contemporains de la technosphère et de la formation des cadres d'ingénieurs» (Sousse, Hammamet, Tunisia, 2013, 2014); «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2012 г., 2014 г., 2015 г.). А также на международном научно-техническом семинаре «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (г. Таганрог, Россия, 2012 г.) и научно-практической конференции «Донбасс – 2020: Перспективы розвитку очима молодих вчених» (г. Донецк, 2012 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета и XXII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в 2015 г. в городе Севастополе.

Структура и объем работы. Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 194 наименования и приложения с методиками и актами внедрения результатов работы. Диссертация содержит 109 рисунков и 10 таблиц. Общий объем работы – 160 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе работы выполнен анализ современного состояния вопроса исследований, представлены данные о развитии вертолетных двигателей, проанализированы эксплуатационные особенности лопаток компрессора и исследованы существующие технологические методы ОУО лопаток компрессора ГТД.

Анализ литературных источников, касающихся эксплуатации лопаток компрессора вертолетных двигателей, показал, что при эксплуатации ГТД на лопатки

компрессора действует целый комплекс внешних и внутренних факторов. Эти факторы в своей совокупности приводят к неравномерному характеру эрозионно-коррозионного разрушения элементов пера лопатки. Причем возникающие неравномерности разрушений действуют как по поверхности пера лопатки, так и по мерам ступеней лопаток компрессора. Это приводит к снижению ресурса и сти лопатки компрессора из-за неравномерного разрушения и невозможности, в де случаев, ее восстановления. Все это ведет к снижению технико-экономических показателей эксплуатации вертолетных двигателей.

Выполненный анализ существующих методов и технологических процессов ОУО лопаток компрессора ГТД позволил установить, что они дают возможность обеспечивать только равномерные параметры свойств поверхности пера лопатки. Причем эти процессы не позволяют обеспечивать неравномерные свойства поверхности лопатки в зависимости от изменяющихся параметров эрозионно-коррозионных воздействий среды по поверхности пера и по номерам ступеней компрессора. Все это не позволяет обеспечивать полный потенциал работоспособности лопатки компрессора.

Кроме того, в случае восстановления работоспособности лопаток, старое неравномерно изношенное покрытие на поверхности корыта пера лопатки очень сложно удалять при обработке. Это снижает параметры качества поверхностного слоя пера лопатки, а именно образуются углубления – макроямы и волнистость на поверхности лопатки из-за продавливания покрытия при обработке. Продавливание покрытия происходит вследствие того, что оно и основной материал имеют различную твердость, превышающую относительно друг друга в десятки раз.

На основании проведенных исследований существующих особенностей эксплуатации лопаток компрессора, анализа современных технологических возможностей их отделочно-упрочняющей обработки, возникающих при этом проблем, сделанных выводов, выполненного анализа литературных источников по этим проблемам была определена цель и сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Второй раздел диссертационной работы посвящен вопросам разработки общего подхода в повышении эксплуатационных свойств лопаток компрессора ГТД, а также исследованиям особенностей синтеза структуры технологических процессов обеспечения ФОС и восстановления физико-механических свойств покрытия.

Выполненные исследования позволили установить, что эрозионно-коррозионный износ лопатки имеет определенные особенности, а именно: входная кромка (зона около входной кромки) имеет переменный износ по своей длине, увеличивающийся от полки лопатки к периферии пера лопатки, величина которого может изменяться более 2-х раз; выходная кромка (зона около выходной кромки) имеет переменный износ по своей длине, увеличивающийся от полки лопатки к периферии пера лопатки, величина которого может изменяться до 1,5 раз; периферийная кромка (зона около периферии корыта пера) имеет переменный износ по своей длине, уменьшающийся от входной к выходной кромке, величина которого может изменяться до 1,3 ... 1,5 раз и более; поверхность корыта пера лопатки имеет переменный износ, изменяющийся по поверхности более 2-х раз; поверхность спинки пера лопатки имеет сравнительно незначительный износ.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия частиц пыли или песка аэродинамического потока с лопатками компрессора. Здесь показано следующее: позиции 1 и 2 - соседние лопатки компрессора; v_1 - направление движения потока воздуха по тракту двигателя; v_2 - поперечная скорость относительного движения частиц пыли или песка в потоке; v - суммарная скорость относительного движения частиц пыли и песка по траекториям относительного движения в потоке; v_2^I - линейная скорость поперечного движения лопатки; a, b, c, d - траектории относительного движения частиц разных размеров; α - угол соударения частиц пыли или песка с поверхностью корыта пера лопатки ($\alpha \neq \text{const}$, величина определяется формой корыта пера лопатки).

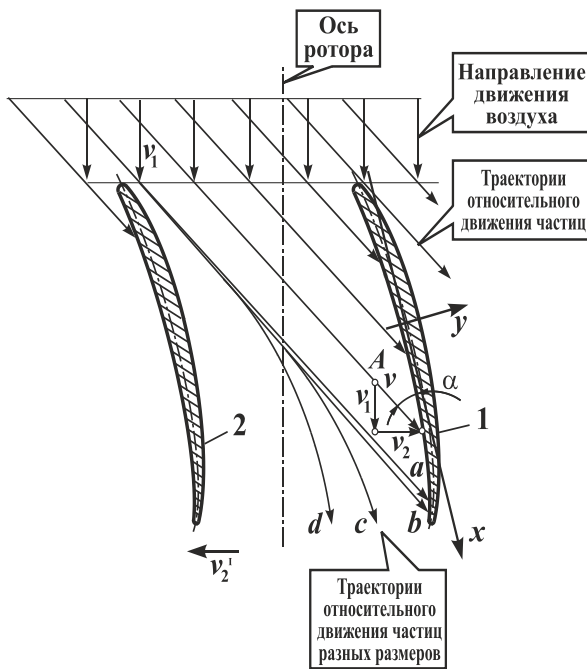


Рисунок 1. Схема взаимодействия частиц пыли или песка аэродинамического потока с лопатками

тракту двигателя; v_2 – поперечная скорость относительного движения частиц пыли или песка в потоке; v – суммарная скорость относительного движения частиц пыли и песка по траекториям относительного движения в потоке; v_2^I – линейная скорость поперечного движения лопатки; a, b, c, d – траектории относительного движения частиц разных размеров; α - угол соударения частиц пыли или песка с поверхностью корыта пера лопатки ($\alpha \neq \text{const}$, величина определяется формой корыта пера лопатки).

Можно отметить, что траектории относительного движения частиц пыли или песка a (рис. 1) почти не отклоняются от теоретических значений, при этом с уменьшением размера частиц до размеров $\delta < 10 \dots 15$ мкм траектории b, c, d начинают отклоняться и тем больше, чем меньше частицы. Это обусловлено особенностями аэродинамического потока

воздуха в тракте компрессора вертолетного двигателя.

Интенсивность эрозионного изнашивания элементов пера лопатки зависит от целого комплекса параметров: состава потока газов, паров и жидкости; формы, состава, структуры и материала частиц пыли и песка аэродинамического потока; скорости относительного движения частиц и поверхности пера лопатки компрессора; угла соударения частиц с поверхностью пера лопатки; материала пера лопатки.

Проведенные исследования позволили разработать общий подход обработки и восстановления функциональных элементов пера лопатки на основе ФОР, обеспечивающих ЕПИП в период эксплуатации лопатки. Это обеспечивает возможность повышения ресурса лопаток до их восстановления и увеличения количества восстановлений. Все это существенно повышает общий ресурс лопаток компрессора при эксплуатации ГТД. В этом случае ФОР напыляются в зависимости от особенностей эксплуатации лопаток компрессора.

