

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

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Ивченко Т.Г.



Донецк - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ	15
1.1. Краткие исторические данные об освоении и развитии вертолетных двигателей. Анализ эксплуатационных особенностей лопаток компрессора	15
1.2. Анализ существующих технологических методов отделочно- упрочняющей обработки и восстановления работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя	31
1.3. Цель и задачи работы	39
РАЗДЕЛ 2. ОБЩИЙ ПОДХОД В ПОВЫШЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ. ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ СВОЙСТВ	43
2.1. Общие сведения	43
2.2. Исследование особенностей эксплуатации лопаток компрессора и классификация их эксплуатационных функций	44
2.3. Общий подход и принцип обеспечения свойств лопаток компрессора газотурбинного двигателя	51
2.4. Классификация функционально-ориентированных покрытий	60
2.5. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств поверхности пера лопатки компрессора на базе функционально-ориентированных покрытий	65
2.6. Деление лопаток газотурбинного двигателя на функциональные	

элементы	69
2.7. Методика и алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора газотурбинного двигателя ..	77
2.8. Основные этапы и общая блок-схема диссертационной работы	84
2.9. Выводы.....	87
РАЗДЕЛ 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА	
3.1. Структура операций отделочной обработки лопаток компрессора до и после нанесения покрытий	90
3.2. Физическая сущность и особенности процесса полирования поверхностей пера лопаток компрессора из титановых сплавов без покрытий и с покрытиями	93
3.3. Повышение эффективности полировки лопаток компрессора на основе принципа последовательной минимизации параметров на предшествующих переходах	100
3.4. Особенности съема старых покрытий методом опорного полирования поверхностей пера лопатки компрессора	106
3.5. Выводы.....	113
РАЗДЕЛ 4. ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ	
4.1. Особенности и общие положения по напылению покрытий на базе функционально-ориентированного подхода	115
4.2. Математические структурно-функциональные модели покрытий лопаток компрессора и их классификация	120
4.3. Особенности подготовки лопаток к напылению	

специальных покрытий на базе ультразвуковых воздействий	127
4.4. Универсальная структура технологического процесса напыления покрытий. Синтез структурных вариантов	133
4.5. Структура технологического обеспечения и производительность процесса напыления покрытий в ионно-плазменных установках	142
4.6. Выводы	159
РАЗДЕЛ 5. БАЗОВЫЕ ВАРИАНТЫ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.	
РЕКОМЕНДАЦИИ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	161
5.1 Особенности эрозионно-коррозионных разрушений лопаток компрессора на поверхностях пера и по ступеням газотурбинного двигателя модели ТВ3-117.....	161
5.2. Обеспечение функционально-ориентированных свойств по покрытию пера лопатки каждой ступени и по лопаткам в зависимости от номера ступени компрессора газотурбинного двигателя	167
5.3. Алгоритм синтеза структуры технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора	170
5.4. Структурный синтез универсального комплексного технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора	172
5.5. Экспериментальная реализация функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора	178
5.6. Сравнительная экспериментальная оценка эрозионных разрушений покрытий лопаток компрессора	182
5.7. Перспективные варианты лопаток компрессора с функционально-ориентированными свойствами	185
5.8. Основные рекомендации работы	187

5.9. Внедрение результатов работы в производство	191
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	195
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	198
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	215

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс непрерывно ставит перед машиностроителями все новые, более сложные задачи, связанные с созданием качественно новой совокупности свойств изделий, выполнением качественно новой меры их полезности, повышением эффективности производства, автоматизацией производственных процессов, обеспечением экологической безопасности производства и множеством других насущных проблем. Это обусловлено запросами общества, возможностями науки и техники, а также развитием экономики.

Все это в полной мере относится и к авиадвигателестроению, являющимся особым направлением машиностроения. В настоящее время в качестве авиационных двигателей широко используются газотурбинные двигатели (ГТД). Развитие авиационных двигателей происходит по пути улучшения их термодинамических параметров, конструктивного совершенствования и эксплуатационных свойств. При этом особым направлением развития авиационных двигателей является совершенствование вертолетных ГТД. Этот тип двигателей развивается в направлении расширения диапазона его применения как по высоте и скорости полета, так и по условиям эксплуатации. А также современным вертолетным двигателям предъявляются требования по обеспечению их малоразмерности конструкции и надежности узлов.

Ресурс и надёжность работы вертолетных ГТД в значительной степени определяется свойствами лопаток компрессора противостоять комплексному действию процессов газовой коррозии и эрозионных явлений, фазовых и структурных изменений свойств материала и температурных процессов, а также переменных напряжений (различного вида) от действия вибрационных, циклических и ударных нагрузок.

Совершенствование технологических процессов, методов и технологического обеспечения изготовления и ремонта лопаток вертолетных ГТД является одной из важнейших задач совершенствования вертолетных авиационных двига-

телей, определяющих технико-экономические параметры их изготовления и эксплуатации.

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 зави-

симости 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 эксплуа-

тацию.

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 лопатки 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.

РАЗДЕЛ 1

**ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ****1.1. Краткие исторические данные об освоении и развитии вертолетных двигателей. Анализ эксплуатационных особенностей лопаток компрессора**

В настоящее время развитие вертолетных газотурбинных двигателей (ГТД) происходит по пути улучшения их термодинамических параметров, схемно-конструктивного совершенствования с целью повышения показателей эффективности использования авиационной силовой установки на борту летательного аппарата. Этому способствует улучшение эксплуатационных свойств вертолетных двигателей. Особенности, присущие вертолетным ГТД этого типа (малоразмерность, особо тяжелые условия эксплуатации и тому подобного), является существенными факторами, которые необходимо учитывать на протяжении всего жизненного цикла двигателя – от проектирования до эксплуатации [27, 29, 47, 56, 71].

Вертолетные ГТД по способу отбора мощности на выходной вал разделяют на одно- и двухвальные со свободной силовой турбиной, а по рабочему процессу – двигатели простого термодинамического цикла с подводом теплоты при постоянном давлении $p = const$ (цикл Брайтона) и двигатели с регенерацией теплоты [27, 186].

Простейшую схему турбокомпрессора с двухпорным ротором и встроенным редуктором имеют двигатели Airreserch 331, Astazou-XII, Artus II, BMW 6022A и др. В этом случае ротор турбокомпрессора имеет механическую связь с приводом несущего винта. Во всех остальных схемах отбор мощности на привод винта осуществляется от свободной турбины. При этом мощность передается либо через редуктор, либо напрямую от вала свободной турбины.

Достаточно продолжительное время двигательные фирмы отдавали предпочтение выводу вала мощности назад. В этом случае двигатель имеет короткие жесткие роторы: T58, ГТД-3Ф, Д-136, ТВ2-117, ТВ3-117, Д-25В, Makila, JFTD

12А-3 - без редуктора; Turmo-3, Arriel 1, Т6В, РТ6В-9 с встроенным редуктором [27, 189, 192, 193, 194].

При выводе мощности вперед вал свободной турбины получается длинным, так как проходит через весь двигатель: Т64, Т700, RТМ 322 - без редуктора; Т53, РW-207D, РД-600, ТВ-0-100, ГТД-400, АИ-450 – с редуктором. Наличие длинного вала, а следовательно, большого расстояния между его опорами накладывает повышенные требования к его жесткости, так как возможно появление опасных поперечных колебаний ротора и критических частот вращения вала. Чтобы избежать касания ротора о статор приходится увеличивать радиальные зазоры, что приводит к снижению КПД лопаточных машин и ухудшает выходные данные двигателя, или увеличивать поперечную жесткость вала, а следовательно его массу. Применение дополнительных опор (двигатели Т64, Astazou XII) усложняет конструкцию и увеличивает его массу. Иногда используют разрезную конструкцию вала и радиальный межвальный подшипник (ТВ7-117), а на опорах предусматривают демпфирующие устройства (двигатель ТВ-0-100) [27, 149, 150, 154, 155, 156].

Рассмотрим более детально исторический процесс развития одного из наиболее часто применяемого в России, Украине и ряде других стран турбовального двигателя серии ТВ-117, разработанных в КБ под руководством С.П. Изотова (ТВ2-117, ТВ3-117, ТВ7-117), а именно турбовального двигателя ТВ3-117 [2].

Опытный вариант вертолетного турбовального газотурбинного двигателя ТВ3-117 в классе мощности 2000 л.с. создавался с 1965 года в ленинградском ОКБ Климова под руководством главного конструктора Сергея Петровича Изотова [58]. Данный двигатель предназначался для транспортно-боевого вертолета Ми-24 и противолодочного Ми-14. В декабре 1966 года был изготовлен первый опытный образец этого двигателя, испытания которого показали, что двигатель требует проведения целого комплекса конструкторско-доводочных работ. На двигателе применен 12-ти ступенчатый осевой компрессор, прямоточная кольцевая камера сгорания, 2-х ступенчатая турбина компрессора и 2-х ступенчатая силовая турбина, а также впервые в отечественной практике применены титановый ротор компрессора, сваренный из отдельных дисков электронно-лучевой сваркой, рабо-

чие и направляющие лопатки компрессора из титанового сплава, полученные методом холодной вальцовки, малогабаритные контактные графитовые уплотнения масляных полостей [2].

Для выполнения этих работ и серийного освоения производства двигателей ТВЗ-117 его производство было передано на Запорожское ПО «Моторостроитель» (ОАО «Мотор Сич»). Специалисты завода внесли более 3 тысяч существенных предложений конструкторско-технологического характера по усовершенствованию деталей и узлов двигателя [100], применили новые перспективные технологии производства [58].

Поставка двигателей ТВЗ-117 для вертолета Ми-24 из Запорожья началась в марте 1971 года, а в августе 1972 года двигатель успешно прошел государственные испытания с ресурсом до первого ремонта 150 часов и назначенным – 300 часов [58].

В 70-годах прошлого века в ОКБ Климова на базе двигателя ТВЗ-117 разработали турбореактивный двигатель ТРЗ-117 с тягой 590 кгс. Впоследствии в модификации двигателя ТРЗ-117А тяга была увеличена до 640 кгс. Двигатели устанавливались на беспилотные самолеты-разведчики ОКБ им. А.Н Туполева Ту-143 и Ту-243, входящие в состав комплексов «Рейс» и «Рейс-Д», которые были быстро освоены в войсках и получили высокую оценку как надежное и высокоэффективное средство технической разведки. На двигателе ТРЗ-117 вместо модуля свободной турбины установили реактивное сопло, а вместо воздушного стартера – электрический стартер-генератор. Серийное производство этого двигателя было освоено Запорожским ПО «Моторостроитель» с 1975 года [58].

В дальнейшем, для вертолета Ми-14 была разработана модификация двигателя ТВЗ-117М (морской), который отличался от базового двигателя наличием антикоррозионных покрытий деталей для защиты от воздействия морской воды [58]. При этом высокие технические и эксплуатационные характеристики двигателя ТВЗ-117 привлекли интерес ОКБ Камова, которое выступало традиционным поставщиком вертолетов для советского ВМФ, и модифицированный двигатель ТВЗ-117 КМ (камовский, морской) был использован для вертолета Ка-27.

Благодаря работам заводских специалистов в 1978 году ресурс двигателя до первого ремонта был доведен до 750 часов, а назначенный ресурс – до 1500 часов.

Первый боевой опыт применения вертолетов Ми-24 и Ми-8МТ в Афганистане поставил вопрос о неудовлетворительных эксплуатационных характеристиках двигателей ТВЗ-117 в условиях жары и высокогорья, характерных для этой страны [58]. Вертолету Ми-24 требовался более эффективный двигатель, который и начали разрабатывать в ОКБ Климова под обозначением «изделие 68». Однако, этот двигатель, по сравнению с двигателем ТВЗ-117, имел большие вес и удельный расход топлива, а также требовал значительного времени и больших расходов на создание, освоение производства и доводку. Поэтому этот двигатель начал совершенствоваться для устранения этих недостатков.

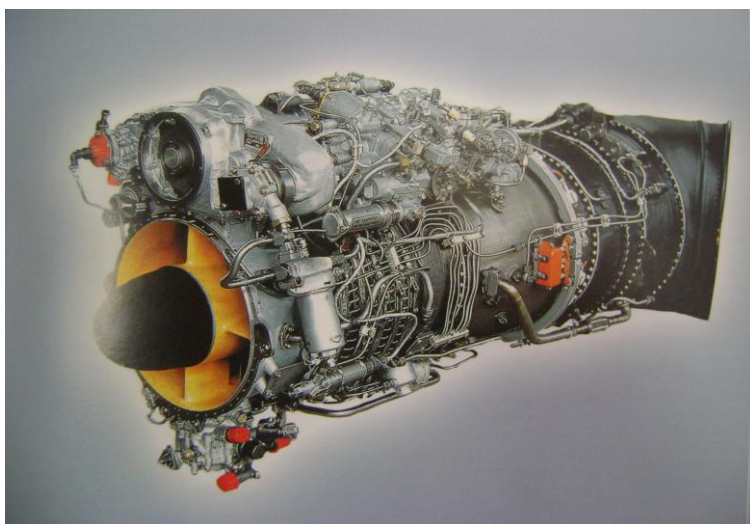


Рисунок 1.1. Общий вид турбовального двигателя ТВЗ-117В [58].

В это же время конструкторами отдела главного конструктора ЗПО «Моторостроитель» был предложен проект двигателя ТВЗ-117В (высотный) [58] (рис. 1.1), который должен был обеспечить поддержание взлетной мощности до высоты 2,2 км и до температуры наружного воздуха $+30^{\circ}\text{C}$, что позволило повы-

сить статический потолок вертолета Ми-24. При этом сохранилась максимальная взаимозаменяемость с базовым двигателем на вертолете.

Высотность двигателя ТВЗ-117В была обеспечена за счет внедрения новых конструктивных решений по основным узлам двигателя. Так, впервые в практике авиадвигателестроения на ЗПО «Моторостроитель», в турбине были применены мелкочастистые соты в межступенчатых лабиринтных уплотнениях рабочих лопаток турбины, что позволило уменьшить радиальные зазоры и, следовательно, увеличить КПД турбины. Также впервые на турбовальных двигателях этой размер-

ности был применен электронный регулятор двигателя – ЭРД-3В, созданный пермским агрегатным конструкторском бюро [58].

