

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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.

Вместе с тем, для реализации ФОП необходима разработка специальной технологии, ее структуры и состава. Причем структура технологии должна включать этапы до нанесения покрытия, процесс реализации ФОП и обработки лопатки после нанесения ФОП. При этом структура этой технологии должна быть универсальна и обеспечивать реализацию ФОП как для новых лопаток, так и лопаток уже эксплуатирующихся, в том числе с изношенным покрытием.

Однако для решения этих задач необходима разработка комплекса технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) элементов пера ло-

патки на основе функционально-ориентированного подхода в условиях действия неравномерных коррозионно-эрозионных разрушений поверхностей пера лопатки.

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

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ Донецкого национального технического университета (ДонНТУ) в 2013-2015 г.г. (г/б тема «Повышение стойкости твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями на базе функционально-ориентированного подхода и использованием смазывающе-охлаждающих технологических средств для труднообрабатываемых материалов», № государственной регистрации 0107U003034) и в 2012 г. (г/б тема «Процессы модифицирования и упрочнения поверхностных слоев конструкционных инструментальных материалов» (№ Н 14-08)), которые проводились в соответствии с тематическим планом государственных договорных научно-исследовательских работ. А также данная работа велась на основании международного договора о сотрудничестве между ДонНТУ и Таганрогским технологическим институтом ЮФУ (Россия) при выполнении научно-исследовательской работы «Теоретико-экспериментальные исследования формирования качественных характеристик поверхностного слоя деталей из конструкционных материалов при механической обработке».

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 исследования – структура технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопатки компрессора ГТД с ФОП.

Предмет исследования – связи и закономерности между операциями технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки рабочих поверхностей пера лопатки компрессора с ФОС.

Методы исследования – основные положения технологии машиностроения, синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения и системного подходов, принципы теории производительности, теории множеств, морфологического синтеза структуры операций технологических процессов, экспериментальные исследования базировались на методах планирования эксперимента, обработка результатов экспериментов проводилась с помощью статистических методов.

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.

Научные положения работы заключаются в следующем:

- 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;

- последовательно формируя группу многослойных равнотолщинных ФОП обеспечивается создание аппроксимированного ФОП с изменяющейся толщиной;

- при выполнении многократного восстановления ионно-плазменного покрытия на поверхностях пера лопатки с реализацией их ФОС, обеспечивается возможность реализации равной работоспособности лопатки по действию эрозионно-коррозионных разрушений поверхностей пера и по действию циклических напряжений в теле пера лопатки.

Научная новизна полученных результатов. В диссертационной 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.

Практическая ценность полученных результатов. Практическая ценность диссертационной работы определяется следующими основными результатами.

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 отделочно-упрочняющей обработки 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).

Личный вклад соискателя. Соискатель лично разработал: основные принципы и методику синтеза структуры технологических процессов формирования ФОП лопаток компрессора ГТД, эксплуатирующихся в условиях действия переменных эрозионно-коррозионных разрушений поверхностей пера; предложил основы синтеза технологического процесса и обеспечения для реализации конкретных технологических процессов для выполнения ФОС по поверхностям пера лопатки компрессора в зависимости от ее эксплуатационных особенностей; предложил новые технические решения по синтезу технологических операций обеспечения переменных свойств лопаток компрессора. В опубликованных работах автору принадлежат основные идеи проведенных исследований и результаты экспериментов. Постановка задач исследования, общий подход к синтезу структуры технологического процесса

ОУО поверхностей лопатки компрессора ГТД, формулирование основных положений работы, разработка структуры и содержания работы выполнены совместно с научным руководителем.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием при выполнении диссертационной работы современного математического аппарата, приборов и технологического оборудования, достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных исследований, внедрением результатов работы в производство, полученными результатами опытных испытаний лопаток компрессора с ФОП по повышению их общего ресурса.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждены: на восьми международных научно-технических конференциях «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, Россия, 2009 г.), «Технологии и техника автоматизации - 2009» (г. Ереван, Армения, 2009 г.), «ModTech – 2011», (Chisinau, Moldova, 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, Россия, 2012 г., 2014 г., 2015 г.); на международном научно-техническом семинаре «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (г. Таганрог, Россия, 2012 г.); на научно-практической конференции «Донбасс – 2020: Перспективи розвитку очима молодих вчених» (г. Донецк, Украина, 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.