На рис. 2 представлена модель взаимосвязей между элементами системы «эксплуатация-технологические воздействия-свойства» при реализации принципа ЕПИП. Здесь показаны три составляющие процесса: 1 – эксплуатация лопаток, при которой происходит неравномерный износ покрытия; 2 – технологические воздействия при напылении ФОР; 3 – ФОР.

Эти процессы взаимосвязаны между собой потоками материи, энергии и информации, которые представлены связями F_i^j . Структурные составляющие модели рис. 2 связаны между собой на базе принципа ЕПИП, показанного позицией 4. Разработанная модель показывает, что реализация принципа ЕПИП при изготовлении или

восстановления лопаток компрессора возможна на базе связей в системе «эксплуатация-технологические воздействия-свойства».

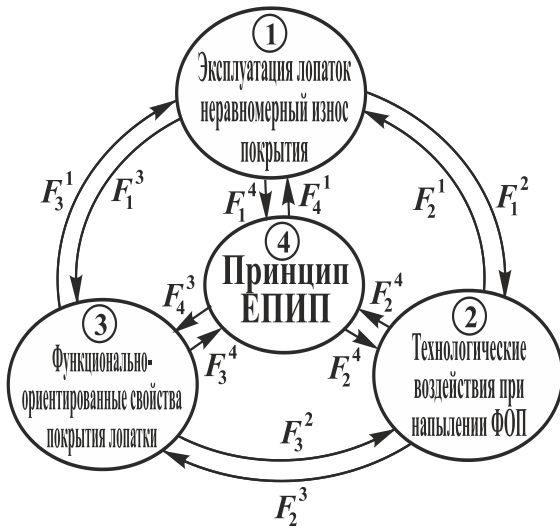


Рисунок 2. Модель взаимосвязей между элементами системы «эксплуатация-технологические воздействия-свойства» при реализации принципа ЕПИП

воздействий и свойств пера лопатки дают технологам ключ для научно обоснованного обеспечения заданного, требуемого или предельного потенциала возможностей лопаток компрессора в ГТД.

Для обеспечения ФОС лопаток и составления маршрута технологического процесса в работе предложено выполнять процесс деления лопатки компрессора на новый основе. При этом предусматривается его реализовывать на базе функциональных элементов с формированием их по уровням глубины технологии. Этот процесс деления лопатки по уровням глубины технологий дает возможность технологам реализовывать необходимые технологические воздействия орудий и средств обработки на лопатки на местных уровнях. При этом ориентация технологических воздействий и свойств лопатки на базе особых принципов ориентации по уровням глубины технологии дает возможность полностью адаптировать лопатки к особенностям эксплуатации, а также выполнять заданный, требуемый или предельный эксплуатационный потенциал лопатки в зависимости от особенностей эксплуатации.

ФОП лопаток компрессора ГТД ТВ3-117 последовательно формируются по схеме рис. 3, на котором представлено разрушение старого и последовательное формирование многослойного ФОП на 6-ти этапах – по одному на каждом.

Выполненные исследования позволили разработать методику и алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД. Представленные результаты позволяют универсально решать вопросы нанесения ФОП.

В диссертации разработана блок-схема работы, она даёт возможность определять взаимосвязи между отдельными этапами разрабатываемого технологического процесса, позволяет связать все этапы работы между собой, становится видна по-

В представленной работе разработана классификация ФОП. Эта классификация позволяет генерировать полное множество различных вариантов ФОП и выбирать наиболее рациональные покрытия для различных лопаток ГТД.

Приведенные математические структурно-функциональные символьные модели однослойных и многослойных покрытий пера лопатки позволяет выполнять синтез заданных или требуемых свойств изделий. Процесс синтеза необходимых свойств пера лопатки может выполняться на базе морфологического подхода с использованием морфологических матриц и методов морфологического синтеза вариантов покрытий, в том числе и патентоспособных.

В данной работе выполнено обеспечение ФОС поверхности пера лопатки компрессора на базе особых принципов ориентации покрытий. Эти принципы ориентации технологических

следовательность и взаимозависимость каждого этапа, его влияние на ние заданных свойств лопаток компрессора ГТД при их ОУО. А также данная блок-

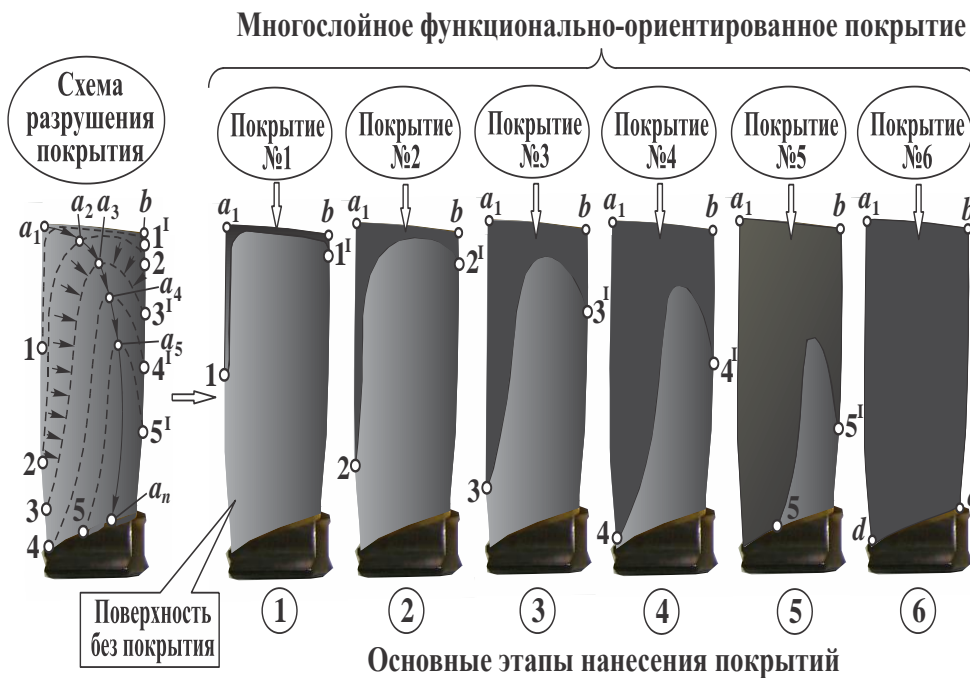


Рисунок 3. Схема формирования многослойного ФОП

схема позволяет решить общие вопросы синтеза функционально-ориентированного технологического процесса и обеспечить достижение поставленной цели.

В третьем разделе работы представлены данные по совершенствованию технологического обеспечения отделочной обработки пера патки ГТД.

Проведенный анализ особенностей обработки пера лопатки компрессора позволил установить структуру операций их отделочной обработки. При этом в работе выделена ра операций до и после нанесения нитрид титановых покрытий, которая связана только с механической отделочной обработкой лопаток ГТД.

В работе установлена физическая сущность и особенности процесса полирования поверхностей пера лопаток компрессора из титановых сплавов без покрытий и с покрытиями. При этом установлено, что при полировании изделий в зоне обработки одновременно действует целый ряд различных факторов. Здесь, при полировании лопатки компрессора из титанового сплава, имеющей тонкое нитрид титановое покрытие, можно выделить следующие воздействия: химическое воздействие поверхностно-активных полирующих веществ, резание абразивными зернами или размельчение (диспергирование) тончайшего поверхностного слоя, пластическое течение микрорельефа полируемой поверхности, пластическая деформация поверхностного слоя, термическое воздействие, сколы и хрупкие разрушения нитрид титановых покрытий. При полировании поверхности лопаток обычно эти факторы реализуются в едином комплексе. При этом на различных переходах могут преобладать те или иные факторы, которые определяются переходом операции, режимами и параметрами обработки. В работе показано, что при выполировке покрытия и предварительном полировании лопаток преобладает процесс резания, а при гляцевании - пластическая деформация поверхностного слоя с химическими процессами.