Работы по созданию двигателя ТВЗ-117В были завершены в конце лета 1980 года проведением совместных контрольных 500 часовых стендовых испытаний на ЗПО «Моторостроитель» и сдачей двигателя Государственной комиссии, который является в настоящее время базовым для всех двигателей средних типов-размеров. Все дальнейшие модификации вертолетных двигателей разрабатывались только на базе двигателя ТВЗ-117В, общий вид которого показан на рис. 1.1 [58]. При этом были созданы их следующие модификации:

- ТВЗ-117ВК (высотный, камовский) – модификация двигателя ТВЗ-117В для вертолетов Ка-27, Ка-29 и Ка-32 (на экспорт эти вертолеты и Ка-28 поставлялись с двигателями ТВЗ-117ВКР (высотный, камовский, режимный) с увеличенной мощностью;

- ТВЗ-117ВМ (высотный, модернизированный) – модификация, разработанная для Ми-28 (впоследствии применялись также для вертолетов Ми-8МТ/Ми-17);

- ТВЗ-117ВМА (высотный, модернизированный, модификация «А») - разработан для вертолета Ка-50, а также устанавливается на Ка-27, Ка-31, Ми-24, Ми-28, Ми-28Н и Ка-32;

- ТВЗ-117ВМ серии 02 – вариант ТВЗ-117ВМ для гражданских вертолетов Ми-8МТ/Ми-17;

- ТВЗ-117ВМА серии 02 – вариант ТВЗ-117ВМА для гражданских вертолетов Ка-32.

Все эти модификации отличались от базового двигателя ТВЗ-117В практически только настройкой системы автоматического регулирования и ее отдельными элементами [58].

В результате многолетней высокопрофессиональной работы специалистов ЗПО «Моторостроитель» по доводке двигателя семейства ТВЗ-117В эти двигатели по своим техническим и эксплуатационным характеристикам стали одними из лучших вертолетных двигателей в мире. В настоящее время двигатели семейства

ТВЗ-117В выпускаются и ремонтируются на заводе в 9 модификациях и успешно эксплуатируются более чем в 60 странах мира на всех боевых, транспортных и гражданских вертолетах среднего класса сухопутного и морского применения с маркировкой «Миль» и «Камов» [58].

Следует отметить, что для улучшения летно-технических характеристик вертолетов, ОАО «Мотор Сич», совместно с ФГУП «Завод им. В.Я. Климова», создали турбовальный двигатель ВК-2500 (первоначальное обозначение ТВЗ-117ВМА-СБЗ), поддерживающий свою взлетную мощность до температуры наружного воздуха +30°C.

Двигатель ВК-2500 создан на базе сертифицированного двигателя ТВЗ-117ВМА с применением конструктивных наработок, полученных при создании турбовинтового двигателя ТВЗ-117ВМА-СБ2. В конструкцию двигателя внедрена турбина компрессора, изготовленная с применением новых жаропрочных сплавов и специальных покрытий, что позволило поднять допустимый уровень максимальной температуры газов на входе в турбину и за счет этого повысить мощность двигателя по сравнению с базовым. На двигателе также установлена цифровая система автоматического регулирования и контроля БАРК-78 и счетчик наработки и контроля СНК-78, который позволяет вести контроль времени наработки на ограниченных по времени работы режимах [58].

Проведенные стендовые длительные эквивалентно-циклические испытания с суммарной наработкой 3000 часов и 15196 циклов позволили установить межремонтный ресурс двигателя 3000 часов, а назначенный – 9000 часов.

Первый полет вертолета Ми-24М с двигателями ВК-2500 состоялся 30 мая 2000 года, в декабре 2000 года двигатель получил сертификат типа АР МАК.

Дальнейшие совершенствования двигателя ТВЗ-117В на ОАО «Мотор Сич» позволили создать двигатель ТВЗ-117ВМА-СБМ1В, в котором использованы технические решения, применяемые при создании самолетной турбовинтовой модификации двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ1.

Применение турбины компрессора без покрывных дисков с усовершенствованной системой охлаждения позволило установить двигателю назначенный ре-

курс 12000 часов и ресурс до первого капитального ремонта 5000 часов. Режимы работы двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ1В оптимально адаптированы к условиям эксплуатации на различных типах вертолетов. Его система автоматического управления позволяет в заводских условиях настраивать величину мощности на взлетном режиме в пределах 2500, 2400, 2200 или 2000 л.с. и поддерживать эти параметры при более высокой температуре наружного воздуха и большей высоты полета вертолета.

В настоящее время конструкторами УГК ОАО «Мотор Сич» разрабатывается модификация двигателя – ТВ3-117ВМА-СБМ1В 1 серии с электронно-цифровой САУ типа FADEC и уже создана и сертифицирована модификация ТВ3-117ВМА-СБМ1В 2 серии с новым электронным регулятором.

Двигатели ТВ3-117ВМА-СБМ1В серии 4 и 4Е (с воздушной или электрической системой запуска) являются модификациями базового двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ1В. Они предназначены для ремоторизации ранее выпущенных вертолетов типа Ми-8Т с целью улучшения их летно-технических характеристик, особенно при эксплуатации в условиях жаркого климата или высокогорных взлетных площадок. Двигатели поддерживают мощность до более высоких значений температур наружного воздуха, высот базирования и полета по сравнению с двигателями ТВ2-117, установленными в настоящее время на вертолеты типа Ми-8Т [58].

Двигатели унаследовали лучшие конструктивные решения, направленные на обеспечение высоких параметров и ресурсов, которые были отработаны на базовом двигателе. Это позволило установить двигателям ТВ3-117ВМА-СБМ1В серии 4 и 4Е назначенный ресурс 15000 часов, ввести чрезвычайные режимы 2,5- и 30-минутной работы при одном неработающем двигателе, которые отсутствовали на двигателе ТВ2-117. Первый полет вертолета Ми-8Т с новыми запорожскими двигателями ТВ3-117ВМА-СБМ1В серии 4Е, впоследствии получившего обозначение Ми-8МСБ, состоялся 10 ноября 2010 года на аэродроме ОАО «Мотор Сич». В августе 2013 года вертолет Ми-8МСБ с этими двигателями установил ряд мировых рекордов, в том числе поднялся на высоту 9150 метров [58].

Другим новым проектом стал двигатель ТВ3-117ВМА-СБМ1В 5 серии. Этот двигатель обеспечивает мощность 3700 л.с. на чрезвычайном режиме и 2800 л.с. на взлетном. Форсирование его выполнено за счет внесения ряда изменений в базовую конструкцию. Планируется две модификации этого двигателя: турбовальная ТВ3-117ВМА-СБМ1В 5 серии для вертолетов взлетной массой 15-16 тонн, например, Ми-38, и турбовинтовая ТВ3-117ВМА-СБМ2 для транспортного самолета Ан-140Т. В 2013 году изготовлен газогенератор этого двигателя, и в первом квартале 2014 года начат комплекс проверочных испытаний его компрессора [58].

Таким образом, основные технические параметры вертолетных ГТД за это время серьезно улучшились, при одновременном увеличении ресурса от нескольких сотен до 4 ... 6 тысяч часов. При этом степень конструктивного улучшения турбовальных ГТД характеризуется уменьшением числа деталей двигателя. Так, в ГТД второго поколения их свыше 6000, а в ГТД четвертого поколения около 2000 деталей.

Для вертолетных ГТД пятого поколения наряду с использованием традиционных решений по схемам и конструкциям отдельных узлов и систем возможно применение новых решений. Многолетний опыт создания и эксплуатации вертолетных ГТД определил технические возможности и экономически целесообразные требования по их ресурсу и надежности. Для двигателей пятого поколения требования по ресурсу и надежности еще более ужесточаются и в каждом конкретном случае регламентируются в техническом задании на новый двигатель [27].

Таким образом, следует отметить, что каждое поколение вертолетных ГТД характеризуется свойственной ему определенной совокупностью уровня удельных показателей и параметров цикла, типом и конструкцией основных узлов, уровнем потерь в них, применяемыми конструкционными материалами и технологией. Поэтому далее приведем некоторые особенности двигателей каждого поколения [27].

Вертолетные ГТД первого поколения (1955 - 1965 годов) отличались низкими параметрами цикла, а именно: независимо от мощности двигателя низкой степенью повышения давления заторможенного потока; независимостью температуры газов от мощности двигателей, так как применялись только не охлаждаемые турбины; повышенным удельным расходом топлива; пониженной удельной мощностью; низким КПД основных узлов двигателя. Вместе с тем, уже в этом поколении двигателей характерной особенностью стал выпуск одного двигателя в ряде модификаций, отличающихся мощностью, с целью расширения возможностей применения их на различных вертолетах.

Второе поколение вертолетных ГТД (1965 - 1980 годы) характеризуется последовательным модифицированием базовой модели в направлении увеличения мощности. Новые модели двигателей создавались при сохранении габаритных размеров. При этом перепроектировался компрессор, была введена вторая ступень турбины компрессора, повысили температуру газа и сделали охлаждаемые лопатки первой ступени турбины компрессора. В результате удельные показатели модифицированных двигателей заметно улучшились.

Третье поколение вертолетных ГТД (1980 – начало 1990 годов) отличает то, что практически все двигатели этого поколения вновь создавались во всех классах мощности.

Первые двигатели этого поколения появились еще в конце 70-х годов, но преобладающими они стали в 80-е годы, завершение разработки новейших из них реализованы в начале 90-х годов, а улучшенные модификации продолжают выпускаться до настоящего времени.

В этот период был изменен подход к проектированию двигателей. Одновременно с повышением параметров цикла и улучшением удельных показателей значительно изменился конструктивный облик ГТД: резко сокращено число ступеней лопаточных машин, центробежная ступень в качестве замыкающей стала обязательным элементом компрессора всех двигателей, в турбинах внедрены высокоэффективные системы охлаждения сопловых и рабочих лопаток и высокоперепадные одноступенчатые турбины в ГТД меньшей мощности. Кроме того, су-

ущественно повысились живучесть и ресурс, в несколько раз снизились трудоемкость и сложность технического обслуживания. Таким образом, третье поколение вертолетных ГТД – это серьезное продвижение вперед по параметрам цикла и удельным показателям.

Очень важным является вопрос о том, какими будут вертолетные ГТТ следующего, четвертого поколения. Уже начаты предварительные проработки по двигателям этого поколения. Анализ процесса развития двигателестроения показывает, что просматриваются следующие пути развития вертолетных ГТД в ближайшей перспективе:

1. Продолжение их развития по параметрам цикла с дальнейшим улучшением удельных показателей, исходя из того, что возможность таких двигателей еще не исчерпаны.

2. Применение новых схем, в первую очередь ГТД с регенерацией теплоты, исходя из того, что в таких двигателях можно существенно улучшить экономичность на пониженных режимах работы.

Можно отметить, что вертолетные двигатели имеют целый ряд узлов и деталей, именно от их эксплуатационных параметров зависит общий ресурс и надежность ГТД.

В данной работе будут более детально рассмотрены вопросы, связанные с повышением работоспособности лопаток компрессора (лопаток компрессора низкого давления) вертолетных ГТД.

Лопатки компрессора вертолетного ГТД (рис. 1.2 и рис. 1.3) обычно работают в сложных эксплуатационных условиях. Они испытывают при эксплуатации множество эксплуатационных факторов, а именно: пароводяные и аэродинамические воздействия, различные солевые воздействия, кислотно-щелочные воздействия, термические воздействия, инерционные воздействия, изгибающие напряжения, контактные напряжения, сложно деформированное состояние, износ поверхностных слоев, разрушения из-за действия частиц песка, пепла и других элементов. Эти воздействия отрицательно влияют на эксплуатационные свойства лопаток газотурбинных двигателей. В ряде случаев, они приводят к катастрофическим

разрушениям лопаток. Поэтому разработка мероприятий повышения их надежности является актуальной задачей.

На рис. 1.2 представлена поворотная лопатка направляющего аппарата компрессора ГТД, применяемая в двигателях серии ТВ3-117. Здесь, на рис. 1.2,а показаны размеры лопатки, на рис. 1.2,б – общий вид лопатки.

Лопатка направляющего аппарата (рис. 1.2,а) ГТД имеет следующие элементы: перо лопатки, буртик лопатки, цапфа лопатки (хвостовик лопатки). В табл. 1.1 представлены геометрические параметры сечений пера лопатки направляющего аппарата ГТД.

Лопатка компрессора ГТД [116] для двигателей серии ТВ3-117 показана на рис. 1.3. Здесь, на рис. 1.3,а показаны размеры лопатки, на рис. 1.3,б – общий вид лопатки.

Лопатка компрессора (рис. 1.3,а) ГТД также имеет перо лопатки, буртик лопатки и хвостовик лопатки (замок). В табл. 1.2 представлены геометрические параметры сечений пера лопатки компрессора ГТД.

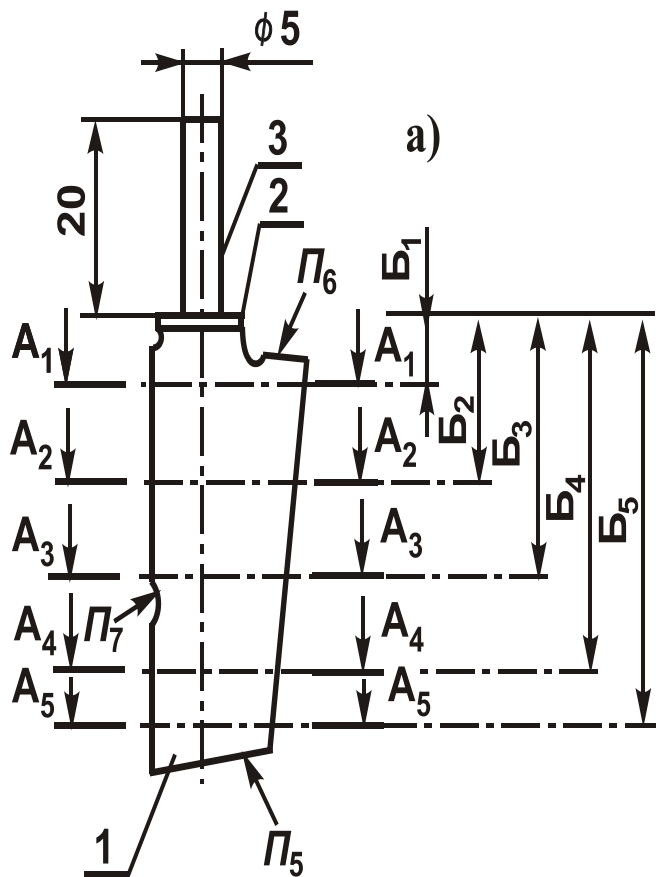
Можно отметить, что лопатки компрессора это самая массовая, высоконагруженная и ответственная деталь вертолетного двигателя [107]. Их количество на двигателе превышает 1500 штук. Основной особенностью конструкции лопаток компрессора является то, что они имеют тонкие входные и выходные кромки, изготовленные из титановых сплавов, и они чувствительные к концентрации напряжений, а также они первыми встречаются с инородными телами, попавшими в тракт двигателя.