Публикации. По результатам работы опубликовано 16 научных работах, из них 7 статей в специализированных изданиях, утвержденных ВАК, 4 статьи в европейских изданиях, имеющих соответствующую индексацию, 3 статьи на международных научно-технических конференциях, 1 статья в студенческом научно-техническом журнале, 1 патент на изобретение.

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 номерам ступеней лопаток компрессора. Это приводит к снижению ресурса и стойкости лопатки компрессора из-за неравномерного разрушения и невозможности, в ряде 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^l - линейная скорость

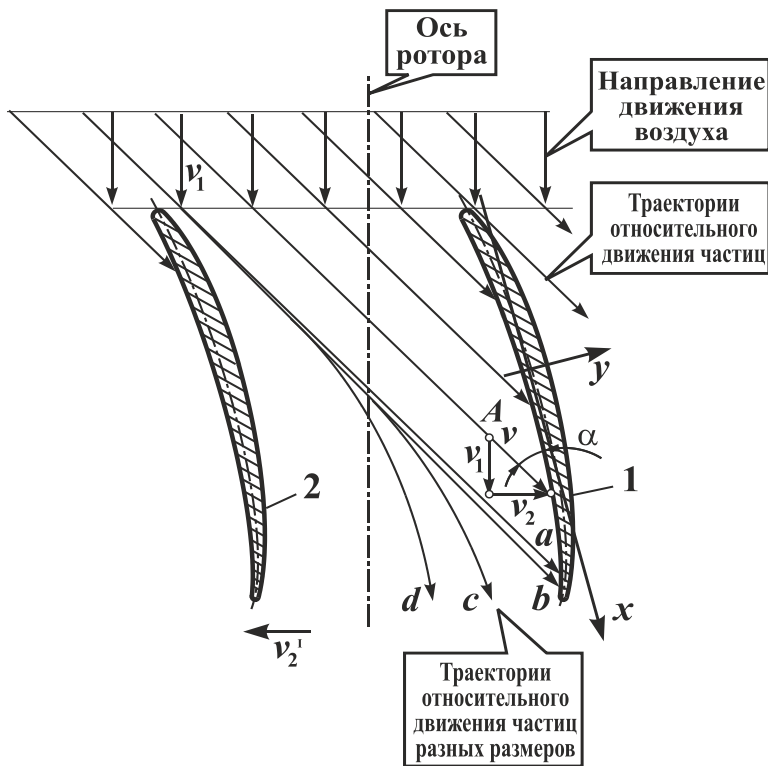


Рисунок 1. Схема взаимодействия частиц пыли или песка аэродинамического потока с лопатками компрессора

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 ФОП, 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 ФОП 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 ФОП; 3 – ФОС.