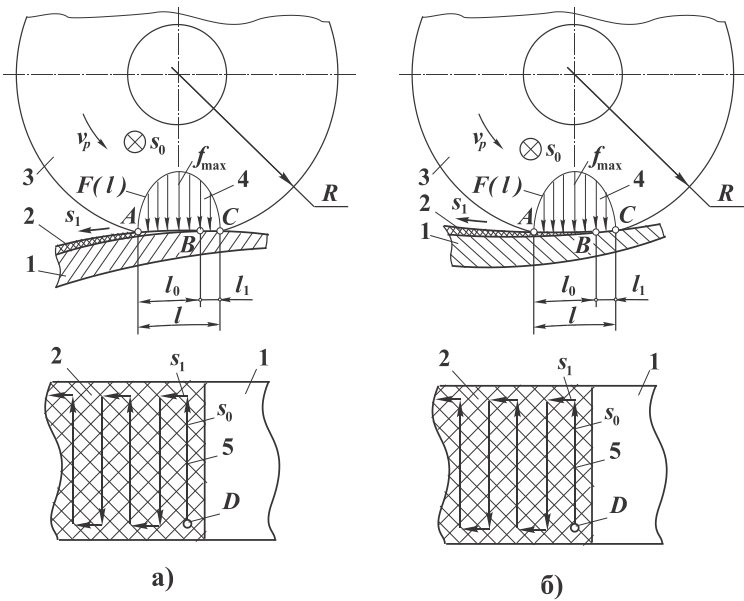


Рисунок 4. Схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга по подаче s_0 : а – полирование покрытия спинки, б – полирование покрытия корыта

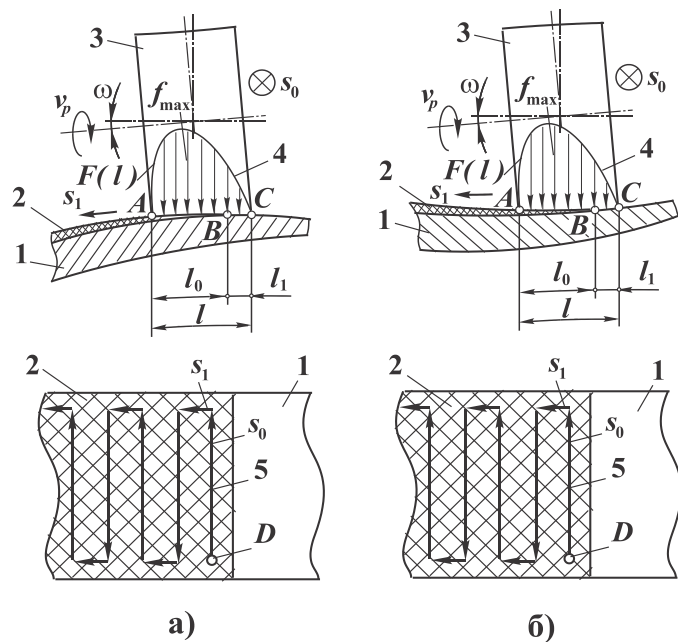


Рисунок 5. Схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга перпендикулярно подаче s_0 и перекосом ω : а – полирование покрытия спинки, б – полирование покрытия корыта

валовального круга с удаляемым покрытием, l_1 – длина контакта полировального круга с основным материалом пера лопатки, ω – угол перекоса продольной оси полировального круга относительно касательной к полируемой поверхности пера лопатки.

В работе предложено вести съём старых покрытий методом опорного полирования поверхностей пера лопатки компрессора, которые необходимо выполнять при восстановлении их работоспособности. Для одновременной обработки двух разнородных материалов, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки из титанового сплава разработаны две схемы опорного полирования, представленные на рис. 4 и рис. 5. Здесь показаны: обработка поверхности спинки пера лопатки (рис. 4,а и рис. 5,а) и обработка поверхности корыта пера лопатки (рис. 4,б и рис. 5,б). На верхнем рис. 4 или рис. 5 показана схема обработки, а на нижнем – показана схема трассирования инструмента при обработке поверхности. На этих схемах обозначено: 1 – тело пера лопатки (титановый сплав ВТ-8М), 2 – нитрид титановое покрытие, 3 – инструмент – полировальный круг, 4 – эпюра удельного давления прижатия инструмента к поверхности пера лопатки, 5 – траектория трассирования инструмента при обработке пера лопатки. А также, на этих рисунках показано: s_0 – поперечная подача инструмента, s_1 – продольная подача инструмента, v_p – скорость резания, R – радиус полировального круга, $F(l)$ – функция распределения удельного давления полировального круга на поверхность пера лопатки, представленная в плоскости, f_{max} – максимальное удельное давление в эпюре $F(l)$, l – длина контакта полировального круга на поверхности пера лопатки (длина эпюра удельного давления), l_0 – длина контакта полиро-

Разработанные схемы обработки позволяют вести подготовку поверхностей пера лопатки состоящих из двух принципиально различных материалов, а именно из титанового сплава и старого (частично изношенного) нитрид титанового покрытия. При этом обеспечиваются заданные параметры качества обработки пера лопатки.

В работе рассмотрены некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток компрессора из титановых сплавов для предварительного и окончательного размерного полирования, в условиях, когда радиусы кривизны полируемой внутренней поверхности лопатки и полировальника близки по геометрическим параметрам. При этом разработаны схемы взаимодействия инструмента и криволинейных поверхностей лопатки, которые основываются на распределении удельной нагрузки по Штаерману-Герцу. Используя закон распределения контактной нагрузки, действующий по образующей в соответствии с распределением Штаермана, а по направляющей – по Герцу можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 2(v_1 r_{11} + v_2 r_{21}) \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) \cos(\gamma - \gamma^1) \ln \operatorname{tg} \frac{|\gamma - \gamma^1|}{2} d\gamma^1 - (x_1 r_{11} + x_2 r_{21}) \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) \sin|\gamma - \gamma^1| d\gamma^1 + \\ + 2v_1 r_{11} \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) d\gamma^1 = (r_{21} - r_{11})(1 - \cos\gamma) - y \cos\gamma; \\ -\gamma_0 < \gamma < \gamma_0; \\ P_i = 3,636\pi \frac{r_{11} r_{12}}{E} \int_0^\gamma p^2(\gamma) \cos\gamma d\gamma, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$$v_1 = \frac{\lambda_1 + 2\mu_1}{4\pi\mu_1(\lambda_1 + \mu_1)}, \quad v_2 = \frac{\lambda_2 + 2\mu_2}{4\pi\mu_2(\lambda_2 + \mu_2)},$$

$$x_1 = \frac{1}{4(\lambda_1 + \mu_1)}, \quad x_2 = \frac{1}{4(\lambda_2 + \mu_2)}.$$

Здесь: $\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2$ - упругие постоянные контактирующих поверхностей инструмента и лопатки; E – модуль упругости; P_i – нагрузка, прикладываемая к инструменту; γ - угол до рассматриваемой точки в области контакта.

Решение этой задачи сводится к решению интегро-дифференциального уравнения (1) Прандля, метод, решения которого предложен Векуа. Оно сводится к замене одной из функций приближенным выражением, однако решение такого уравнения получается в замкнутом виде и полученные определенные интегралы не выражаются в явном виде. Поэтому решение этой системы уравнений выполняется методом конечных разностей. В результате определяется максимальное удельное давление. На базе выражения (1) выявляются параметры предельного нагружения полировальника при обработке лопатки в условиях автоматизированных методов.

Рассмотрены особенности полировки и глянцеваания тонких покрытий лопаток компрессора, а также предложен метод назначения припусков при полировании особо тонких покрытий. В работе разработан метод сглаживающего полирования (глянцеваания) поверхностного слоя покрытия базирующийся на методе высотного сглаживающего полирования тонких покрытий.