В целом, лопатки компрессора могут получать следующие повреждения и изменения свойств:

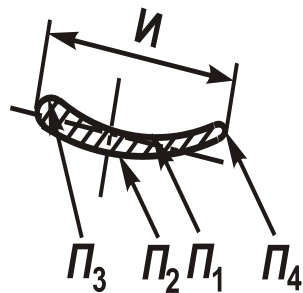
- эрозионные повреждения элементов (эрозионный износ);
- коррозионные повреждения элементов;
- царапины, забоины, вмятины, трещины, сколы, излом;
- изменение свойств поверхности, поверхностного слоя и глубинного материала (структурные и/или фазовые изменения материала);

Таблица 1.1. Геометрические параметры сечений пера лопатки направляющего аппарата компрессора ГТД

Размеры, мм	Сечение				
	$A_1 - A_1$	$A_2 - A_2$	$A_3 - A_3$	$A_4 - A_4$	$A_5 - A_5$
$I \pm 0,2$	20,1	18,8	17,5	16,1	15,5
$B_1 \dots B_5$	5	15	25	35	40



$A_1 - A_1 \dots$



б)



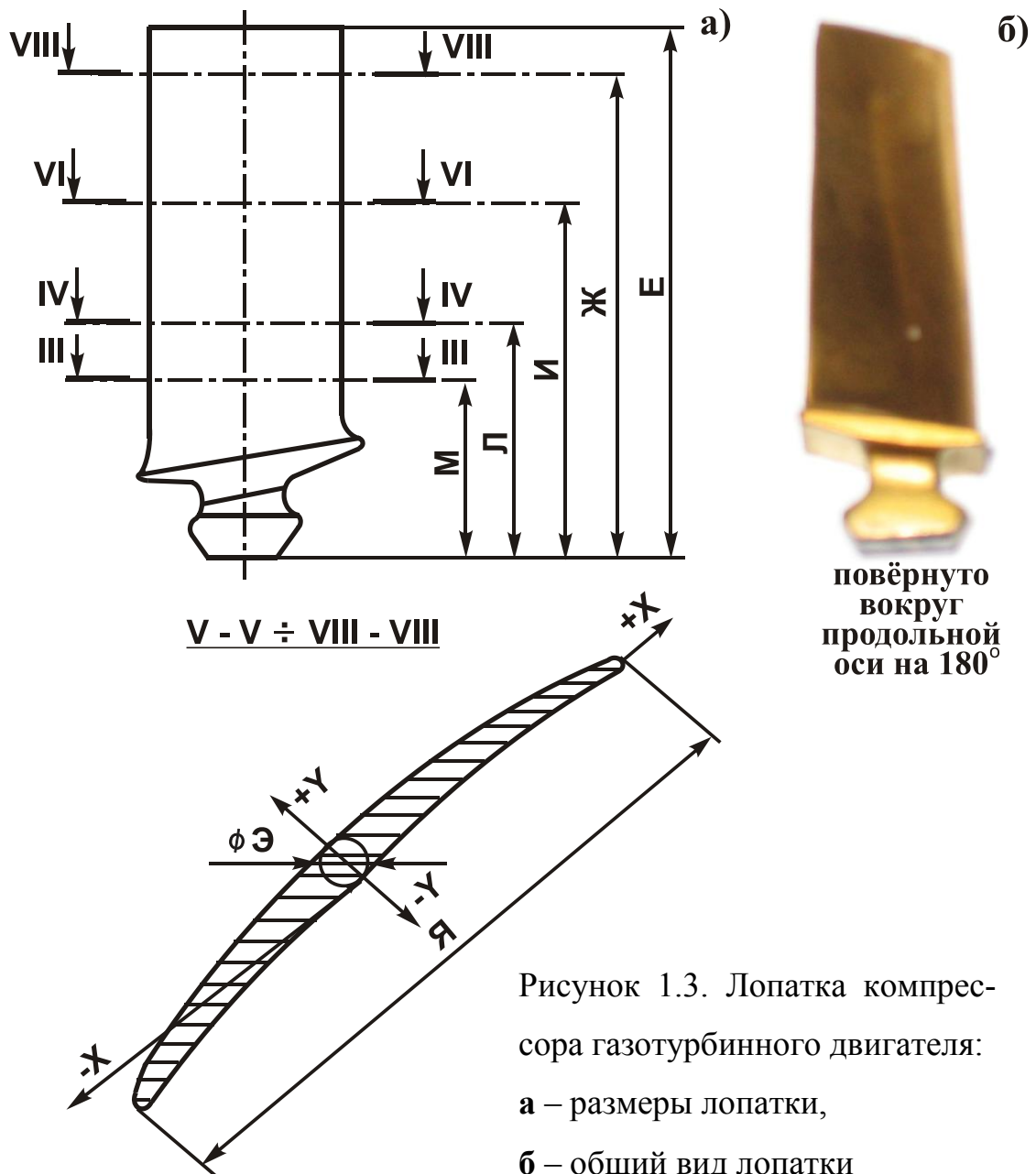
Рисунок 1.2. Лопатка направляющего аппарата компрессора газотурбинного двигателя:

а – размеры лопатки,

б – общий вид лопатки

Таблица 1.2. Геометрические параметры сечений пера лопатки компрессора ГТД

Размеры, мм	Сечение			
	III - III	IV - IV	VI - VI	VIII - VIII
М, Л, И, Ж	М=11,2	Л=15,2	И=25,2	Ж=35,2
$\phi \text{ Э}_{\max}-0,1$	1,63	1,39	0,95	0,74
Я_{\min}	14,1	14,1	14,3	14,3
Е	38,5			



- возникновение неблагоприятных напряжений I, II и III рода в материале лопатки.

Приведенные повреждения и изменения в теле лопатки компрессора возникают из-за действия следующих факторов:

- температурных воздействий,
- высокоскоростного потока газовых, паровых и жидкостных воздействий;
- действия частиц пыли, вулканического пепла, песка и других абразивных материалов;
- действия крупных инородных тел;
- возникновения вибраций;
- возникновения эксплуатационных сил и функций.

Наиболее катастрофическим для лопаток компрессора ГТД является действие частиц пыли, вулканического пепла, песка и другого абразивного материала. Это связано с тем, что для вертолетов характерны полеты на небольшой высоте, вблизи песчаных пустынь и площадок, имеющих свободные частицы. В этих условиях в вертолетные двигатели может поступать воздух с частицами пыли, песка и других мелких частиц. При зависании вертолета у поверхности земли концентрация пыли и песка в воздухе вблизи входов в двигатели может достигать 1 г/м^3 . При этом в воздух поднимаются достаточно крупные частицы с размерами до 200 ... 400 мкм. Для вертолетных двигателей и лопаток компрессора наибольшее значение имеет наличие абразивных твердых частиц из кварцевых песчинок. Так, в песчаной почве (песчаная пустыня) в составе пыли и песка содержится кварцевых песчинок 93 ... 96%, супесчаной – 80 ... 90%, в черноземной – 40 ... 50%, в лесной – 50 ... 65% [27].

В осевом компрессоре ГТД наиболее сильно изнашиваются рабочие лопатки. Их износ наиболее сильно происходит по входной кромке и корыту, причем степень износа увеличивается от полки к периферии. При этом величина износа поверхностного слоя пера лопатки имеет определенные закономерности. А также в первой ступени износ наблюдается по всей высоте лопатки, а в средних и последних ступенях – только в верхней части. Это объясняется тем, что в компрес-

соре происходит постепенное сепарирование частиц пыли к периферии. Следует отметить, что в связи с уменьшением площади поперечного сечения тракта от первых ступеней к последней концентрация пыли и песка по мере прохождения по компрессору увеличивается. Чем крупнее частицы пыли и песка, тем интенсивней происходит эрозионный износ лопатки [27, 191].

Следует отметить, что в процессе эксплуатации лопаток происходит неравномерный эрозионный износ поверхностного слоя лопатки, в том числе неравномерный износ происходит и по высоте слоя. На рис. 1.4 показаны лопатки компрессора со значительным износом входной, выходной кромки и поверхности ко-



Рисунок 1.4. Лопатки компрессора со значительным износом входной, выходной кромки и поверхности корыта пера

рыта пера.

В компрессоре наиболее сильно изнашиваются рабочие лопатки (рис. 1.4). Их износ в основном происходит по входной кромке и корыту пера лопатки, причем степень эрозионного износа увеличивается от полки к периферии. При этом в первой ступени износ наблюдается по всей высоте, а в средних и последних ступенях – только в верхней части.

Это объясняется тем, что в компрессоре происходит постепенное сепарирование частиц пыли к периферии. Следует отметить, что в связи с уменьшением площади поперечного сечения тракта двигателя от первых ступеней к последним концентрация пыли и песка по мере прохождения по компрессору увеличивается. В результате концентрация пыли и песка в воздухе в верхней части лопаток последних ступеней компрессора во много раз больше, чем на входе в компрессор. Вместе с тем, можно отметить, что по мере прохождения пыли и песка по тракту компрессора они размельчаются, истираются и острые углы зерен притупляются [27]. По-

этому эрозионный износ лопаток имеет определенные особенности, причем эти особенности приводят к возникновению неравномерностей износа лопаток как по поверхностям и элементам пера каждой лопатки, так и по лопаткам располагающимся на различных ступенях.

Лопатки компрессора изнашиваются сильнее всего по входной кромке, при этом спинка лопатки почти не изнашивается. При сильном износе лопатки значительно утоняется зона лопатки, располагающаяся возле задней кромки, при этом она отгибается, образуя заусенец на спинке (рис. 1.5). На рис. 1.5 приведены эрозионные разрушения элементов пера лопатки компрессора. Здесь, на рис. 1.5,а – общий вид лопатки с износом выходной кромки и поверхности корыта; на рис. 1.5,б – общий вид зоны лопатки со стороны поверхности корыта с износом выходной кромки пера возле ее периферии; на рис. 1.5,в – общий вид зоны лопатки со стороны поверхности спинки с образованием заусенца с износом выходной кромки пера возле ее периферии.

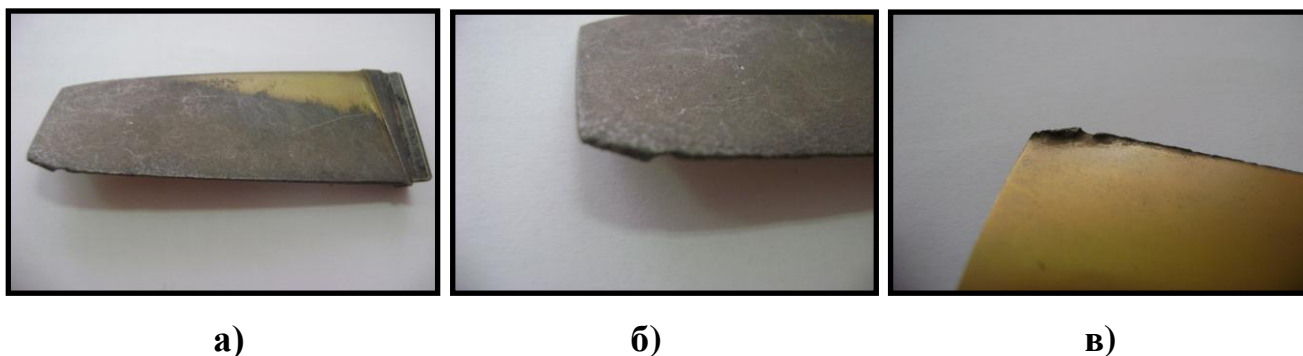


Рисунок 1.5. Эрозионные разрушения элементов пера лопатки компрессора:

а – общий вид лопатки с износом выходной кромки и поверхности корыта; б – общий вид зоны лопатки со стороны поверхности корыта с износом выходной кромки пера возле ее периферии; в – общий вид зоны лопатки со стороны поверхности спинки с образованием заусенца с износом выходной кромки пера возле ее периферии

Следует отметить, что на величину эрозионного износа элементов лопатки влияют следующие факторы:

1. Суммарное количество прошедшей пыли и песка по компрессору.
2. Размеры и масса частиц пыли и песка.

3. Материал частиц пыли и песка, а также материал лопатки.
4. Структура зерен (наличие режущих кромок и острых углов) пыли и песка.
5. Интенсивность изнашивания зависит от угла соударения частиц с поверхностью.
6. Скорость соударения частиц пыли и песка с поверхностью лопатки.
7. На каждой ступени компрессора свойственен свой определенный характер износа лопаток.

Эти факторы в своей совокупности приводят к неравномерному характеру разрушения элементов пера лопатки. Это приводит к снижению ресурса и стойкости лопатки компрессора из-за неравномерного разрушения и не возможности в ряде случаев ее восстановления. Все это ведет к снижению технико-экономических показателей эксплуатации вертолетных двигателей.

Таким образом, для снижения эрозионного износа поверхности лопаток компрессора необходима разработка методов [82] обеспечивающих снижение эрозионного износа поверхностей, а также методов восстановления их работоспособности [81, 121, 124].

1.2. Анализ существующих технологических методов отделочно-упрочняющей обработки и восстановления работоспособности лопаток компрессора ГТД

Лопатки компрессора вертолетного двигателя в настоящее время обычно изготавливаются из титановых сплавов BT3-1, BT8 и BT8M.

Технологический процесс изготовления лопаток компрессора ГТД содержит целый ряд основных операций [46, 107], а именно: штамповка заготовки; закалка при температуре 880°C; механическая обработка; вакуумный отжиг при температуре 900°C после первого вальцевания; вакуумный отжиг при температуре 590°C после второго вальцевания; контроль.

Каждая из этих операций технологического процесса изготовления лопаток компрессора в определенной степени влияет на характеристики поверхностного

слоя. Однако определяющее влияние на ресурс лопаток из титановых сплавов, оказывают термическая обработка и методы ОУО [7, 46, 107]. Поэтому далее рассмотрим основные технологические методы отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора.

Для финишной обработки лопаток из титановых сплавов с целью нейтрализации технологических микродефектов применяют виброабразивное полирование, виброгалтовку и ультразвуковую обработку [24, 32, 37, 46, 107].

Большая часть виброабразивной обработки выполняется на вибромашинах с горизонтальным валом и контейнером U-образной формы. Вибромашины этого типа, благодаря емкому контейнеру прямоугольного сечения в плане, позволяет вести обработку средних и крупногабаритных деталей, и отличаются простотой формы контейнера. Однако эти установки имеют склонность к образованию зон неравномерной обработки у торцевых стенок и отличаются высокими энергозатратами. Вибромашина с вертикальным валом и круглым контейнером - лишена этих недостатков.

В контейнер засыпают абразивные гранулы, заливают рабочую жидкость и сообщают механические колебания с частотой 20 ... 50 Гц и амплитудой от 1 до 10 мм. Под действием колебаний рабочей среды и детали, свободно загруженные или закрепленные, приходят в интенсивное движение.