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

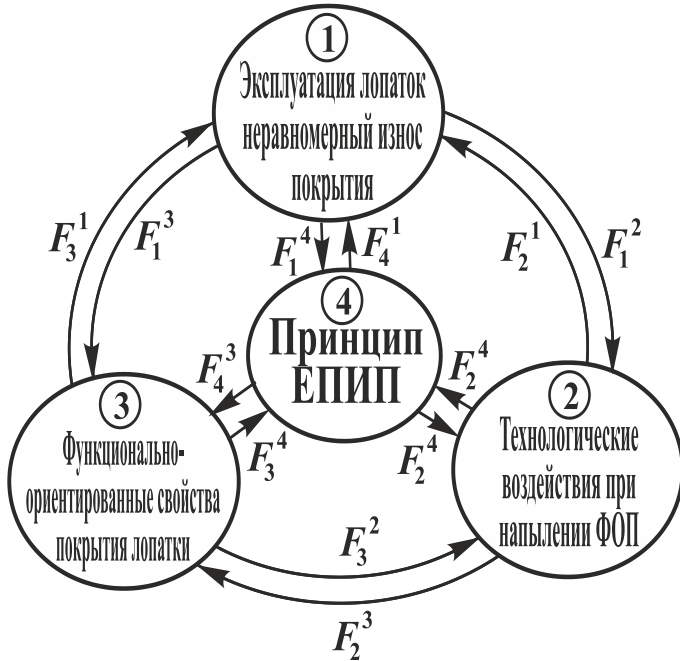


Рисунок 2. Модель взаимосвязей между элементами системы «эксплуатация-технологические воздействия-свойства» при реализации принципа ЕПИП

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 символные 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 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 ТВЗ-117 последовательно формируются по схеме рис. 3, на котором представлено разрушение старого и последовательное



Рисунок 3. Схема формирования многослойного ФОП

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 последовательность и взаимозависимость каждого этапа, его влияние на формирование заданных свойств лопаток компрессора ГТД при их ОУО. А также данная блок-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 механической отделочной обработки пера лопатки компрессора.

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

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 титано-

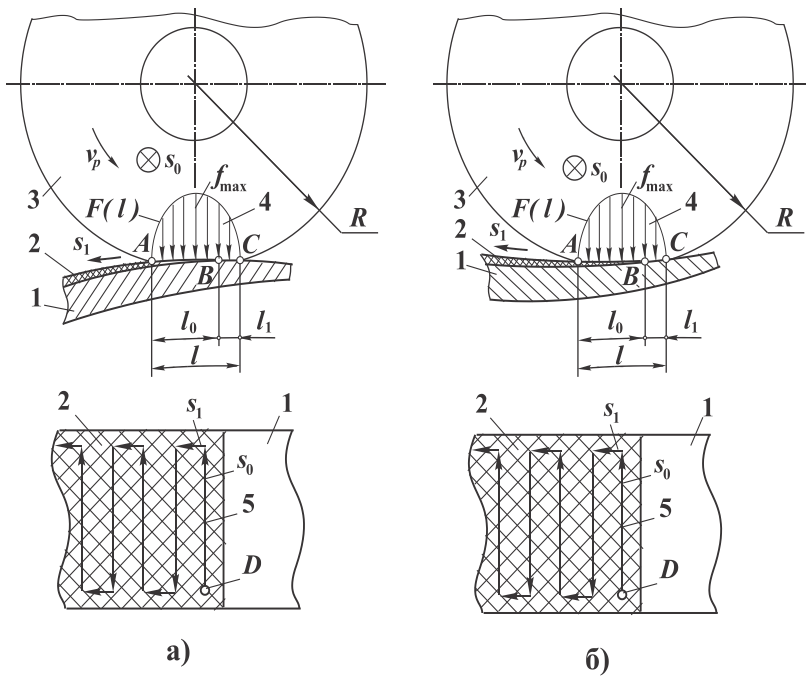


Рисунок 4. Схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга по подаче s_0 :
 а – полирование покрытия спинки,
 б – полирование покрытия корыта