В четвертом разделе диссертационной работы представлен функционально-структурный синтез технологического обеспечения процессов нанесения покрытий лопаток компрессора ГТД.

Проведенный анализ особенностей напыления покрытий на базе функционально-ориентированного подхода позволяет обеспечить: полную адаптацию лопатки при изготовлении к особенностям ее эксплуатации в машине или технологической системе, предельный эксплуатационный потенциал лопатки в ГТД или кратный предельному эксплуатационному потенциалу (величина кратности определяется проектировщиком), единовременный полный износ всего покрытия на поверхности лопатки в заданный период ее эксплуатации, единовременный полный износ всех видов покрытий на всех поверхностях лопатки, качественно новую совокупность свойств лопатки при эксплуатации и другие особенности.

Разработанные математические структурно-функциональные символьные модели однослойных и многослойных покрытий, а также варианты ФОП позволяют выполнять синтез заданных или требуемых свойств лопаток компрессора. Это дает возможность выполнить синтез новых вариантов структур процессов напыления покрытий лопаток компрессора с нетрадиционными свойствами, обеспечивающими повышение их работоспособности.

В работе установлено, что для реализации ФОП может применяться большое множество методов и вариантов установок и технологического обеспечения. Это зависит от особенностей конкретной лопатки компрессора, параметров ФОП, кинематики движений, метода реализации покрытия и множества других условий.

Выполненные исследования позволили установить, что ультразвуковая обработка лопаток компрессора является одним из основных высокопроизводительных методов их очистки от загрязнений перед напылением вакуумного ионно-плазменного покрытия. Для реализации процессов ультразвуковой обработки лопаток компрессора разработано необходимое технологическое оборудование.

В представленной работе предложена универсальная структура технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий поверхностей лопаток компрессора. С помощью этой универсальной структуры технологического процесса можно вести синтез конкретных вариантов технологических процессов для лопаток компрессора с заданными функциональными свойствами, необходимыми для их эксплуатации в авиационных двигателях.

Структура рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры представляет собой совокупность упорядоченных множеств y и a :

$$Str = \{ y, a \}, \quad (2)$$

где Str - структура рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры;

y - множество рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры;

a - множество отношений на множестве y .

Здесь, в выражении (2), множества y и a имеют вид: $y = \{ y_1, y_2, \dots, y_v \}$ и $a = \{ a_1, a_2, \dots, a_{v_i} \}$, где y_η - η -й элемент множества y ; a_η - η -е отношение между элементами множества y .

Однако для реализации структуры рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры необходимо определить параметры множеств y и a .

Процесс формирования структуры рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки основывается на следующем.

Сначала формируется элементарная структура 1-го класса, затем из этих элементарных структур составляется структура 2-го класса, потом – структура 3-го класса, и так далее до создания структуры p -го класса. В этом случае, мощность множества рабочих позиций лопаток компрессора будет определяться на основании выражения (3):

$$v = \prod_{k=1}^p v_k, \quad (3)$$

где v_{ik} - мощность множества элементов подсистемы k -го класса;

p – количество классов подсистем на множестве рабочих позиций ионно-плазменной установки.

Цикловая производительность вакуумной ионно-плазменной установки для напыления покрытий лопаток компрессора определяется по следующей формуле (4)

$$\Pi_{Ц} = \frac{\prod_{k=1}^p v_k}{T_{Ц}}. \quad (4)$$

Структурная модель рабочих позиций оснастки вакуумной камеры по классам подсистем может быть представлена выражением (5):

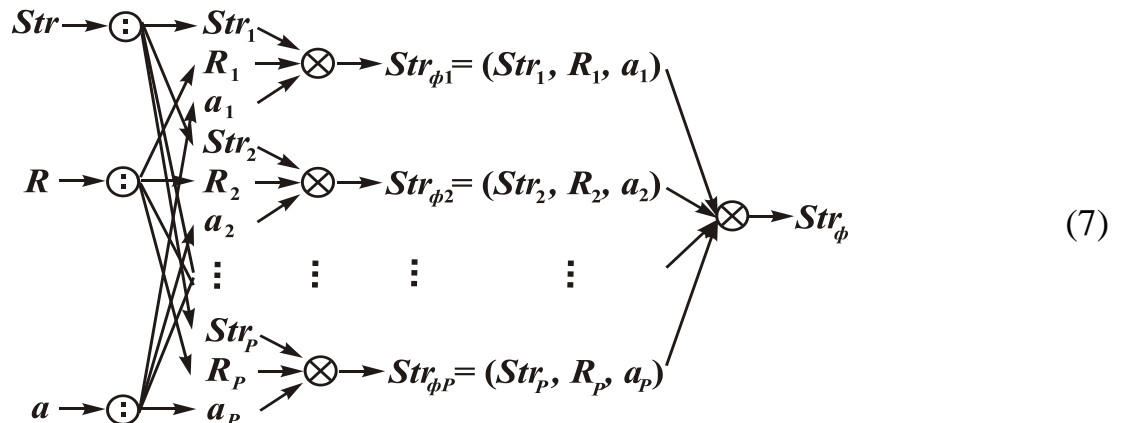
$$Str = \{Str_1, Str_2, \dots, Str_p\}, \quad (5)$$

где Str_k - структура подсистем k -го класса технологической оснастки.

Общую структурную модель состава рабочих позиций лопаток компрессора вакуумной ионно-плазменной системы можно представить выражением (6)

$$Str = \bigcup^{v_p} \dots \bigcup^{v_2} \bigcup^{v_1} y_{\eta}. \quad (6)$$

Разработанная общая схема проектирования принципиально-структурных моделей технологической оснастки вакуумной камеры основывается на операциях декомпозиции структурной модели, пространственной модели и принципиальной кинематической схемы на подсистемы и элементы k -го класса, композиции из этих подсистем и элементов множества элементарных кортежей, затем композиции из этих кортежей общей принципиально-структурной модели. В целом этот процесс базируется на принципе композиции, который можно представить моделью (7):



где Str , Str_k , Str_{fk} и Str_ϕ - общая, k -го класса, функциональная k -го класса и функциональная общая структуры, соответственно;

R и R_k - составы общей и k -го класса пространственных моделей, соответственно;

a и a_k - составы общей и k -го класса кинематических схем, соответственно;

\oplus и \otimes - операции декомпозиции и композиции элементов в модели, соответственно.

В целом процесс синтеза принципиально-структурных моделей технологической оснастки вакуумной камеры можно реализовывать на базе морфологической матрицы, представленной на рис. 6. Здесь процесс проектирования принципиально-