При проскальзывании по поверхности лопатки абразивные гранулы снимают мельчайшие частицы металла, при микроударах происходит частичное вдавливание металла и местное упрочнение [25, 103, 115] в местах контакта абразивных зерен с поверхностью лопатки.

Рабочая среда состоит из наполнителя и рабочей жидкости. В качестве наполнителя применяют следующее: бой абразивных кругов 25А на керамической связке с величиной зерна 400 мкм; бой шарошлифовальных кругов 14А с величиной зерна 500 мкм; бой фарфора или фарфоровые шарики; шлифпорошок; стальные закаленные шарики; стеклянные шарики; деревянные кубики, обрезки кожи и войлока.

Можно отметить, что шлифпорошок применяется при виброполировании очень мелких лопаток, а также при виброполировании с мягкими пористыми наполнителями типа войлочных пыжей [139, 145].

Вместе с тем можно заметить, что предлагаемые методы виброабразивное полирование, виброгалтовка и ультразвуковая обработка, позволяют повысить следующие параметры поверхностного слоя лопаток: выполнить местное упрочнение поверхностного слоя лопатки; увеличить глубину залегания остаточных сжимающих напряжений, что повышает сопротивляемость усталости лопатки; обеспечивают достижение шероховатости поверхности $R_a = 1,5$ мкм за 30 мин.

Вместе с тем, эти методы [46, 107] не позволяют обеспечивать изменяющиеся свойства поверхностного слоя пера лопатки в зависимости от особенностей эрозионного износа лопатки. Поэтому они не могут применяться для обеспечения изменяющихся свойств поверхностного слоя лопатки.

Виброабразивная обработка лопаток компрессора, а также упрочняющаяся виброобработка стальными шариками [46, 98, 104, 107] выполняются на одноступенчатом оборудовании, которые сочетают шлифование и полирование с пластическим деформированием поверхностного слоя.

Продолжительность виброгалтовки является основным фактором, определяющим трудоемкость технологического процесса. Обычно виброгалтовка выполняется на вибрационной установке шариками диаметром 2 мм в антикоррозийной жидкости ГЖ-1 с виброскоростью 0,96 м/с. Для лопаток компрессора ГТД виброгалтовка обеспечивает следующее: снижается параметр шероховатости до значения $R_a = 0,3$ мкм и поверхность принимает плавные очертания; изменяются параметры микротвердости поверхностного слоя и остаточных напряжений; повышается демпфирующие свойства упрочненных лопаток; повышается сопротивление усталости материала лопатки.

Однако данная обработка не позволяет обеспечивать изменяющиеся свойства поверхности [6] лопатки компрессора в зависимости от действующих внешних факторов, а именно в зависимости от изменяющегося по поверхности лопатки эрозионного износа поверхности.

Процесс упрочнения шариками лопаток компрессора в ультразвуковом поле методом ППД [46, 98, 104, 107, 133] основан на сообщении кинематической энергии рабочим телам при помощи ультразвукового поля, возникающего в замкнутом объеме при возбуждении в нем упругих колебаний ультразвуковой частоты. Лопатки компрессора, помещенные в рабочую камеру, подвергаются обработке шариками. Это позволяет значительно, в десятки раз, повысить производительность и получить благоприятные характеристики поверхностного слоя лопатки компрессора ГТД.

Интервал применяемых амплитуд находится в пределах 0,01 ... 0,15 мм. Используемый диапазон частот колебаний излучающих поверхностей волновода находится в пределах 16 ... 22 кГц. В качестве рабочих тел используются шарики из стали ШХ15 или нержавеющей стали диаметром 0,4 ... 3 мм. Размер применяемых шариков определяется из условия возможности обработки всех радиусов перехода от одной поверхности лопатки к другой, а также возможности получения оптимальной степени деформации обработанных поверхностей и выполнения требований к шероховатости.

С увеличением диаметра шариков качество поверхности ухудшается, глубина залегания остаточных сжимающих напряжений увеличивается. Для обработки лопаток с тонкими кромками $R < 0,2$ мм рекомендуется применять шарики диаметром 1,0 ... 1,3 мм, для лопаток с кромками $R > 0,2$ мм – шарики диаметром 1,5 ... 2,5 мм или смесь их в зависимости от типоразмеров обрабатываемых деталей.

Масса упрочняющего тела в загрузке оказывает влияние на качество поверхностного слоя обрабатываемых лопаток. С увеличением количества шариков в загрузке величина и глубина залегания остаточных сжимающих напряжений уменьшается, а качество поверхности улучшается. Рекомендуемый интервал применяемых масс при упрочнении лопаток находится в пределах 200 ... 1000 грамм.

На формирование качества поверхностного слоя лопаток наиболее существенное влияние оказывает продолжительность процесса упрочнения. При ее увеличении качество поверхности улучшается, а величина и глубина залегания наве-

денных остаточных напряжений увеличиваются. Рекомендуемое время упрочнения по перу одной партии при перпендикулярном расположении лопаток составляет 4 ... 10 мин, при радиальном – увеличивается до 15 мин; оптимальное время упрочнение по замку находится в пределах 20 ... 45 с.

Количество одновременно упрочняемых лопаток составляет 10 ... 60 штук в зависимости от размера лопаток и конструкции волновода. С целью интенсификации процесса и исключения явления сухого трения при ударах шариков об обрабатываемую поверхность лопатки применяется смачивающая жидкость – вода с антикоррозионными добавками. Количество смачиваемой жидкости, заливаемой в рабочий объем, находится в пределах 4 ... 6 мл на одну партию лопаток.

Такая финишная обработка, как ультразвуковое упрочнение, не позволяет в отдельных случаях полностью достигать высоких показателей параметров выносливости. Это приводит к резкому снижению эффективности ультразвукового упрочнения и в отдельных случаях к разупрочнению отдельных участков лопаток [107].

Кроме того, ультразвуковое упрочнение не позволяет решать вопросы обеспечения изменяющихся свойств поверхности лопатки и ориентированной реализации свойств поверхности лопатки в зависимости от величины износа поверхности лопатки. Это сдерживает применение этого метода для обеспечения ФОС лопатки.

Одной из разновидностей ОУО лопаток компрессора ГТД является ионно-плазменное азотирование лопаток [42, 107]. Эта разновидность обработки применяется для повышения эрозионной стойкости деталей.

Ионное азотирование имеет большую скорость насыщения, возможность получения диффузионных слоев заданного фазового состава и регулирования процесса [23]. Увеличение давления в рабочем интервале газов приводит к повышению глубины диффузионного слоя. В качестве азотсодержащих газов применяют аммиак, азот, смесь азота с водородом и их смесей азота с другими газами.

Особенностью разработанной технологии [31, 107] является применение при азотировании смеси азота с аргоном. В результате бомбардировки поверхно-

сти детали ионами аргона интенсивнее происходит процесс ионной очистки поверхностей от окислов и ускоряется процесс диффузии азота в материал лопатки.

Для этого метода упрочнения поверхностей лопатки можно также отметить, что он, как и другие приведенные выше методы [107] не позволяет решать вопросы обеспечения изменяющихся свойств поверхности лопатки и ориентированной реализации свойств лопатки в зависимости от величины износа.

Характерной особенностью напыления ионно-плазменных покрытий (метод *PVD*) [42, 107] на поверхности пера лопатки компрессора является возможность нанесения нитридов и карбидов тугоплавких металлов и образования пленки обладающей высокой микротвердостью ($H_{\mu} = 21 \dots 25$ ГПа). Для напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий используется принцип КИБ (конденсация и ионная бомбардировка). Толщина наносимых покрытий на поверхности пера лопатки компрессора составляет 4 ... 5,5 мкм. Для напыления таких покрытий на ряде предприятий используются установки ННВ 6.6-И1. В качестве катодов обычно применяется сплав ВТ1-0, а также дополнительно может использоваться цирконий.

Ионно-плазменные покрытия, нанесенные предлагаемым методом [42, 107], обеспечивают повышение периода эксплуатации лопаток компрессора в 2,5 ... 3,0 раза по сравнению с обычными лопатками без покрытий. Однако этим методом невозможно выполнять нанесение покрытий с переменной толщиной в зависимости от особенностей износа покрытия [144]. Это не позволяет реализовывать полный эксплуатационный потенциал лопаток компрессора ГТД.

В работе [107] отмечается, что одним из перспективных методов ОУО лопаток [161] является метод магнитно-абразивного полирования (МАП). Отличительные черты МАП заключаются в следующем: универсальность абразивного инструмента позволяет обрабатывать детали из различных материалов и конфигураций с формированием поверхностей деталей с благоприятными характеристиками; сочетание в одном процессе отделочной и упрочняющей операций; возможность механизировать обработку практически любой детали [14, 16, 84, 85].

МАП представляет собой процесс обработки деталей в среде абразивного порошка, удерживаемого силами магнитного поля в рабочей зоне. Магнитно-абразивный материал располагается между полюсами электромагнитов, создавая режущий инструмент («щетки»), плотность которого можно варьировать в широких пределах, изменяя напряженность магнитного поля в зазорах. При движении детали через рабочую зону абразивный порошок охватывает обрабатываемую деталь, оказывая давление на нее в каждой точке поверхности. Наличие составляющих давлений на деталь со стороны порошка по нормали (магнитного происхождения) и тангенциальной составляющей, обусловленной перемещением изделия относительно порошка, приводит к съему металла и сглаживанию микронеровностей на поверхности детали.

Из анализа полученных в работе [107] результатов можно сделать вывод, что МАП повышает эксплуатационные характеристики поверхностного слоя титановых сплавов лопаток. Возможность изменять режимы МАП позволяет целенаправленно управлять эксплуатационными характеристиками материалов для оптимизации их в конкретных условиях эксплуатации.

Однако, полученные в работе [107] результаты не позволяют обеспечивать заданные параметры свойств лопатки компрессора в зависимости от особенностей ее эксплуатации в ГТД. Поэтому для решения этих вопросов необходимы дальнейшие исследования и предложения. В работах профессоров Богуслаева В.А., Яценко В.К., Жеманюка П.Д., Бабичева А.П., Хейфеца М.Л. [107, 160, 165] предлагается для повышения качества деталей машиностроения выполнять комбинированную или комплексную обработку. При этом для обработки лопаток компрессора рекомендуется совмещать несколько методов обработки.

В работе [107] рекомендуется для лопаток компрессора реализовывать следующие совместные методы обработки: ионно-плазменное азотирование и ультразвуковое упрочнение, ионно-плазменное азотирование и пневмо-дробеструйное упрочнение, ионно-плазменное азотирование и нанесение нитрид титановых покрытий.

Предлагаемые методы позволяют повысить физико-механические свойства лопаток компрессора, однако они обеспечивают только постоянные свойства поверхностного слоя лопаток и не позволяют реализовывать изменяющиеся свойства поверхностей лопатки. Это снижает возможности приведенных методов обработки [146, 147, 148, 157, 158].

Можно отметить, что методика восстановительного ремонта лопаток, приведенная в работе [1], может включать следующие основные операции: очистка лопаток от продуктов коррозии и эрозии (легкая обдувка мелким электрокорундом); зачистка и заполировка мелких забоин, вмятин, коррозионно-эрозионных повреждений; нанесение покрытий различных типов; восстановительная термическая обработка различного назначения.

Данная структура технологии [1] позволяет решать вопросы восстановления рабочих поверхностей лопатки посредством удаления остатков не разрушенного покрытия и нанесения новых покрытий. Однако здесь можно отметить, что покрытие лопатки в условиях ГТД изнашивается неравномерно по поверхностям пера лопатки. Поэтому на наш взгляд, для лопаток компрессора ГТД, имеющих неравномерный износ покрытия, необходимы специальные методы, позволяющие выполнять удаление покрытий неодинаковой толщины. Кроме того, так как покрытие на поверхностях пера лопатки изнашивается неравномерно, новое покрытие следует наносить неодинаковой толщины на поверхности, величина которого бы соответствовала степени эрозионного разрушения покрытия в различных зонах пера лопатки. То есть толщина наносимого покрытия должна находиться в зависимости от величины его износа при эксплуатации двигателя. Поэтому для решения этих вопросов необходима разработка специальных методов и технологий по удалению покрытий неодинаковой толщины и нанесению неравномерных новых покрытий, для обеспечения их одновременного износа на поверхностях лопатки при эксплуатации.

Таким образом, предлагаемые методы и технологические процессы ОУО [7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 19, 28] лопаток компрессора ГТД позволяют решать вопросы обеспечения заданных параметров свойств, при этом в процессе реализации тех-

нологических воздействий реализуются равномерные свойства поверхностей пера лопатки. Эти процессы не позволяют обеспечивать неравномерные свойства поверхности лопатки в зависимости изменяющихся параметров ее эрозионного износа (неравномерность толщины износа). Все это не позволяет обеспечивать полный потенциал работоспособности лопатки.

Кроме того, следует заметить, что процесс удаления остаточного неравномерно изношенного покрытия с поверхности корыта пера лопатки является очень трудоемким и сложным из-за неодинаковой толщины покрытия. Это снижает параметры качества поверхностного слоя пера лопатки при обработке таких покрытий, а именно образуются углубления – макроямы и волнистость на поверхности лопатки из-за продавливания покрытия при обработке. Продавливание покрытия происходит из-за того, что оно и основной материал имеют различную твердость, превышающую относительно друг друга в десятки раз, а также вследствие неравномерной толщины этого покрытия по поверхности лопатки, возникающего из-за неравномерного эрозионно-коррозионного износа.

1.3. Цель и основные задачи работы

Таким образом, выполненный анализ современного состояния вопроса исследования позволил сделать следующие выводы.

На величину эрозионного износа элементов лопатки влияют следующие факторы: суммарное количество прошедшего абразивного материала (пыль и песок) по компрессору; размеры и масса абразивных частиц пыли и песка; материал частиц пыли и песка, а также материал лопатки; структура зерен (наличие режущих кромок и острых углов) пыли и песка; интенсивность изнашивания зависит от угла соударения частиц с поверхностью; скорость соударения абразивных частиц пыли и песка с поверхностью лопатки; на каждой ступени компрессора свойственен свой определенный характер износа лопаток.

Эти факторы в своей совокупности приводят к неравномерному характеру разрушения элементов пера лопатки. Это приводит к снижению ресурса и стойко-

сти лопатки компрессора из-за неравномерного разрушения и не возможности в ряде случаев ее восстановления. Все это ведет к снижению технико-экономических показателей эксплуатации вертолетных двигателей.

Поэтому для снижения эрозионного износа поверхности лопаток компрессора необходима разработка методов обеспечивающих снижение эрозионного износа поверхностей, а также методов восстановления их работоспособности.