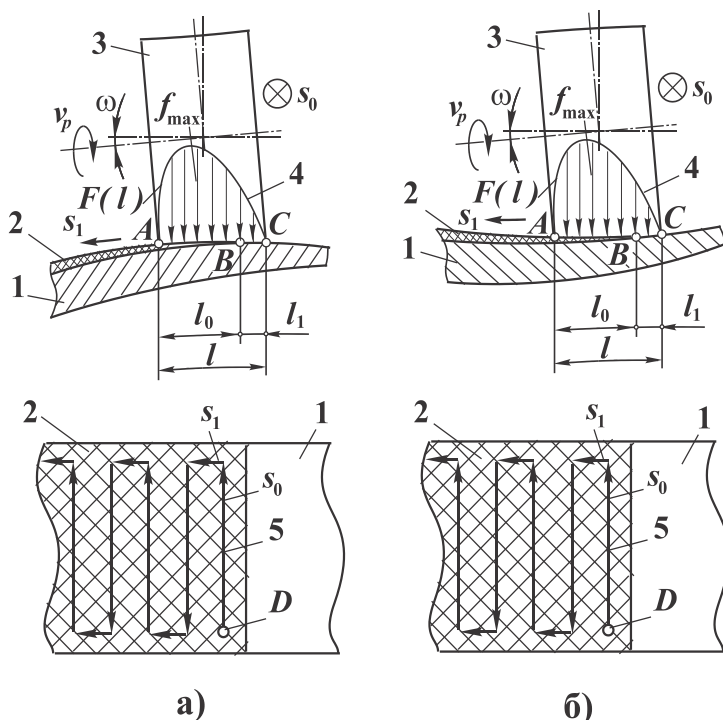


Рисунок 5. Схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга перпендикулярно подаче s_0 и перекосом ω :
 а – полирование покрытия спинки,
 б – полирование покрытия корыта

вое 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.

В работе предложено вести сьем 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 по-

верхности 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_o – 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 полировального 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.

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 компрессора ГТД.

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:

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

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) определяются 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):

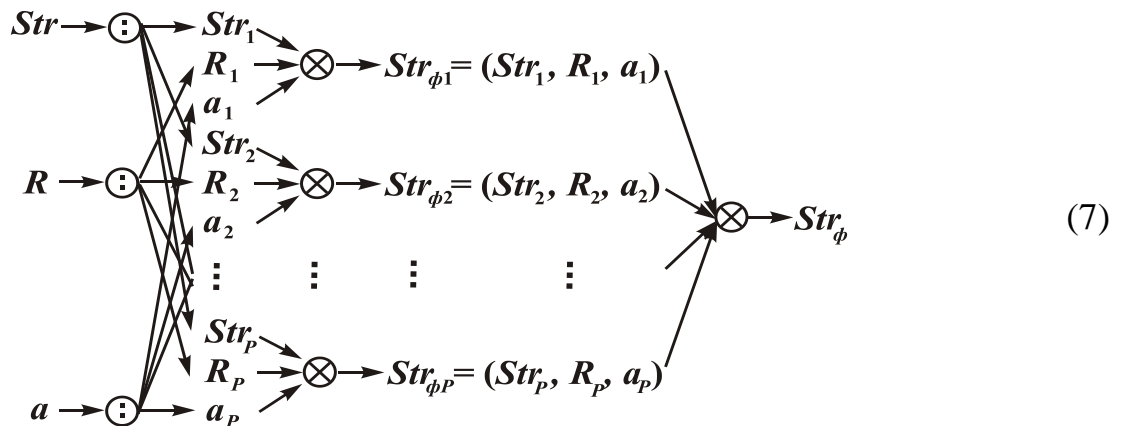
$$Str = \{ Str_1, Str_2, \dots, Str_p \}, \quad (5)$$

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 $Str, Str_k, Str_{\phi k}$ и Str_ϕ - общая, k -го класса, функциональная k -го класса и функциональная общая структуры, соответственно;