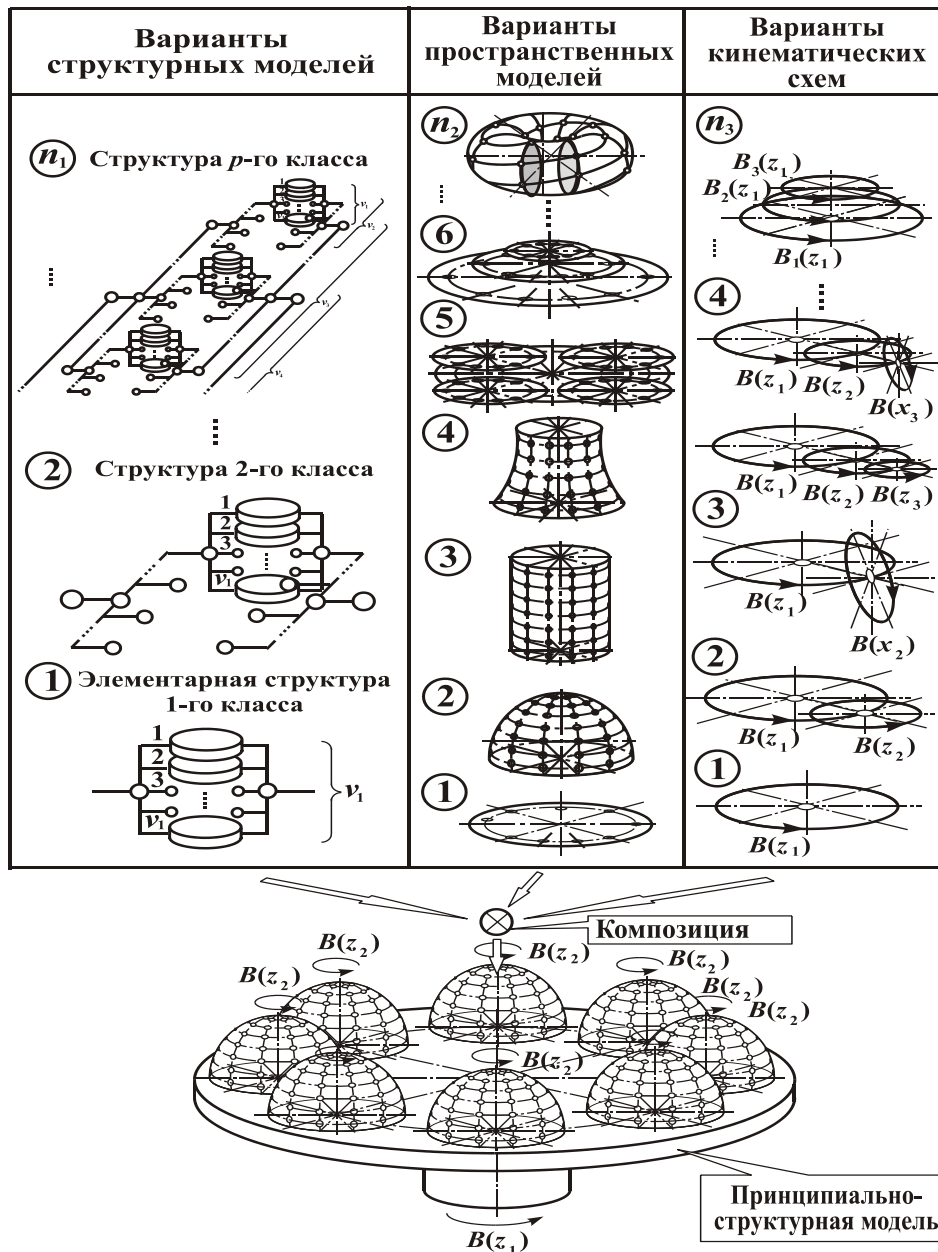


Рисунок 6. Морфологическая матрица синтеза принципиально-структурных моделей системы

структурных моделей реализуется на базе композиции структурных моделей, пространственных моделей и кинематических схем. С помощью принципиально-структурной модели формируется компоновочная схема технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки.

Выполненные исследования позволили разработать высокопроизводительное оборудование (рис. 7) и снизить себестоимость напыления покрытий на лопатки ГТД за счет концентрации рабочих позиций. Данные исследования позволили решить следующее: определить необходимые варианты концентрации изделий в вакуумной камере ионно-плазменной установки;

предложить возможные виды структур расположения рабочих позиций вакуумной камеры; исследовать виды пространственных связей расположения рабочих

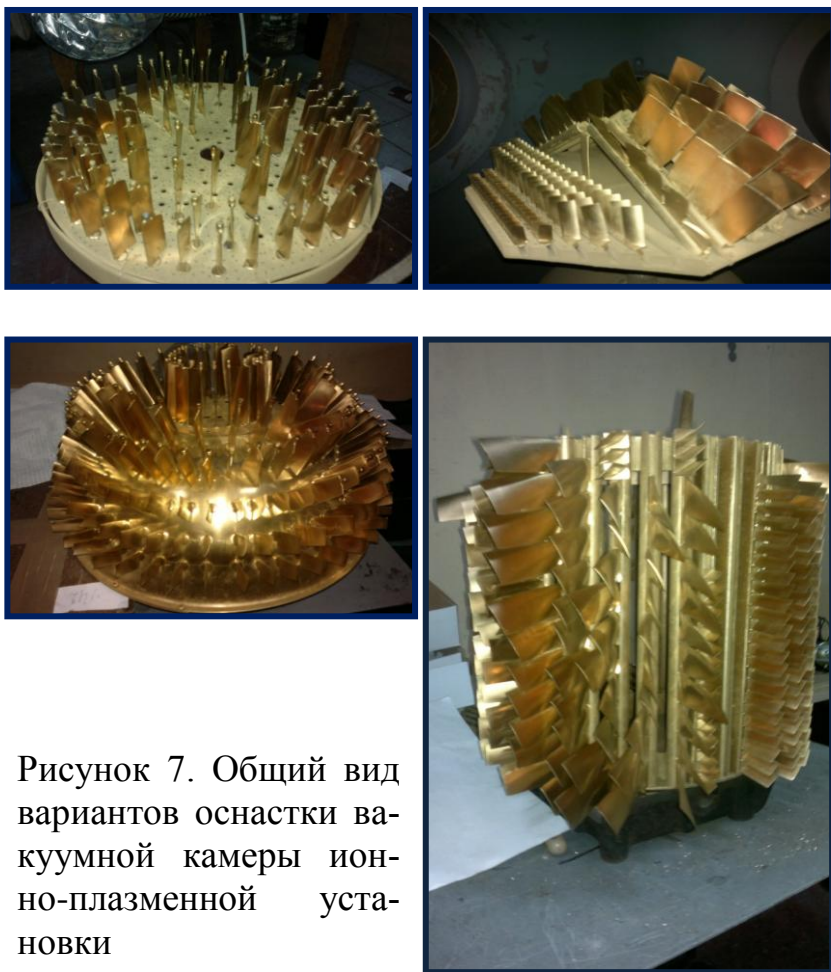


Рисунок 7. Общий вид вариантов оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки

позиций в вакуумной камере; выполнить анализ кинематики движений лопаток в вакуумной камере; разработать общие принципы проектирования технологической оснастки из условия обеспечения ФОП лопаток.

В пятом разделе работы представлены базовые варианты структурно-технологического обеспечения для реализации ФОП лопаток компрессора, представлены экспериментальные исследования по формированию ФОП, даны рекомендации по созданию технологий обеспечения ФОП для лопаток компрессора и представлено внедрение результатов работы.

В работе выполнены исследования особенностей эрозионно-коррозионных раз-

рушений лопаток компрессора на поверхностях пера и по ступеням для конкретного вертолетного двигателя, а именно модели ТВЗ-117. Эти исследования позволили установить, что при эксплуатации ГТД этой модели покрытия лопаток компрессора разрушаются не равномерно. Даже при их длительной эксплуатации часть покрытия остается на поверхностях пера лопаток. Причем в процессе эксплуатации лопатки, в местах полного разрушения покрытия, происходит интенсивное разрушение основного материала пера (тела) лопатки, тогда как в зонах, где покрытие не разрушено основной материал пера не подвергается разрушениям. Эти процессы неравномерного коррозионно-эрозионного разрушения приводят, в ряде случаев, к потере ремонтпригодности лопаток.

Анализ особенностей изменения величины разрушения поверхностного слоя пера лопатки позволил установить, что в процессе эксплуатации ГТД происходят следующие процессы в тракте компрессора: неравномерное разрушение поверхности корыта пера лопатки на каждой ступени компрессора; неравномерное разрушение лопаток в зависимости от номера ступени компрессора. При этом коэффициент неравномерности износа покрытия на поверхности корыта пера лопатки составляет $k_1 = 2,8$, а в зависимости от номера ступени лопаток компрессора - $k_2 = 2,1$.