Предлагаемые методы и технологические процессы ОУО лопаток позволяют решать вопросы обеспечения заданных параметров свойств, при этом в процессе реализации технологических воздействий реализуются равномерные свойства поверхностей пера лопатки. Эти процессы не позволяют обеспечивать неравномерные свойства поверхности лопатки в зависимости от изменяющихся параметров ее эрозионного износа (неравномерность толщины износа). Все это не позволяет обеспечивать полный потенциал работоспособности лопатки.

Кроме того, процесс удаления остаточных неравномерно изношенных покрытий с поверхности корыта пера лопатки является очень трудоемким и сложным. Это снижает параметры качества поверхностного слоя пера лопатки при их восстановлении, а именно образуются углубления – макроямы и волнистость на поверхности лопатки из-за продавливания покрытия при обработке. Продавливание покрытия происходит из-за того, что твердость покрытия в десятки раз превышает твердость основного материала, а также вследствие неравномерной толщины этого покрытия по поверхности лопатки, возникающего из-за неравномерного эрозионного износа. Поэтому применяемые лопатки в ГТД имеют низкий уровень восстанавливаемости их работоспособности.

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 создания необходимого технологического обеспечения.

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

1. Выполнить исследования и установить особенности работы элементов лопаток ГТД в условиях действия неравномерных эрозионно-коррозионных воздействий среды. Исследовать применяемые методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностей пера лопатки для повышения их работоспособности.

2. Разработать общий подход и принципы синтеза технологического обеспечения реализации отделочно-упрочняющие обработки лопаток компрессора с ФОП. Предложить методику и алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД.

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

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

5. Выполнить функционально-структурный синтез технологического обеспечения процессов нанесения покрытий на лопатки компрессора ГТД. Разработать классификацию ФОП для лопаток компрессора ГТД. Провести синтез структурных вариантов технологических процессов реализации ФОП. Разработать структуру технологического обеспечения для формирования ФОП.

6. Определить рациональные варианты концентрации изделий в вакуумной камере ионно-плазменной установки. Предложить возможные виды структур расположения рабочих позиций вакуумной камеры и исследовать виды пространственных связей расположения рабочих позиций в вакуумной камере. Выполнить анализ кинематики движений лопаток в вакуумной камере.

7. Разработать базовые варианты структурно-технологического обеспечения реализации ФОП лопаток компрессора. Исследовать особенности эрозионно-

коррозионных разрушений лопаток компрессора по ступеням ГТД модели ТВ3-117. 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.

РАЗДЕЛ 2**ОБЩИЙ ПОДХОД В ПОВЫШЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ЛОПАТОК ГТД. ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И
ВОССТАНОВЛЕНИЯ СВОЙСТВ****2.1. Общие сведения**

Основной особенностью лопаток компрессора вертолетного ГТД является то, что они имеют сложную пространственную цельную конструкцию, состоящую из ряда функциональных элементов, каждый из которых имеет проблемные зоны и нюансы эксплуатации. Особенно сложным в изготовлении и проблематичным при эксплуатации является перо лопатки компрессора, так как оно имеет специальную аэродинамическую форму, тонкие входные и выходные кромки. При этом оно весьма чувствительно к нагрузкам и концентрации напряжений. Более того лопатки компрессора первыми воспринимают действие инородных частиц, попавших в тракт двигателя. Все это вызывает необходимость применения специальных технологических методов изготовления и ОУО лопаток компрессора вертолетного ГТД, которые бы обеспечили повышение ресурса и надежности авиационных двигателей.

На основании выше сказанного, в данной работе будут представлены данные и выполнены исследования, связанные с вопросами обеспечения необходимых свойств только для пера лопатки компрессора вертолетного ГТД.

В этом разделе будут выполнены исследования связанные с анализом особенностей эксплуатации пера лопаток компрессора и классификации действующих на него функций. Для обеспечения необходимых свойств пера лопатки будет предложен общий подход и основные принципы обеспечения ФОС лопаток компрессора ГТД. А также выполнено деление лопатки компрессора на функциональные элементы и разработана методика синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса обеспечения и восстановления

свойств лопаток ГТД. При этом предполагается установить связи и закономерности отношений параметров между операциями технологического процесса [17, 18, 34]. Кроме того, здесь будет разработан алгоритм методики синтеза и блок-схема работы.

2.2. Исследование особенностей эксплуатации лопаток компрессора и классификация их эксплуатационных функций

При эксплуатации двигателей вертолетов на лопатки компрессора действует целый ряд эксплуатационных воздействий различного характера, действие которых можно моделировать потоками материи M_w , энергии E_w и информации I_w (рис. 2.1).

На рис. 2.1 представлена модель процесса преобразования свойств лопаток компрессора ГТД при эксплуатации. Здесь показано: V – вход, начало процесса эксплуатации лопатки, W – выход, завершение процесса эксплуатации лопатки. Процесс преобразования свойств лопатки при эксплуатации происходит из-за действия эксплуатационных воздействий материального M_w , энергетического E_w и информационного I_w характеров. Начальные и конечные свойства лопатки можно представлять следующими векторами [131, 134]:



Рисунок 2.1. Модель процесса преобразования свойств лопаток компрессора при эксплуатации

$$V = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{Bmatrix}, \quad W = \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_k \end{Bmatrix};$$

где v_i – i -е начальное свойство лопатки компрессора;

w_j – j -е конечное свойство лопатки компрессора;

n – общее количество начальных свойств лопатки компрессора, которые образованы до ее эксплуатации;

k – общее количество конечных свойств лопатки компрессора, образующихся в процессе ее эксплуатации.

В процессе эксплуатации вертолетных двигателей на лопатки компрессора действует целый ряд эксплуатационных воздействий, которые можно структурировать. На рис. 2.2 представлена классификация основных эксплуатационных воздействий на лопатки компрессора. Эти воздействия можно разделить следующим образом:

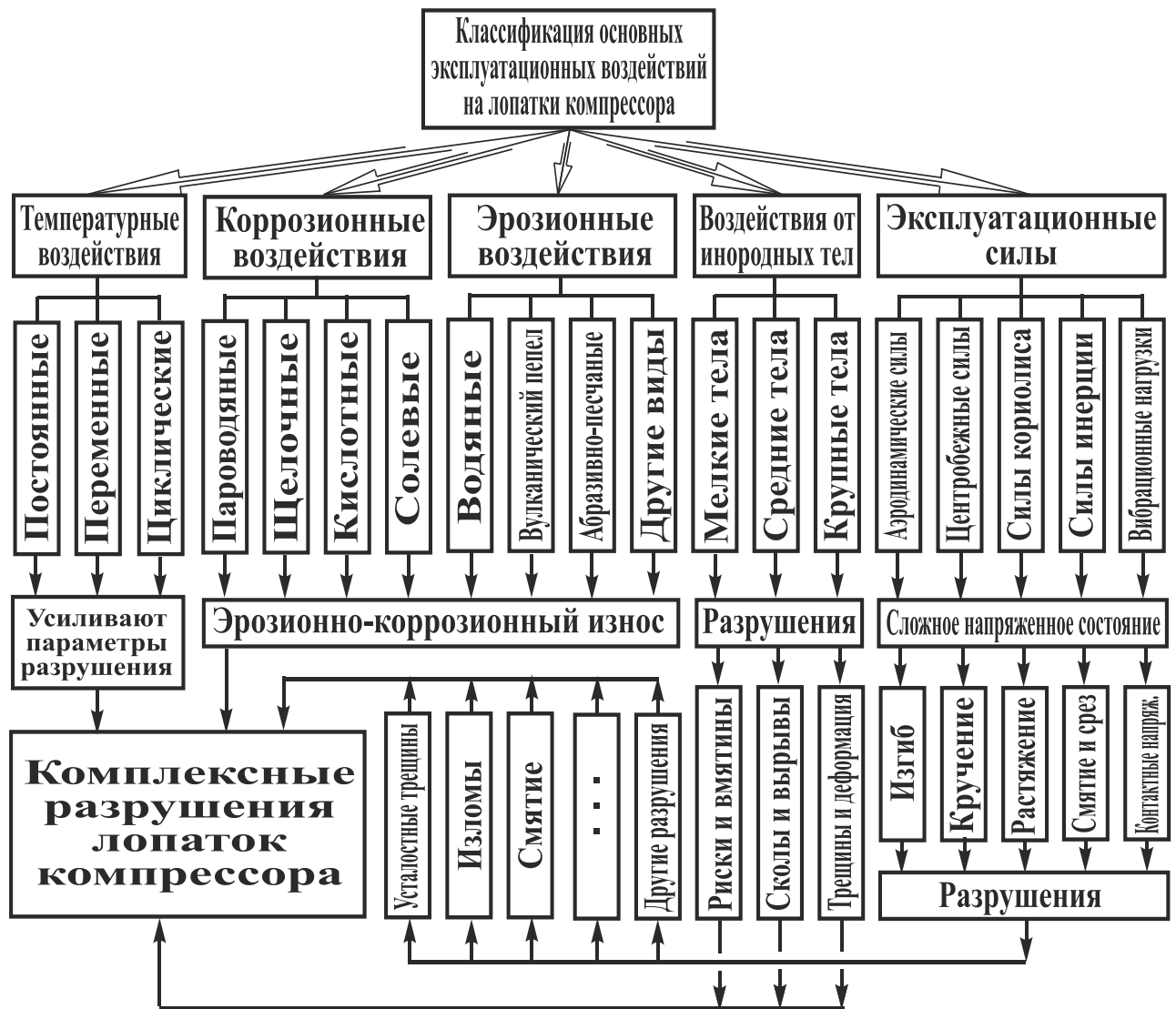


Рисунок 2.2. Классификация основных эксплуатационных воздействий на лопатки компрессора ГТД

- температурные воздействия,
- коррозионные воздействия,
- эрозионные воздействия,

- воздействия от инородных тел,
- эксплуатационные силы.

Здесь можно отметить, что в своей совокупности все эти воздействия вызывают комплексные разрушения лопаток компрессора. При этом катастрофический износ вызывают эрозионные разрушения лопаток, возникающие из-за эрозионного износа пера лопатки компрессора. Поэтому далее будут рассмотрены более детально эти вопросы.

Для вертолетов характерны полеты на небольшой высоте, сравнительно длительная работа вблизи поверхности земли, взлет и посадка с естественных площадок [27], имеющих песчанистую и пылевую почву. В этих условиях, в вертолетные двигатели может поступать воздух с частицами песка, пыли и других абразивных частиц, поднимающихся как в результате естественной запыленности воздуха вблизи земли, так и вследствие того, что потоки воздуха, идущие от несущего винта поднимают с поверхности земли твердые частицы, создающие вокруг вертолета облако с увеличенной концентрацией частиц песка и пыли. Кроме того, в случае вулканической деятельности в ряде случаев могут возникать условия работы вертолетов в условиях увеличенной концентрации вулканического пепла в воздухе вокруг вертолета.

При зависании вертолета концентрация пыли и других частиц в воздухе может достигать несколько грамм в кубическом метре около земли и до 1 г/м^3 вблизи входов в двигатели. Более типична концентрация на входе в двигатели около $0,2 \dots 0,3 \text{ г/м}^3$. При этом в воздух поднимаются и достаточно крупные частицы размерами до $200 \dots 400 \text{ мкм}$ [27].

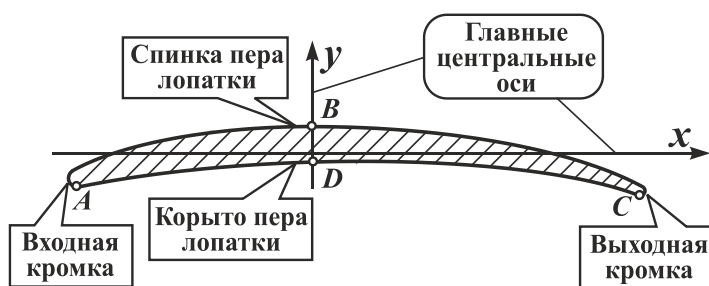


Рисунок 2.3. Основные элементы пера лопатки компрессора

Анализируя процесс эрозионного разрушения лопаток компрессора можно отметить, что их износ в основном происходит по входной кромке и поверхности корыта (рис. 2.3). На рис. 2.3 пред-

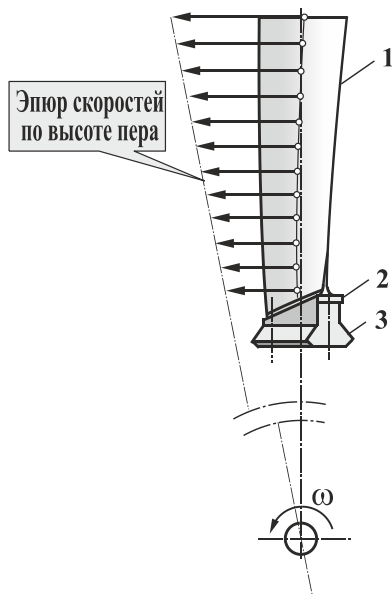


Рисунок 2.4. Эпюр скоростей точек, расположенных по высоте пера лопатки компрессора

ставлены основные элементы пера лопатки компрессора, а именно следующие: входная и выходная кромки, крыто пера лопатки, спинка пера лопатки и тело пера лопатки (на рис. 2.3 не обозначено). Поверхности пера лопатки являются рабочими, к ним предъявляют высокие требования по точности геометрических параметров и шероховатости поверхностей.

Можно отметить, что величина износа элементов пера лопатки обычно увеличивается от полки к периферии пера. Это объясняется тем, что в компрессоре происходит постепенное сепарирование частиц пыли и песка к периферии по тракту компрессора, а также из-за увеличения скорости относительного движения частиц по высоте пера лопатки компрессора (рис. 2.4). На рис.

2.4 цифрами обозначены следующие позиции: 1 – перо лопатки компрессора, 2 – полка лопатки, 3 – замок лопатки (трапециидальный).

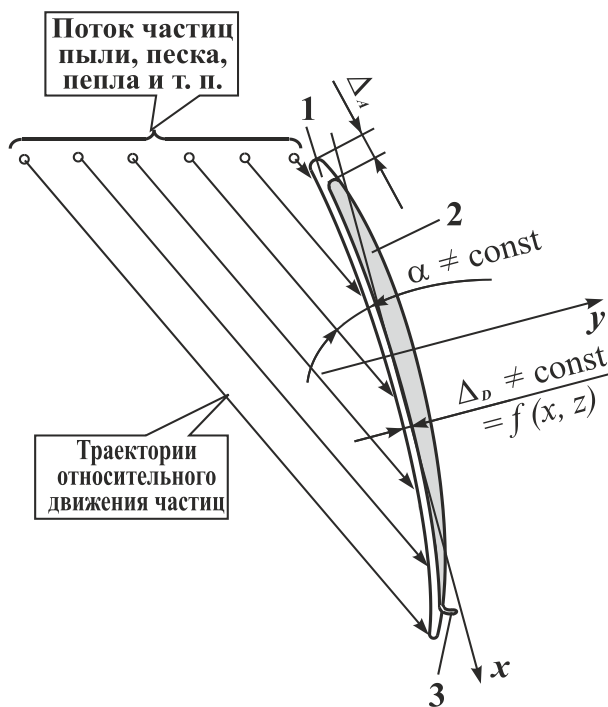


Рисунок 2.5. Гипотетическая схема взаимодействия частиц пыли при износе элементов пера лопатки компрессора

Здесь можно отметить, что при постоянной частоте вращения ротора компрессора ω линейная скорость по высоте пера лопатки изменяется в соответствии с эпюром, представленным на рис. 2.4. В результате соответственно увеличивается и скорость относительного соударения пыли и частиц песка с пером лопатки.