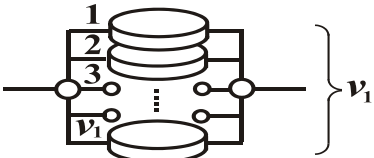
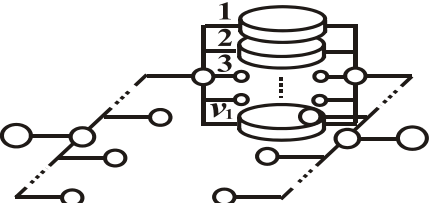
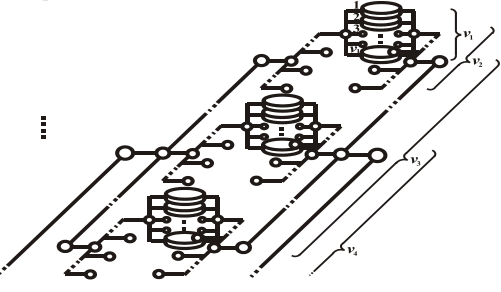


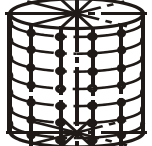
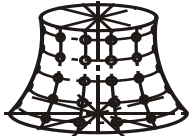



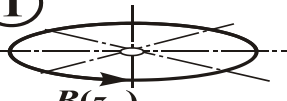

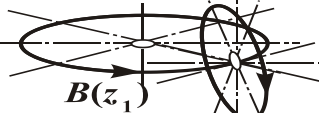

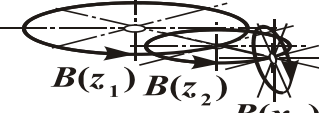
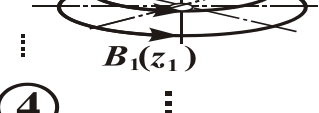
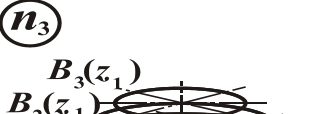
R и R_k - составы общей и k -го класса пространственных моделей, соответственно;

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

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

Варианты структурных моделей	Варианты пространственных моделей	Варианты кинематических схем
<p>① Структура 1-го класса</p>  <p>② Структура 2-го класса</p>  <p>③ Структура p-го класса</p> 	<p>①</p>  <p>②</p>  <p>③</p>  <p>④</p>  <p>⑤</p>  <p>⑥</p>  <p>⑦</p> 	<p>①</p>  <p>②</p>  <p>③</p>  <p>④</p>  <p>⑤</p>  <p>⑥</p>  <p>⑦</p> 

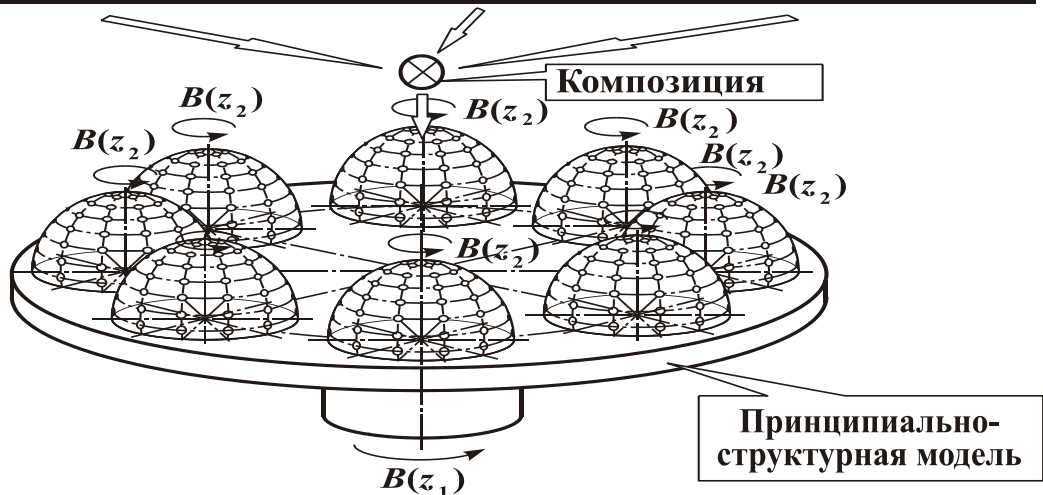


Рисунок 6. Морфологическая матрица синтеза принципиально-структурных моделей системы