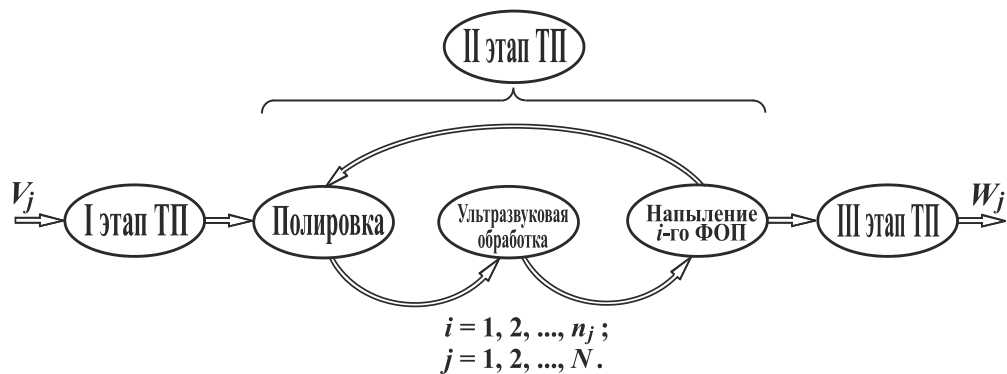
Для повышения работоспособности и ремонтпригодности лопаток компрессора ГТД в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий среды для лопаток компрессора используются ФОП. Эти покрытия реализо-

ваны на базе принципа полного одновременного разрушения покрытия по всей поверхности лопатки и по всем ступеням компрессора ГТД. Это позволит следующее:

1. Исключить разрушение основного материала лопатки в условиях неравномерного действия эрозионно-коррозионного износа, как по поверхности пера лопатки, так и по лопаткам ступеней компрессора
2. Повысить ресурс работы ГТД до капитального ремонта за счет повышения эксплуатационного потенциала ФОП до предельного значения.
3. Обеспечить возможность многократного использования лопаток для ГТД за счет многократного их восстановления в процессе эксплуатации.
4. Уменьшить длительность удаления остаточного покрытия с поверхностями лопаток за счет обеспечения одновременного полного разрушения покрытия в процессе эксплуатации.
5. Применить новый подход в повышении ресурса ГТД.

Комплексный технологический процесс реализации функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора состоит из трех этапов (рис. 8). При этом II этап технологического процесса реализуется в соответствии с приведенными данными. Здесь можно отметить, что количество наносимых ФОП на лопатки определяется номером ступени компрессора.

На рис. 8 приведен граф комплексного технологического процесса реализации ФОП на лопатки компрессора. На II этапе технологического процесса выполняются следующие опера-



следующие операции: полировка, ультразвуковая обработка и напыление i -го ФОП. При этом для лопаток каждой ступени компрессора предусмотрена реализация n_j покрытий для N ступеней лопаток. На графе стрелками показана прямая и воз-

Рисунок 8. Граф комплексного технологического процесса реализации ФОП на лопатки компрессора

вратная последовательность выполнения операций технологического процесса. Здесь перед каждым i -м процессом реализации ФОП необходимо выполнять процесс полировки и ультразвуковой обработки предыдущей поверхности покрытия для обеспечения адгезии материала лопатки с покрытием и когезии между собой различных покрытий.

Для реализации покрытий разработан алгоритм синтеза комплексного технологического процесса выполнения ФОП на лопатки компрессора ГТД. Здесь, технологический процесс имеет два возвратных цикла для нанесения покрытий на лопатки каждой ступени и для выполнения нанесения покрытий на лопатки по ступеням лопаток компрессора. Для выполнения комплексного технологического процесса для каждой лопатки компрессора выполняется три этапа.

В работе выполнен структурный синтез универсального комплексного технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора. На

базе этой структуры производится выбор конкретных вариантов процессов для восстановления лопаток компрессора с ФОП.

А также в работе выполнена экспериментальная реализация ФОП лопаток компрессора. В качестве примера на рис. 9 показан общий вид лопатки 1-й ступени компрессора с последовательно напыленным четырехслойным ФОП (нитрид титановое). Здесь представлено: на рис. 9,а показана лопатка с одним слоем покрытия; на рис. 9,б – с двумя слоями покрытий; на рис. 9,в – с тремя слоями покрытий; на рис. 9,г – с четырьмя слоями покрытий.

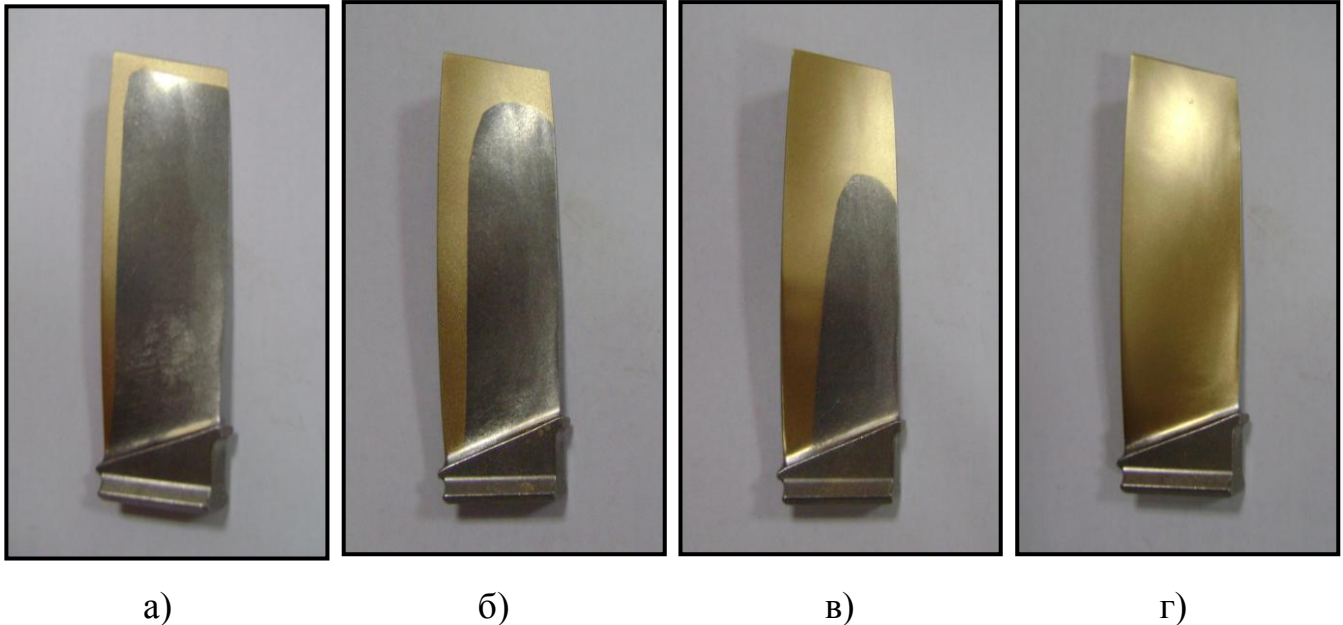


Рисунок 9. Общий вид лопатки 1-й ступени компрессора с последовательно напыленным четырехслойным ФОП (нитрид титановое): а – с одним слоем, б – с двумя слоями, в – с тремя слоями, г – с четырьмя слоями

При напылении четырехслойного ФОП их параметры определялись в соответствии с представленными в работе данными. При этом каждый раз перед напылением покрытия выполнялись операции полирования и ультразвуковой очистки поверхностей лопаток компрессора.