А также следует отметить, что в первой ступени износ пера наблюдается по всей высоте, а в последующих ступенях из-за сепарирования пыли и песка он смещается к периферии пера лопатки. В результате концентрации пыли и песка в аэродинами-

ческом потоке у периферии пера лопатки в последних ступенях их износ может быть в несколько раз выше, чем на входе в компрессор. Однако этот износ может в каждом конкретном случае иметь свои особенности.

Можно отметить, что эрозионный износ пера лопатки начинается на входной кромке пера лопатки, которая в процессе износа из-за действия аэродинамического потока теряет свою форму на величину Δ_A . А также износ пера лопатки происходит по поверхности корыта пера лопатки (рис. 2.5). При этом форма пера лопатки 1 преобразуется в форму 2. Причем величина износа слоя пера корыта лопатки по ее ширине имеет переменную величину $\Delta_D \neq \text{const} = f(x, z)$, которая зависит от угла соударения частиц $\alpha \neq \text{const}$. При этом угол соударения частиц с лопаткой изменяется по ширине пера и зависит от формы корыта пера лопатки и траектории относительного движения частиц. На рис. 2.5 представлена гипотетическая схема взаимодействия частиц пыли при износе элементов пера лопатки компрессора.



Рисунок 2.6. Общий вид заусенца по задней кромке пера лопатки

Спинка пера лопатки почти не изнашивается [27]. При этом при значительном износе поверхности корыта пера лопатки у задней кромки она отгибается, образуя заусенец 3 на спинке (рис. 2.5). Общий вид заусенца по задней кромке пера лопатки представлен на рис. 2.6.

Следует отметить, что величина износа, как передней кромки, так и корыта в процессе эксплуатации увеличивается прямо пропорционально суммарному количеству прошедших частиц пыли и песка независимо от их концентрации в воздухе. Размер частиц кварцевой пыли существенно влияет на величину износа. Чем крупнее частицы пыли, тем интенсивнее износ [27].

На рис. 2.7 представлена схема взаимодействия пыли и частиц аэродинамического потока воздуха с лопатками компрессора. Здесь показано следующее: по-

зиции 1 и 2 - соседние лопатки компрессора; v_1 - направление движения потока воздуха по тракту двигателя; v_2 - поперечная скорость относительного движения частицы пыли или песка; v - суммарная скорость относительного движения частиц пыли и песка по траекториям относительного движения частиц; v_2^I - линейная скорость поперечного движения лопатки; a, b, c, d - траектории относительного движения частиц разных размеров; α - угол соударения частиц пыли и песка с поверхностью корыта пера лопатки ($\alpha \neq \text{const}$ из-за формы корыта пера лопатки).

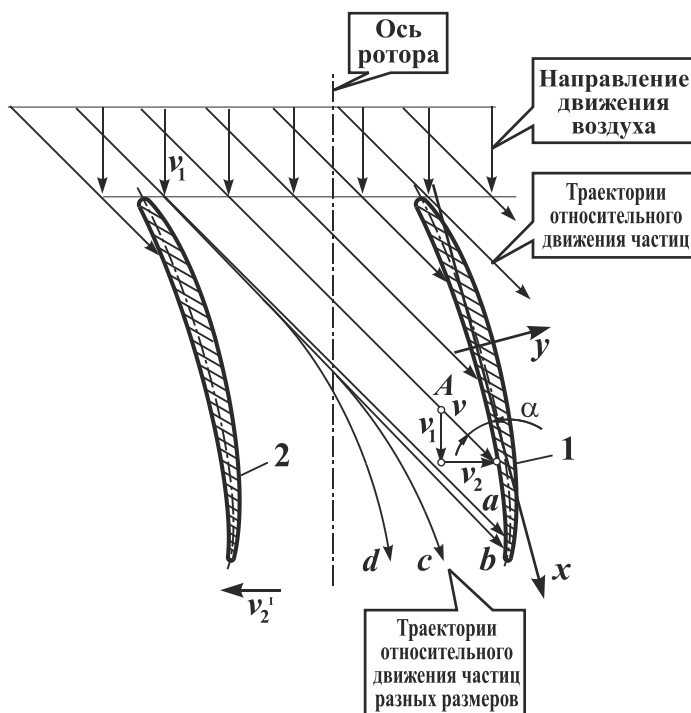


Рисунок 2.7. Схема взаимодействия пыли и частиц аэродинамического потока воздуха с лопатками компрессора

ки 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 и его покрытия.

Можно отметить, что траектории относительного движения частиц пыли и песка a (рис. 2.7) почти не отклоняются от теоретических значений [27], 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

Наибольший износ поверхности корыта пера лопатки обычно наблюдается при углах соударения $\alpha = 50 \dots 60^\circ$, а для $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 20 \dots 25^\circ$ он почти в 2 раза меньше [27]. Изменение угла соударения частиц и поверхности является основной причиной различной глубины износа корыта пера лопатки по ее ширине и высоте. Это связано с тем, что по ширине пера лопатки форма корыта пера в направлении x (рис. 2.7) имеет переменные параметры, а также перо лопатки по высоте в направлении z имеет закрутку на определенный угол, что также влияет на изменение угла соударения частиц с поверхностью.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить, что износ лопатки компрессора имеет определенные особенности, а именно:

- входная кромка (зона около входной кромки) имеет переменный износ, увеличивающийся от полки лопатки к периферии пера лопатки, величина которого может изменяться до 2-х раз;
- выходная кромка (зона около выходной кромки) имеет переменный износ, 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, уменьшающийся от входной к выходной кромке, величина которого может изменяться до 1,3 ... 1,5 раз;
- поверхность корыта пера лопатки имеет переменный износ, изменяющийся по поверхности до 2-х раз;
- поверхность спинки пера лопатки имеет сравнительно незначительный износ.

2.3. Общий подход и принцип обеспечения свойств лопаток

Проведенные исследования позволили установить, что в процессе эксплуатации лопаток компрессора ее функциональные элементы изнашиваются неравномерно в результате действия эрозионно-коррозионных воздействий. При этом неравномерность износа покрытия по поверхности функциональных элементов пера лопатки может достигать до 2-х раз. Для повышения ресурса лопаток компрессора ГТД применяют множество различных методов ОУО. Наиболее перспективным методом является применение нитрид-титановых вакуумных ионно-плазменных покрытий пера лопатки [20, 21] (рис. 2.8).

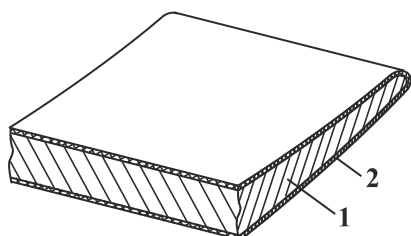


Рисунок 2.8. Элемент лопатки компрессора с ионно-плазменным покрытием

На рис. 2.8 представлен элемент лопатки компрессора с ионно-плазменным покрытием. Здесь показано: 1 – тело пера лопатки, 2 – ионно-плазменное покрытие. Толщина покрытия лопаток компрессора составляет 5 ... 6 мкм. При этом выполненные исследования позволили установить, что применяемое нитрид-титановое покрытие в процессе эксплуатации лопаток имеет неравномерный износ. Причем наиболее изнашивается функциональный элемент пера лопатки находящийся в зоне входной кромки пера. А также поверхность корыта пера лопатки также имеет неравномерность износа, которая зависит от действующих функций. Кроме того, зона возле периферийной кромки также имеет неравномерность износа поверхности корыта пера лопатки.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить, что износ функциональных элементов пера лопатки компрессора имеет большую неравномерность, которая зависит от действующих эксплуатационных функций, которые определяются особенностями эксплуатации ГТД.

В данной работе предложено для повышения ресурса лопаток компрессора, имеющих неравномерный эрозионно-коррозионный износ функциональных элементов пера, использовать функционально-ориентированные ионно-плазменные покрытия [86 ... 95]. При этом здесь процесс формирования структуры и особенностей функционально-ориентированных покрытий (ФОП) планируется производить на базе принципа единовременного полного износа покрытия (ЕПИП) в заданный период эксплуатации лопатки компрессора. Причем использование принципа ЕПИП необходимо выполнять как в период изготовления и эксплуатации

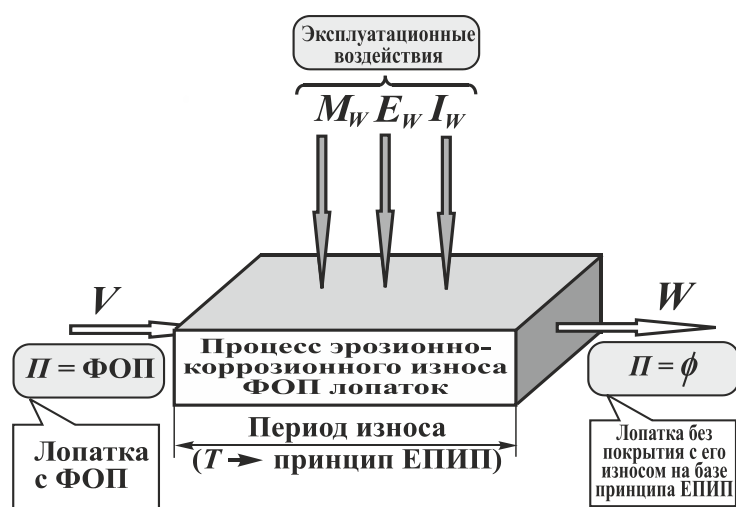


Рисунок 2.9. Гипотетическая модель процесса единовременного полного износа покрытия лопатки

новых лопаток, так и в период восстановления и эксплуатации изношенных лопаток.

На рис. 2.9 представлена гипотетическая модель процесса ЕПИП лопатки компрессора. В модели, на входе V в систему лопатки имеют ФОП ($\Pi = \text{ФОП}$), на выходе W - покрытия нет ($\Pi = \phi$). В этом случае, ФОП в процессе эрозионно-коррозионного износа единовременно полностью изна-

шивается за период T на базе принципа ЕПИП. Процесс износа реализуется вследствие действия эксплуатационных воздействий, которые можно моделировать потоками материи M_w , энергии E_w и информации I_w [167].

Можно отметить, что процесс ЕПИП реализуется вследствие того, что покрытие имеет ФОС, которые обеспечиваются покрытию в функциональной зависимости от действия эксплуатационных функций. Поэтому в процессе истечения периода T , покрытие единовременно полностью изнашивается. При этом при восстановлении работоспособности лопатки не нужно удалять оставшееся покрытия, так как оно полностью изнашивается. Это способствует повышению ресурса, ремонтпригодности и сохраняемости лопатки из-за действия износа.

Повышение ресурса лопатки обеспечивается за счет того, что при применении ФОП ресурс лопатки определяется длительность износа покрытия в зоне минимального износа покрытия по поверхности пера лопатки, а при традиционных покрытиях ресурс лопатки зависит от длительности износа покрытия в зоне максимального износа покрытия по поверхности пера лопатки (входная кромка). ФОП имеют переменные физико-механические свойства (ВМС) или переменную толщину по поверхности покрытия, параметры которого находятся в зависимости от действующих эксплуатационных функций. Это обеспечивает повышение ресурса лопаток компрессора как минимум в два раза.

Применение ФОП позволяет исключить местный износ тела пера лопатки, возникающий из-за неравномерного износа покрытия, и тем самым повысить сохраняемость тела пера лопатки по износу. При применении традиционных покрытий обычно происходит резкий износ покрытия и тела пера лопатки по входной кромке и по поверхности корыта. При применении ФОП обеспечивается возможность кардинального решения вопросов увеличения количества восстановлений лопатки компрессора и значительного повышения их срока службы. ФОП позволяет решать вопросы увеличения числа восстановлений свойств лопаток до 2 ... 4 раз.

Таким образом, ФОП напыляемые на лопатки компрессора на базе принципа ЕПИП существенно повышают технико-экономические параметры их эксплуатации за счет повышения ресурса их работы и увеличения числа возможных восстановлений.

Можно также отметить, что использование принципа ЕПИП в процессе изготовления, восстановления и эксплуатации лопаток компрессора в заданный период T позволяет решать вопрос единовременного полного износа покрытия и в процессе восстановления лопатки не нужно выполнять дополнительное удаление оставшегося покрытия. Это обеспечивает решение вопросов повышения производительности и качества восстановления лопаток компрессора.

На рис. 2.10 представлена модель взаимосвязей между элементами системы «эксплуатация-технологические воздействия-свойства» при реализации принципа

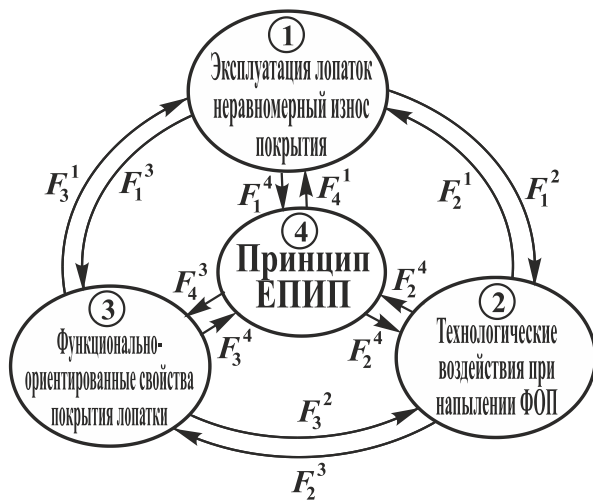


Рисунок 2.10. Модель взаимосвязей между элементами системы «эксплуатация-технологические воздействия-свойства» при реализации принципа ЕПИП

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. 2.10 связаны между собой на базе принципа ЕПИП, показанного позицией 4. Разработанная модель показывает, что реализация принципа ЕПИП при изготовлении или восстановлении лопаток компрессора возможно на базе связей в системе «эксплуатация-технологические воздействия-свойства».