В пятом разделе работы представлены базовые варианты структурно-технологического обеспечения для реализации ФОП лопаток компрессора, представлены экспериментальные исследования по формированию ФОП, даны рекомен-

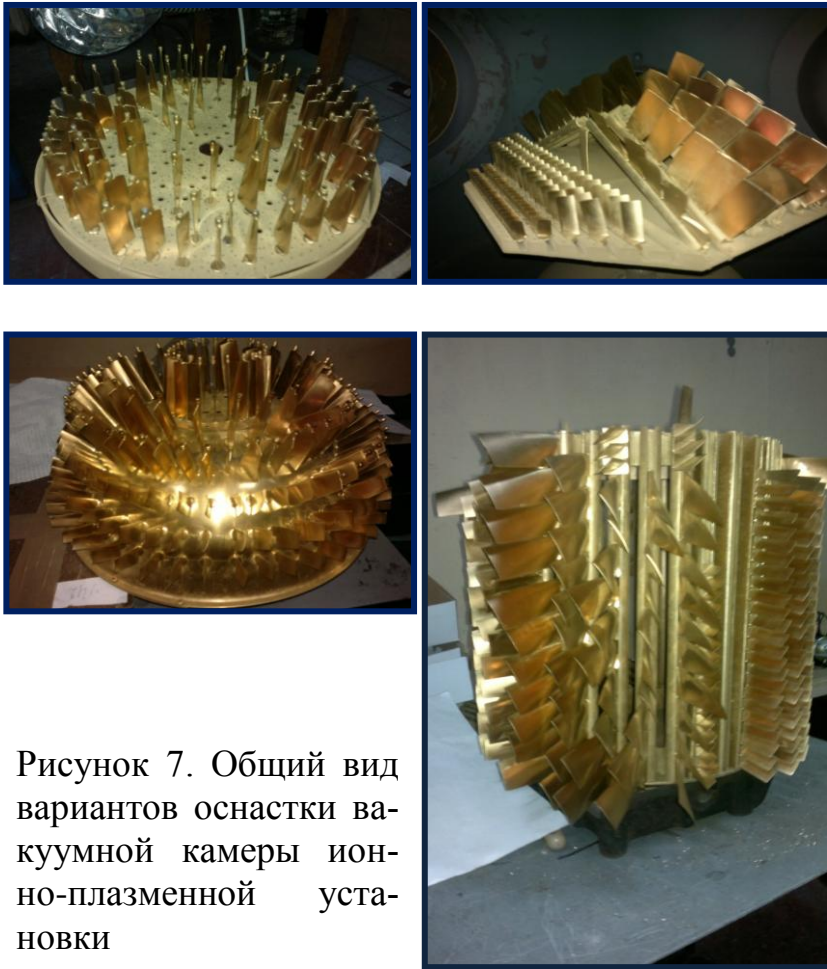


Рисунок 7. Общий вид вариантов оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки

дации по созданию технологий обеспечения ФОП для лопаток компрессора и представлено внедрение результатов работы.

В работе выполнены исследования особенностей эрозионно-коррозионных разрушений лопаток компрессора на поверхностях пера и по ступеням для конкретного вертолетного двигателя, а именно модели ТВ3-117. 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 по-

крытия, 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 реализованы 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 поверхностей лопаток за счет обеспечения единовременного 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 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 обратная 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.