Можно отметить, что ФОП увеличивают стоимость реализации покрытий для всех лопаток компрессора для двигателя ТВ3-117 на 1203000 рублей РФ (16040,00 долларов США), что повышает стоимость лопаток компрессора на 12,4%. Стоимость лопаток компрессора составляет 9720000 рублей РФ (129600 долларов США). Вместе с тем, ФОП по предварительным оценкам повышают ресурс лопаток компрессора приблизительно на 50% и обеспечивают возможность трехкратного их использования в ГТД при капитальных ремонтах авиационного двигателя. Поэтому учитывая, что лопатки компрессора с ФОП могут эксплуатироваться в 4,5 раза больше, чем обычные лопатки с традиционными покрытиями, с учетом технологических затрат, общая экономия составит 30411000 рублей РФ (405480 долларов США) на каждом двигателе. Обычно лопатки с традиционными покрытиями следует выполнять замену на новые лопатки при капитальном ремонте после выработки их полного ресурса.

В работе выполнена сравнительная экспериментальная оценка эрозионных разрушений вакуумных ионно-плазменных нитрид титановых покрытий лопаток компрессора. Анализ полученных результатов позволил установить, что величина эрозионного разрушения покрытия по его толщине находится в прямой пропорциональной зависимости от времени износа (рис. 10).

При этом учитывая тот факт, что процесс эрозионно-коррозионных разрушений ФОП пера лопатки в процессе эксплуатации ГТД подчиняется закону прямой

пропорциональной зависимости можно записать следующее выражение:

$$A_x = \frac{h_x k_1 k_2}{\operatorname{tg} 0,41^\circ}; \quad (8)$$

где A_x - наработка лопатки компрессора до ее восстановления (час); h_x - толщина покрытия в заданной зоне лопатки компрессора ($h_{x \max} = 14$ мкм для первой ступени); k_1, k_2 - коэффициенты неравномерности износа покрытия на поверхности корыта пера лопатки и по номерам ступеней, соответственно.

В работе предложены перспективные варианты лопаток компрессора (патент Украины № 94961, В23Р 15/00, 2010 г.) с ФОС, основные особенности создания которых, можно распространить и на лопатки турбины

ГТД. В диссертационной работе представлено четыре варианта лопаток компрессора с ФОС, которые обеспечивают качественно новые свойства ГТД.

Выполненные в диссертационной работе исследования позволили сформулировать общие рекомендации по созданию технологических процессов по реализации ФОП лопаток компрессора ГТД. Применение ФОП позволяют полностью адаптировать лопатки к эрозионно-коррозионным разрушениям, которые происходят в процессе эксплуатации ГТД. При этом ФОП лопаток компрессора значительно повышает эксплуатационный потенциал лопаток компрессора в ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий среды.

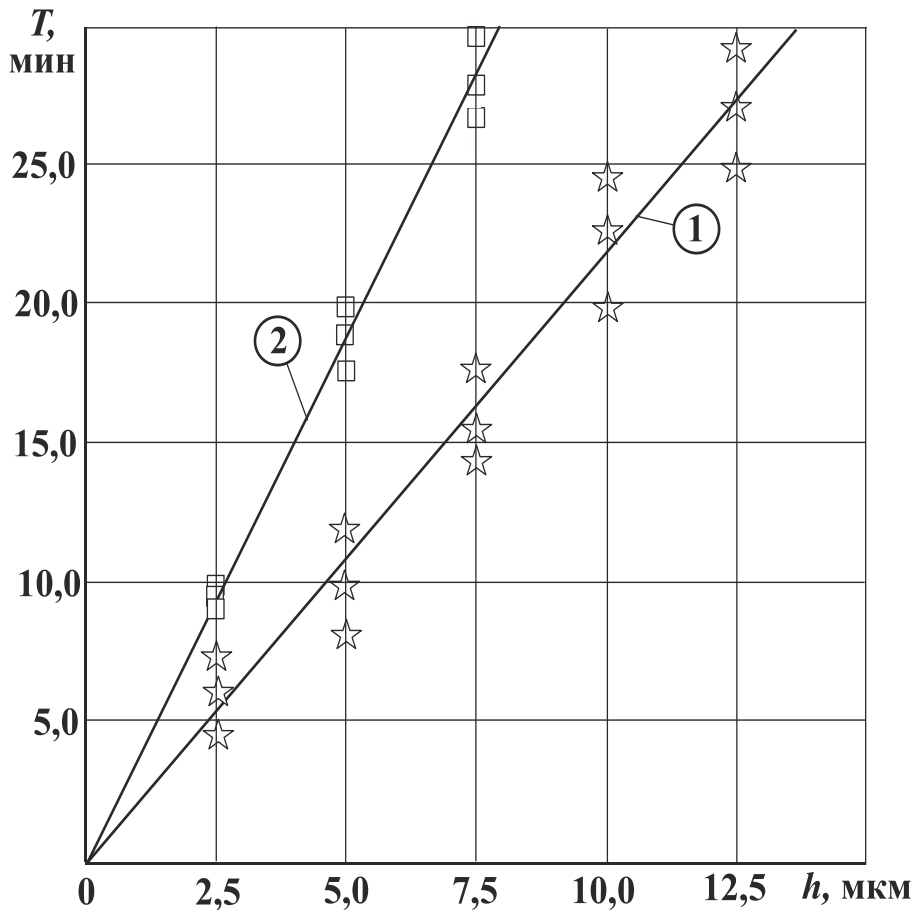


Рисунок. 10. Зависимость длительности износа (разрушения) нитрид титанового покрытия от его толщины: 1 – абразивный полировальник, 2 – абразивно-струйная обработка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная диссертационная работа направлена на разработку ОУО лопаток компрессора с ФОП работающих в условиях переменного эрозионно-коррозионного его износа. Полученные в работе результаты направлены на решение следующих вопросов:

1. В представленной работе установлено, что лопатки компрессора в ГТД из-за эрозионно-коррозионных воздействий разрушаются неравномерно, а именно происходит неравномерный износ элементов пера лопатки и лопаток по номерам ступеней компрессора. При этом применяемые технологические методы ОУО пера лопатки не позволяют исключить действие неравномерных разрушений. Для повышения ресурса лопаток компрессора ГТД необходимы специальные подходы.

2. Для повышения ресурса лопаток компрессора ГТД предложено применять ФОП пера с изменяющейся толщиной и/или физико-механическими свойствами покрытия в зависимости от особенностей его разрушения при действии эрозионно-коррозионных воздействий среды. Для этого ФОП лопаток необходимо аппроксимировать на базе многослойных равнотолщинных специальных покрытий, параметры каждого слоя которых определяются на базе принципов функционально-ориентированных технологий.

3. Впервые разработан общий подход и принципы синтеза технологического обеспечения реализации отделочно-упрочняющие обработки лопаток компрессора с ФОП. А также предложена методика и алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД.

4. В работе выполнено совершенствование технологического обеспечения механической отделочной обработки пера лопатки компрессора для последующей реализации ФОП. А также проведены исследования физической сущности и особенностей процесса полирования поверхностей пера лопатки из титановых сплавов без покрытия и с нитрид титановым покрытием. Разработанное технологическое обеспечение позволяет формировать структуру технологического процесса для реализации ФОП лопаток компрессора, эксплуатирующихся в условиях действия изменяющихся по поверхности эрозионно-коррозионных разрушений пера лопатки.

5. В работе разработаны схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки – титанового сплава. А также представлены рекомендации по опорному одновременному полированию двух материалов и обеспечению близких параметров шероховатости покрытия и основного материала пера лопатки.

6. Выполненный функционально-структурный синтез технологического обеспечения процессов нанесения покрытий на лопатки компрессора ГТД позволил разработать классификацию ФОП для лопаток компрессора ГТД и провести синтез структурных вариантов технологических процессов их реализации. При этом проведенные исследования обеспечили возможность выполнения синтеза структуры технологического обеспечения формирования ФОП.