На рис. 2.11 представлена структурная схема выполнения принципа единовременного полного износа ФОП при изготовлении или восстановлении лопаток и их эксплуатации. Здесь показано: на рис. 2.11,а – процесс изготовления лопаток, на рис. 2.11,б – процесс восстановления лопаток. А также буквами показано следующее: V – входной поток, W – выходной поток, $\Pi = \phi$ – обозначает, что покрытия нет (пустое множество).

На рис. 2.11,а показан этап изготовления лопаток с обеспечением ФОС свойств покрытию лопаток компрессора и эксплуатации лопаток с полным износом покрытия ($\Pi = \phi$). При этом процесс формирования покрытия реализуется на базе принципа ЕПИП поэтому в процессе эксплуатации таких лопаток с покрытием происходит за период износа T процесс единовременного полного износа

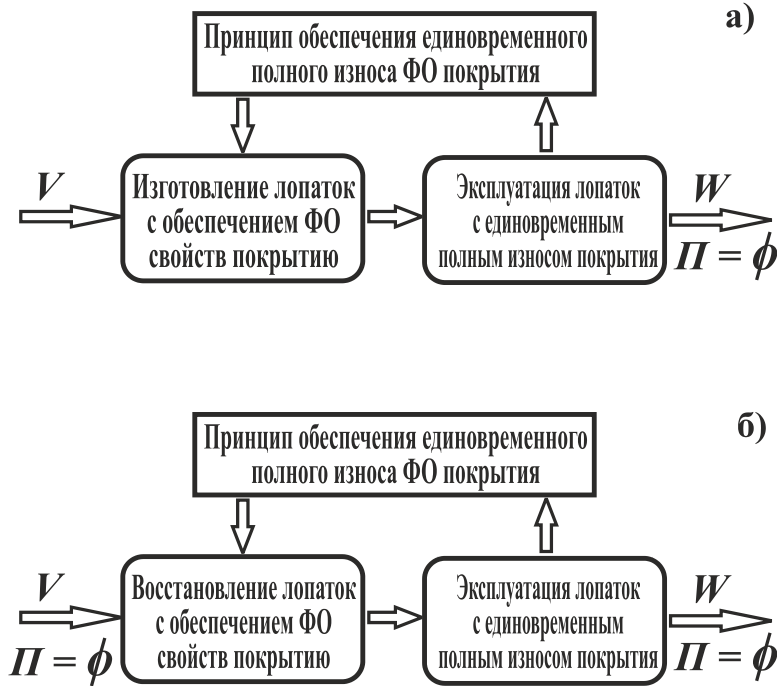


Рисунок 2.11. Структурная схема выполнения принципа единовременного полного износа функционально-ориентированного покрытия при изготовлении или восстановлении лопаток и их эксплуатации: а – процесс изготовления лопаток, б – процесс восстановления лопаток

а) ФОП. Такие же особенности реализуются в процессе восстановления и эксплуатации лопаток, основные характеристики которого приведены на рис. 2.11, б.

б) В случае, когда реализуется полный технологический процесс изготовления, восстановления и эксплуатации лопаток компрессора структура процесса может быть выполнена в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.12. на рис. 2.12 представлена полная структурная схема процессов изготовления – эксплуатации и

восстановления – эксплуатации лопатки на базе принципа ЕПИП. Здесь показаны:

1, 2, ..., n - этапы изготовления и эксплуатации лопаток;

V – вход лопатки в процесс; W – выход лопатки из процесса; ФО – функционально-ориентированные (свойства). На 1-м этапе выполняется процесс изготовления и эксплуатации лопаток, затем на 2-м и последующих этапах - восстановления и эксплуатации лопаток. На каждом из этапов реализуется ФОП и принцип ЕПИП. При этом после завершения каждого из этапов ФОП должно единовременно полностью изнашиваться ($\Pi = \phi$).

На рис. 2.13 представлены структурные варианты технологических процессов изготовления и восстановления лопаток компрессора: на рис. 2.13,а – тради-

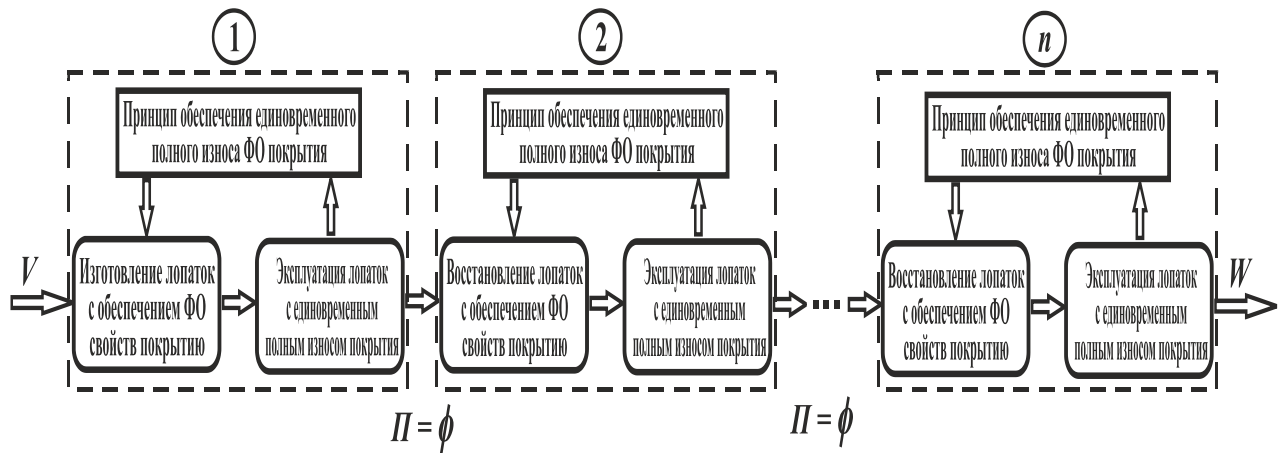


Рисунок 2.12. Полная структурная схема процессов изготовления – эксплуатации и восстановления – эксплуатации лопатки на базе принципа ЕПИП

ционный вариант, на рис. 2.13,б – вариант, использующий на этапе восстановления лопаток ФОП, на рис. 2.13,в – вариант, использующий ФОП на всех этапах изготовления и восстановления лопаток.

Первый структурный вариант технологического процесса изготовления и восстановления лопаток компрессора (рис. 2.13,а) – это традиционный вариант. Здесь, на позиции 1 технологического процесса для пера лопатки реализуется равнотолщинное покрытие (РП), на позиции 2 из-за особенностей эксплуатации лопатки происходит неравномерный износ покрытия (НИП), при этом происходит противоречие – проблема (Пр) между нанесенным РП и НИП, так как на входе покрытие равнотолщинное, а процесс износа происходит неравномерный, при этом на функциональных элементах пера лопатки остается неравномерное покрытие (ОСП) $P \neq \phi$. Поэтому на операции 4 выполняется опорное полирование (ОП) оставшегося покрытия, которое имеет полный износ в зонах входной, выходной и периферийной кромках и на поверхности корыта пера лопатки. После операции полного удаления оставшегося покрытия на операции 4 покрытие с функциональных элементов полностью удаляется $P = \phi$. На этапе восстановления – эксплуатации повторяются те же проблемы, поэтому после эксплуатации лопаток необходимо каждый раз удалять оставшееся покрытие. При этом обычно наносимые по-

крытия имеют высокие параметры физико-механических свойств и их очень сложно удалять с поверхности пера лопатки. Наиболее перспективно этот процесс

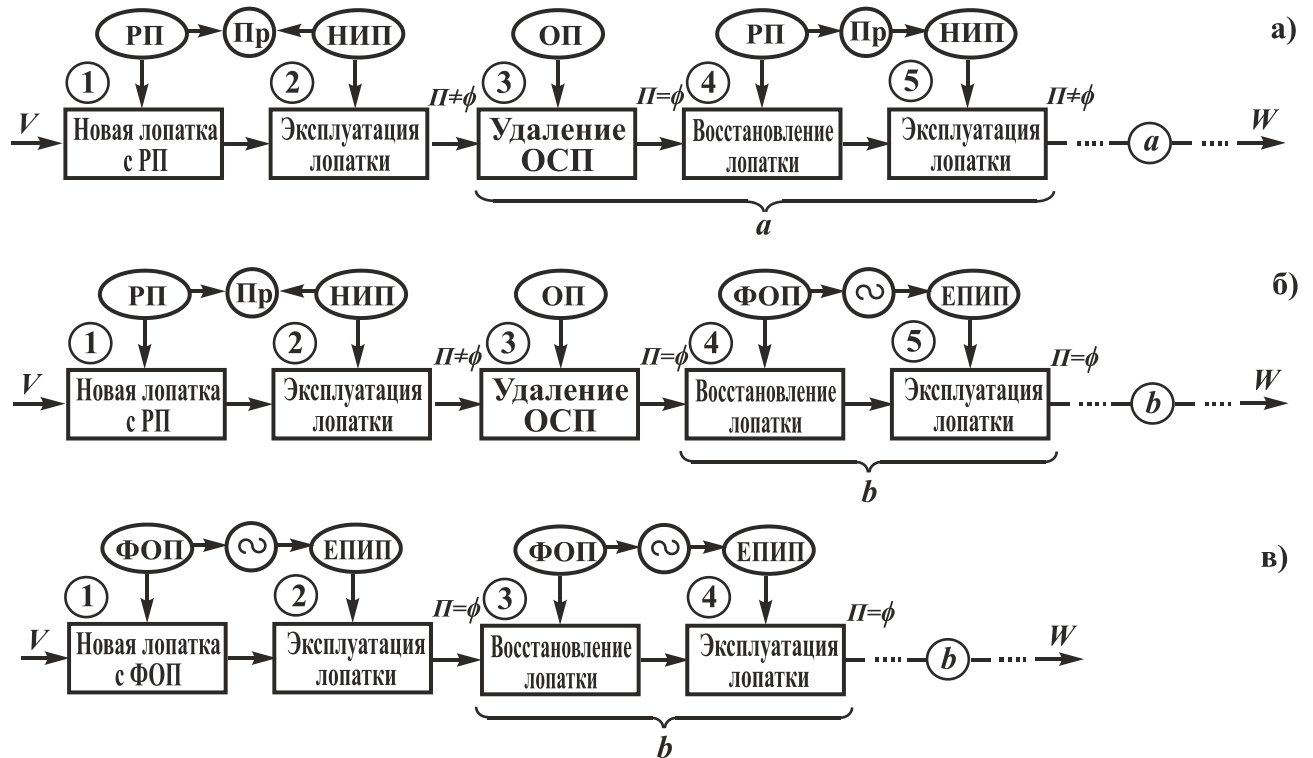


Рисунок 2.13. Структурные варианты технологических процессов изготовления и восстановления лопаток компрессора:

а – традиционный вариант, б – вариант, использующий на этапе восстановления лопаток ФОП, в – вариант, использующий ФОП на всех этапах изготовления и восстановления лопаток.

РП – равнотолщинное покрытие, НИП – неравномерный износ покрытия, Пр – проблема, ОП – опорное полирование, ОСП – оставшееся покрытие, $\Pi \neq \phi$ – имеется остаточное покрытие, $\Pi = \phi$ – покрытие отсутствует, \odot – знак бинарного соответствия.

выполнять на базе опорного полирования (ОП) [91, 92, 93].

Во втором структурном варианте технологического процесса, представленного на рис. 2.13,б, позиции операций 1, 2 и 3 аналогичны позициям рис. 2.13,а. На операции 4 выполняется процесс восстановления пера лопатки с нанесением ФОП, свойства которого выполнены в соответствии с особенностями действия эксплуатационными функциями и происходящим износом покрытия на позиции

4. В этом случае происходит единовременный полный износ покрытия за временной период T на базе принципа ЕПИП. При этом существует бинарное соответствие между свойствами ФОП и ЕПИП, поэтому по истечению периода T происходит единовременный полный износ покрытия. При последующих процессах восстановления лопаток подобные процессы могут неоднократно повторяться. Представленная структура технологического процесса (рис. 2.13,б) является более рациональной по сравнению с предыдущей структурой за счет возможности увеличенного количества восстановлений лопаток компрессора.

Структурная схема технологического процесса, представленная на рис. 2.13,в, является более перспективной по сравнению с предыдущими структурами, так как с самого начала реализуется ФОП и ЕПИП. Это позволяет увеличить количество восстановлений лопаток компрессора и в целом повысить их ресурс при эксплуатации.

На рис. 2.14 представлены основные этапы и операции отделочной обработки или восстановления лопатки компрессора. Здесь показано, что технологический процесс отделочной обработки или восстановления пера лопатки следует выполнять в три этапа:

- 1-й этап – обработка пера лопатки до напыления покрытий;
- 2-й этап – процесс напыления покрытий на функциональные элементы (ФЭ) пера лопатки;
- 3-й этап – обработка функциональных элементов пера лопатки после напыления покрытий.

Можно отметить, что на 1-м этапе технологического процесса при обработке пера лопатки до напыления покрытий могут выполняться следующие подэтапы:

- удаление оставшегося покрытия (химическое разрыхление и травление покрытий, опорное полирование оставшегося покрытия);
- отделочная обработка функциональных элементов пера лопатки (предварительное и окончательное полирование).

На 2-м этапе технологического процесса выполняется напыление покрытий на функциональные элементы (ФЭ) пера лопатки. Здесь могут напыляться тради-



Рисунок 2.14. Основные этапы и операции отделочной обработки или восстановления лопатки компрессора

ционные покрытия (равнотолщинные с постоянными свойствами по поверхности пера лопатки) или ФОП. Традиционные покрытия могут реализовываться однослойными или многослойными, а ФОП – многовариантные покрытия, число которых может быть достаточно большого количества мощностью s .

3-й этап технологического процесса характеризуется тем, что он может выполняться без обработки и с обработкой. При этом дополнительная обработка может реализовываться посредством предварительного и окончательного глянце-вания покрытия пера лопатки.

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать общий подход обработки и восстановления функциональных элементов пера лопатки на основе ФОП, обеспечивающих ЕПИП в период эксплуатации лопатки T . Это обеспечивает возможность повысить ресурс лопаток до их восстановления и увеличить количество восстановлений. Все это существенно повышает общий ресурс лопаток компрессора при эксплуатации ГТД.