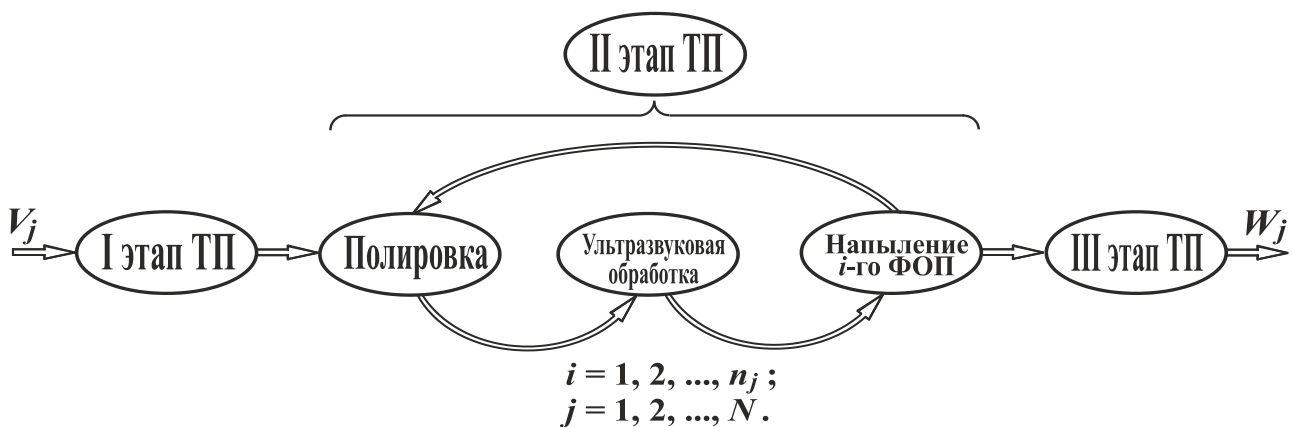


Рисунок 8. Граф комплексного технологического процесса реализации ФОП на лопатки компрессора

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



а)

б)

в)

г)

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

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.

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).