7. Проведенные исследования позволили определить рациональные варианты концентрации лопаток в вакуумной камере ионно-плазменной установки для реализации ФОП. А также предложены возможные виды структур расположения рабочих

позиций вакуумной камеры и исследованы виды их пространственных связей, выполнен анализ кинематики движений лопаток в вакуумной камере.

8. В работе разработаны базовые варианты структурно-технологического обеспечения реализации ФОП лопаток компрессора. Выполненные исследования особенностей эрозионно-коррозионных разрушений лопаток компрессора позволили установить, что коэффициент неравномерности их действия по поверхности составляет $k_1 = 2,8$, а по ступеням компрессора ГТД модели ТВЗ-117 он равен $k_2 = 2,1$. А также выполненные экспериментальные исследования показали, что процесс эрозионных разрушений ФОП лопатки компрессора подчиняется закону прямой пропорциональной зависимости от длительности воздействий среды.

9. Выполненные исследования позволили разработать рекомендации по синтезу структуры технологического процесса для реализации ФОС новых и восстановления изношенных лопаток компрессора ГТД. Разработанные технологические процессы, обеспечение для ОУО лопаток компрессора и ФОП повышают ресурс работы лопаток компрессора между восстановлениями в 1,5 раза и количество их восстановлений до двух - трех раз в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий. Это повышает до 4,5 раза работоспособность лопаток компрессора при двух кратном их восстановлении и снижает 1,5 ... 2,0 раза затраты на их эксплуатацию.

10. Результаты работы внедрены на Снежнянском машиностроительном заводе (г. Снежное), Луганском ЧП «Депла» и в Донецком национальном техническом университете. Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 998460,00 рублей РФ (девятьсот девяносто восемь тысяч четыреста шестьдесят рублей РФ).

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях

1. **Михайлов, Д.А.** Синтез структурного обеспечения вакуумных ионно-плазменных установок для напыления покрытий лопаток газотурбинных двигателей // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. - Вип. 1, 2 (46). - С. 212 - 221.

2. Михайлов, А.Н. Особенности полировки лопаток ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий под напыление нового покрытия / А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов, А.П. Недашковский // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 1 (47). - С. 207 - 212. (*Постановка цели и задач работы, анализ условий возникновения эрозионно-коррозионных разрушений лопаток ГТД, разработка принципов полировки лопаток*).

3. **Михайлов, Д.А.** Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий / Д.А. Михайлов, А.П. Недашковский, Т.Г. Ивченко // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнар. зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 1 (47). - С. 213 - 224. (*Анализ технологических особенностей восстановления лопаток компрессора ГТД и разработка рекомендаций по их восстановлению с применением ФОП*).

4. **Михайлов, Д.А.** Некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток ГТД из титановых сплавов // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 3 (49). С. 120 - 127.

5. **Михайлов, Д.А.** Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 4 (50). - С. 121 - 127.

6. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа единовременного полного износа покрытия / **Д.А. Михайлов**, А.В. Хандожко, Е.А. Шейко, А.Н. Михайлов // Прогресивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - Вип. 4 (50). - С. 132 - 139. (*Разработка принципов и методики синтеза структуры технологических процессов формирования ФОП лопаток компрессора ГТД*).

7. Повышение долговечности деталей машин на базе функционально-ориентированных покрытий / А.Н. Михайлов, **Д.А. Михайлов**, Р.М. Грубка, М.Г. Петров // Научные технологии в машиностроении. – 2015. - №7. - С. 30-39. (*Постановка цели и задач исследования, разработка общего подхода в повышении долговечности деталей машин на базе ФОП*).

Научные работы с иностранными научными индексами

8. Designing peculiarities and classification of composite technologies in mechanical engineering (Основы проектирования и классификация композиционных технологий в машиностроении) / А. Mikhaylov, **D. Mikhaylov**, Е. Mikhaylova, I. Petryaeva, I. Navka // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. - Vol. 371. - 2013. - P. 8-12. (*Разработка классификацию и последовательности синтеза композиционных технологий*)

9. Estimation of Possibilities of the Productivity Rise at Turning of Hard (Оценка возможностей повышения производительности обработки труднообрабатываемых материалов) / Т. Ivchenko , V. Boguslavskiy, I. Petryaeva, **D. Mihaylov** // Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, Switzerland. - Vol. 1036. - 2014. – P. 355-359. (*Анализ особенностей повышения производительности обработки труднообрабатываемых материалов, разработка рекомендаций по обеспечению требуемых режимов обработки*).

10. Electrical Discharge Machining Behavior of Titanium Nitride Coating (Поведение электрических разрядов при нанесении нитрид титановых покрытий) / L. Slatineanu, M. Coteatǎ, O. Dodun, **D. Mikhaylov**, D. Nedelcu // International Journal of Applied Ceramic Technology. Manuscript ID: ACT – 2118, 2012. P. 1 – 28. (*Анализ особенностей напыления нитрид титановых покрытий, исследование механизма ионизации плазменных потоков в вакуумной установке*).

Научные работы в материалах конференций

11. Михайлова, Е.А. Технологическое обеспечение нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние цилиндрические поверхности изделий / Е.А. Михайлова, **Д.А. Михайлов** // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Технологии и техника автоматизации - 2009». – Ереван:

ГИУА, 2010. - С. 19-22. *(Разработка рекомендаций по нанесению вакуумных ионно-плазменных покрытий во внутренние поверхности деталей машин).*

12. **Михайлов Д.А.** Структура и производительность установок для напыления нитрид титановых покрытий лопаток газотурбинных двигателей. / Les problèmes contemporains de la technosphère et de la formation des cadres d'ingénieurs // Recueil des exposés des participants de la VII Conférence internationale scientifique et méthodique à Sousse du 08 au 17 octobre 2013. – Donetsk: UNTD, 2013. - P. 169-172.

13. Основные особенности и механизм отделочной обработки криволинейных поверхностей лопаток ГТД / **Д.А. Михайлов**, С.М. Братан, Т.Г. Ивченко, Харуби Х. // Les problèmes contemporains de la technosphère et de la formation des cadres d'ingénieurs. Recueil des exposés des participants de la VIII Conférence internationale scientifique et méthodique à Hammamet (Tunisie) du 28 septembre au 05 octobre 2014. – Donetsk: UICM, 2014. - P. 69-76. *(Постановка цели и задач исследований, разработка схем отделочной обработки поверхностей лопаток ГТД).*

Другие научные работы

14. Лопатка газотурбинного двигателя. (Лопатка газотурбинного двигателя) / О.М. Михайлов, О.П. Недашковський, О.О. Михайлова, **Д.О. Михайлов** // Патент України на винахід № 94961. (Патент на изобретение) В23Р 15/00. Дата подання заявки 05.07.2010, БИ №7 від 11.04.2011. – 5 с. *(Предложено перо лопатки выполнять в виде соединенных между собой гребенчатого скелета и основы лопатки).*

15. **Mikhailov, D.** Technological features of GTE compressors blades restoration by using the function-oriented coating (Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД на базе ФОП / **D. Mikhailov**, A. Lakhin, A. Mikhailov // International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies, SHEI. - Donetsk: Donetsk National Technical University. - №2, - 2015. - P. 41-48. *(Анализ особенностей эксплуатации лопаток компрессора ГТД, разработка принципов реализации ФОП).*

16. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД / Т.Г. Ивченко, **Д.А. Михайлов**, А.Н. Михайлов, С.В. Толстых // Инженер. Междунар. студ. научно-техн. журнал. – Донецк: ДонНТУ. - 2015. - С. 48-56. *(Постановка цели и задач работы, разработка метода реализации функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД).*