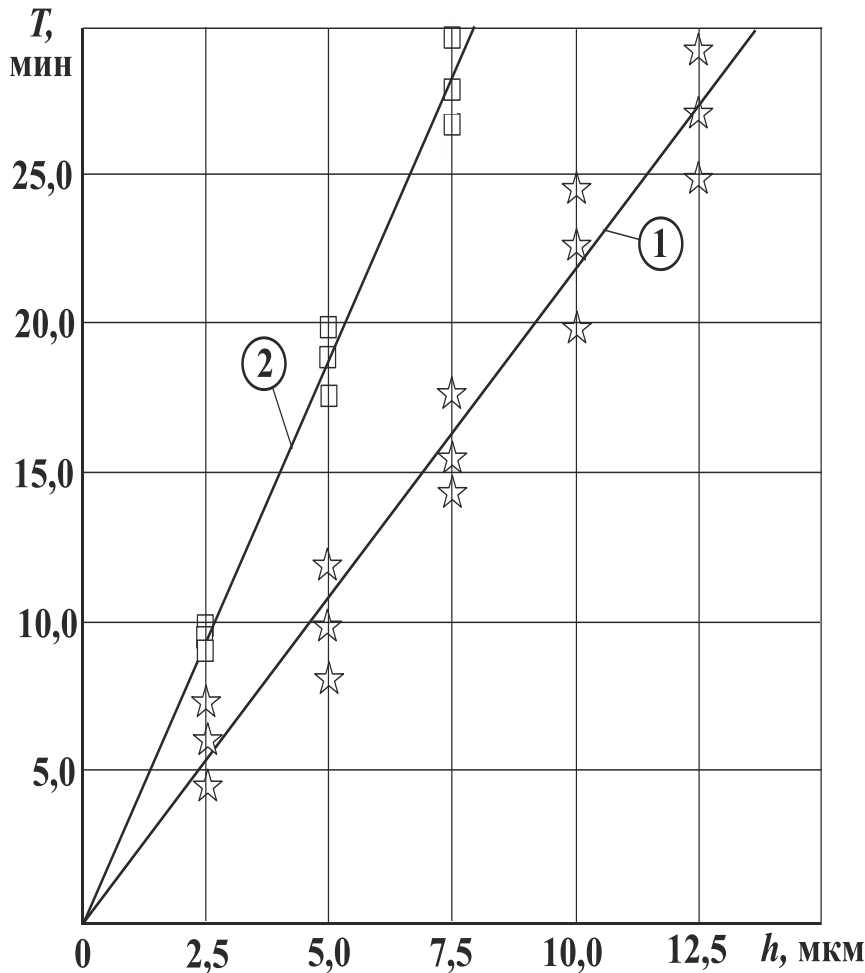


Рисунок. 10. Зависимость длительности износа (разрушения) нитрид титанового покрытия от его толщины:

- 1 – абразивный полировальник,
- 2 – абразивно-струйная обработка

При этом учитывая тот факт, что процесс эрозионно-коррозионных разрушений ФОР 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 ФОР, основные особенности создания которых, можно распространить и на лопатки турбины ГТД.

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

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

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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Михайлова Е.А., Михайлов Д.А. Технологическое обеспечение нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние цилиндрические поверхности изделий // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Технологии и техника автоматизации - 2009». – Ереван: ГИУА, 2010. С. 19-22.

2. Патент України на винахід № 94961. В23Р 15/00. Лопатка газотурбінного двигуна. // Михайлов О.М., Недашковський О.П. Михайлова О.О., Михайлов Д.О. Дата подання заявки 05.07.2010, БИ №7 від 11.04.2011. – 5 с.

3. Mikhaylov A., Mikhaylov D., Mikhaylova E., Petryaeva I, Navka I. Designing peculiarities and classification of composite technologies in mechanical engineering // *Applied Mechanics and Materials Vol. 371 (2013) pp 8-12 © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.371.8. 8.*

4. 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.

5. 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.

6. Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Недашковский А.П. Особенности полировки лопаток ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий под напыление нового покрытия / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 1 (47). С. 207 - 212.

7. Михайлов Д.А., Недашковский А.П., Ивченко Т.Г. Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий/ Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнар. зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 1 (47). С. 213 - 224.

8. 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 - 227.

9. 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.

10. Михайлов Д.А., Братан С.М., Ивченко Т.Г., Харуби Х. Основные особенности и механизм отделочной обработки криволинейных поверхностей лопаток ГТД / 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.

11. Ivchenko T., Boguslavskiy V., Petryaeva I., Mihaylov D. Estimation of Possibilities of the Productivity Rise at Turning of Hard / Advanced Materials Research. Vol. 1036, 2014. Trans Tech Publications, Switzerland. pp 355-359. Doi: 4028/www.scientific.net /AMR.1036.365.

12. Slatineanu L., Coteată M., Dodun O., Mikhaylov D., Nedelcu D. Electrical Discharge Machining Behavior of Titanium Nitride Coating / International Journal of Applied Ceramic Technology. Manuscript ID: АСТ – 2118, 2012. P. 1 – 28.

13. Mikhaylov D., Lakhin A., Mikhaylov A.. Technological features of GTE compressors blades restoration by using the function-oriented coating // International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies, SHEI. - Donetsk: Donetsk National Technical University, ISSN 2311-6765, №2, 2015. P.41-48

14. Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Грубка Р.М., Петров М.Г., Повышение долговечности деталей машин на базе функционально-ориентированных покрытий / Наукоемкие технологии в машиностр. – М.: Машиностроение, №7. 2015. С. 30-39.

15. Михайлов Д.А., Хандожко А.В., Шейко Е.А., Михайлов А.Н. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа единовременного полного износа покрытия / Прогресивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецьк: ДонНТУ, 2015. Вип. 4 (50). С. 132 - 139.

16. Ивченко Т.Г., Михайлов Д.А., Михайлов А.Н., Толстых С.В. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД / Инженер. Междунар. студ. научно-техн. журнал. – Донецьк: ДонНТУ, 2015. С. 48-56.