2.4. Классификация ФОП

ФОП, которые можно использовать для лопаток компрессора, классифицированы и представлены на рис. 2.15. Здесь, ФОП сгруппированы следующим образом:

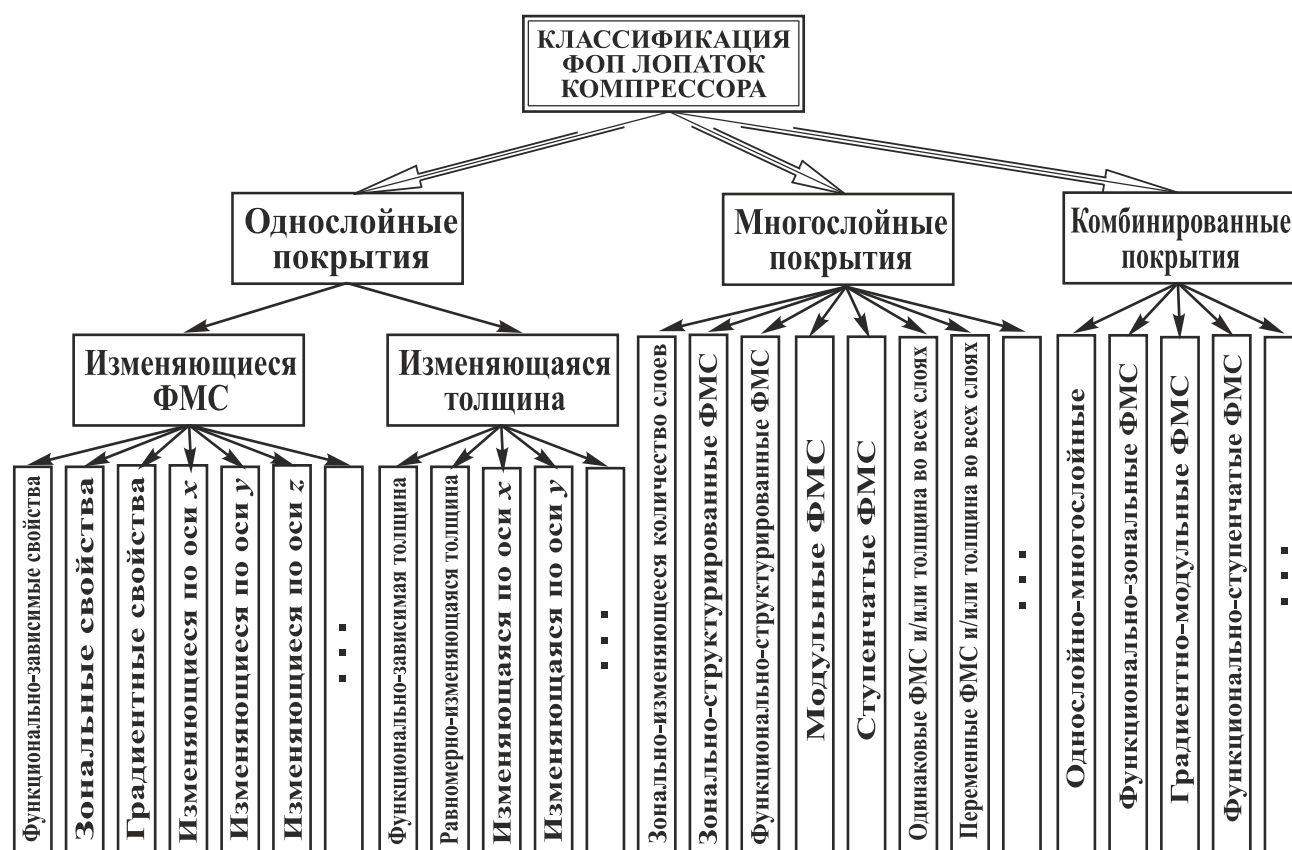


Рисунок 2.15. Классификация ФОП лопаток компрессора

- однослойные покрытия,
- многослойные покрытия,

- комбинированные покрытия.

Однослойные ФОП могут иметь изменяющиеся физико-механические свойства и быть изменяющейся толщины. При этом ФОП с изменяющимися физико-механическими свойствами (ФМС) могут иметь следующие виды свойств:

- функционально-зависимые свойства,
- зональные свойства,
- градиентные свойства,
- изменяющиеся по оси x ,
- изменяющиеся по оси y ,
- изменяющиеся по оси z ,
- другие свойства.

Для выполнения единовременного полного износа покрытия при действии неравномерного его износа на функциональных элементах лопадки компрессора, в ряде случаев, можно применять однослойные покрытия изменяющейся толщины, со следующими параметрами:

- функционально-зависимая толщина,
- равномерно-зависимая толщина,
- изменяющиеся по оси x ,
- изменяющиеся по оси y ,
- другие свойства.

Для повышения ресурса лопаток компрессора применяют многослойные покрытия, которые могут иметь следующие особенности:

- зонально-изменяющееся количество слоев,
- зонально-структурированные ФМС,
- функционально-структурированные ФМС,
- модульные ФМС,
- ступенчатые ФМС,
- одинаковые ФМС и/или толщина во всех слоях,
- переменные ФМС и/или толщина во всех слоях,
- другие свойства.

В ряде случаев целесообразно применять для лопаток компрессора комбинированные покрытия, имеющие следующие особенности:

- однослойно-многослойные покрытия,

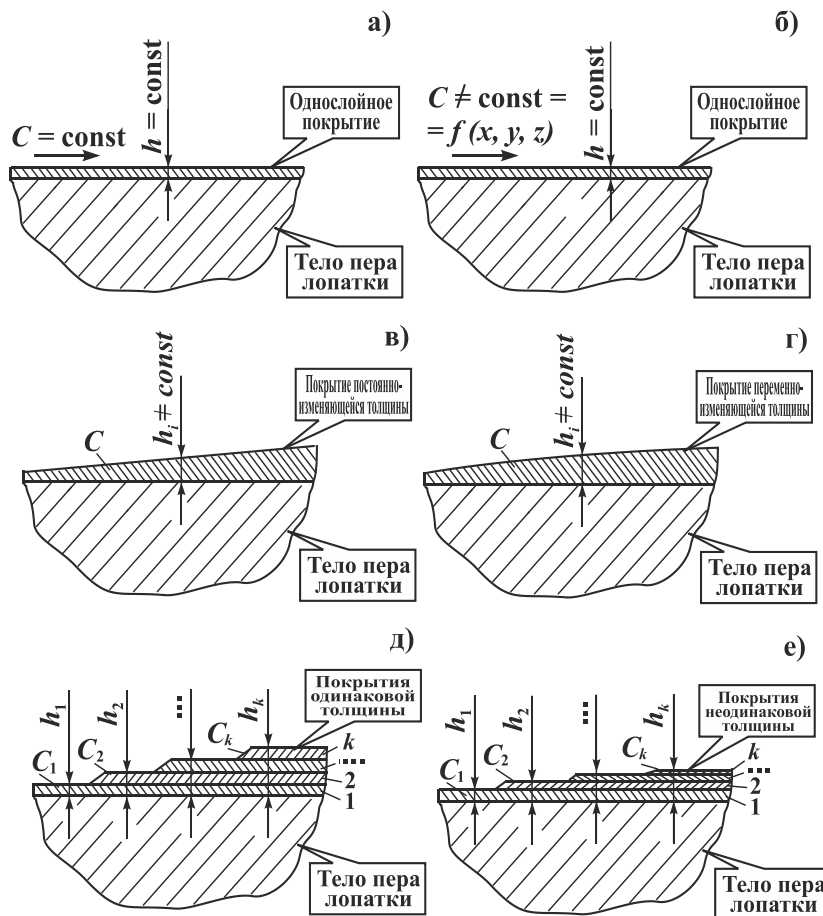


Рисунок 2.16. Варианты ФОП лопаток:

а – однослойное покрытие постоянной толщины и свойств; б - однослойное покрытие постоянной толщины и переменными свойствами; в - однослойное покрытие переменнo-изменяющейся толщины и постоянными свойствами; г - однослойное покрытие постоянно-изменяющейся толщины и постоянными свойствами; д – зонально-многослойное покрытие со слоями одинаковой толщины; е - зонально-многослойное покрытие со слоями неодинаковой толщины

- функционально-зональные ФМС,
 - градиентно-модульные ФМС,
 - функционально-ступенчатые ФМС,
 - другие свойства.

На рис. 2.16 представлены некоторые варианты ФОП лопаток: рис. 2.16,а – однослойное покрытие постоянной толщины и свойств; рис. 2.16,б - однослойное покрытие постоянной толщины и переменными свойствами; рис. 2.16,в - однослойное покрытие переменнo-изменяющейся толщины и постоянными свойствами; рис. 2.16,г - однослойное покрытие постоянно-изменяющейся толщины и постоянными свойствами; рис. 2.16,д – зонально-многослойное покрытие со слоями одинаковой толщины; рис. 2.16,е - зонально-

многослойное покрытие со слоями неодинаковой толщины.

ФОП лопаток компрессора могут реализовываться на базе вакуумных ионно-плазменных покрытий. Вакуумные ионно-плазменные покрытия [21] пера лопатки являются эффективными и относительно простыми для реализации. Они могут осуществляться на специальных установках, работа которых основана на процессах испарения генерируемого материала катодным пятном вакуумной дуги методом конденсации в вакууме на поверхность пера лопатки из плазменной фазы с ионной бомбардировкой – метод КИБ. Этот метод дает возможность наносить высокопрочные и износостойкие покрытия на поверхность пера лопатки и обеспечивать заданные эксплуатационные свойства [101].

Метод КИБ основан на том что плазменный поток металла образующийся с помощью вакуумной дуги с холодным катодом ускоряется путем приложения отрицательного потенциала к изделию с последующей конденсацией на нем ионов и нейтральных атомов при одновременном прохождении плазмо-химических реакций их с реактивным газом. Подавая в вакуумную камеру газ-реагент во время электродугового испарения тугоплавкого металла, можно получить покрытия на основе нитридов, карбидов и других соединений металлов IV – VI групп Периодической системы элементов [101].

Важной особенностью данного метода является возможность проведения эффективной ионной очистки поверхности изделия путем интенсивной бомбардировки ее ускоренными ионами распыленного вещества, что создает условия для высокой адгезии покрытия к подложке [101].

На рис. 2.17 представлены гипотетические структурные варианты вакуумных ионно-плазменных покрытий. Здесь показано: рис. 2.17,а – однослойное покрытие типа единовременно-единовременное непрерывное (*ЕЕН*), рис. 2.17,б – многослойное покрытие типа единовременно-единовременное прерывное (*ЕЕП*).

Однослойные покрытия (рис. 2.17, а) могут формироваться на базе одного или нескольких материалов или их композиций. В этом случае, по высоте покрытия свойства наносимого покрытия одинаковые и оно формируется непрерывно. Эти покрытия в направлении s и t по поверхности лопатки компрессора форми-

руются одновременно-одновременно (*ЕЕ*). В направлении v покрытие формируется непрерывно (*Н*). Поэтому в целом однослойное покрытие можно обозначить как тип *ЕЕН*. Математическая структурно-функциональная символьная модель этого покрытия может быть представлена следующим выражением [55, 69, 79, 87, 95, 97]:

$$V_o \rightarrow \bigwedge_{v=1}^{\infty} \left\{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v) \right\}, \quad (2.1)$$

где V_o - обозначение однослойного покрытия типа *ЕЕН*;

$(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v})$ - кортеж параметров технологических воздействий материального, энергетического и информационного характеров;

$(dl_s \times dl_t \times dl_v)$ - декартово произведение в s -м, t -м и v -м направлении или окрестность объемной точки;

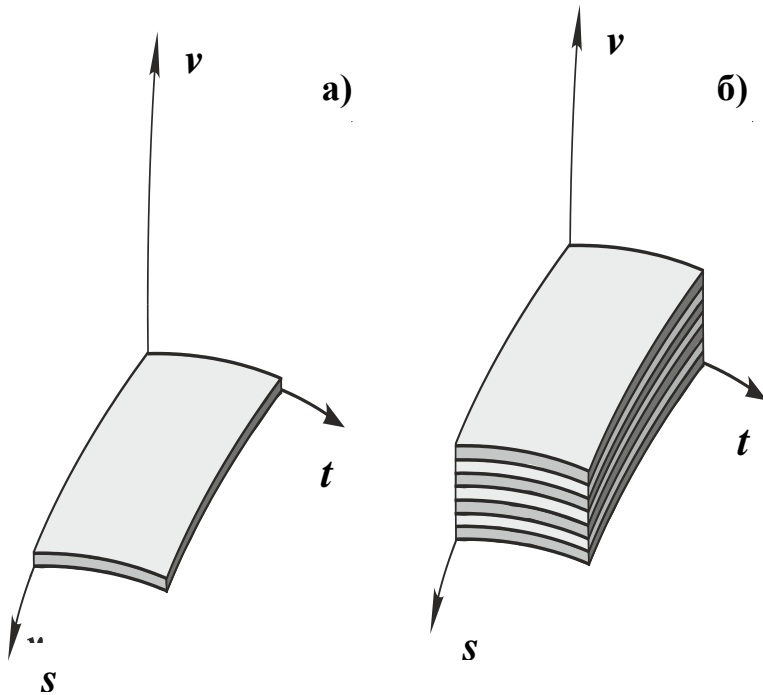


Рисунок 2.17. Гипотетические структурные варианты вакуумных ионно-плазменных покрытий: а – однослойное покрытие типа *ЕЕН*; б – многослойное покрытие типа *ЕЕП*

значить как тип *ЕЕП*. Математическая структурно-функциональная символьная модель этого покрытия может быть представлена следующим выражением [87, 95, 97]:

\wedge - предикат алгебры логики (конъюнкция) или обозначение непрерывности процесса напыления покрытия в направлении v .

Многослойные покрытия (рис. 2.17,б) формируются слоями. При этом в каждом слое в направлении s и t по поверхности пера лопатки формируются одновременно (*ЕЕ*). В направлении v покрытие формируется прерывисто (*П*). Поэтому в целом данное многослойное покрытие можно обо-

$$V_m \rightarrow \bigvee_{v=1}^n \left\{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v) \right\}, \quad (2.2)$$

где V_m - обозначение многослойного покрытия типа *ЕЕП*;

n - число слоев различных покрытий;

\vee - предикат алгебры логики (дизъюнкция) или обозначение прерывистости процесса напыления покрытия в направлении v .

Следует отметить, что толщина каждого слоя многослойного покрытия в общем случае может быть различной и зависеть от функциональных особенностей данного покрытия.

Приведенные математические структурно-функциональные символьные модели однослойных и многослойных покрытий пера лопатки позволяет выполнять синтез заданных или требуемых свойств изделий. Отметим, что 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. Этот подход позволяет отыскивать новые нетрадиционные свойства покрытий в зонах, не лежащих на виду.

Таким образом, ФОП лопаток компрессора могут реализовываться в соответствии с представленной классификационной схемой (рис. 2.15), при этом наиболее перспективным методом нанесения является метод КИБ (конденсации и ионной бомбардировки) на базе вакуумных ионно-плазменных покрытий.

2.5. Особенности обеспечения ФОС поверхности пера лопатки компрессора на базе ФОП

Для повышения общего ресурса лопатки компрессора за счет увеличения ее ресурса до восстановления и количества ее восстановлений применяют ФОП. ФОП лопатки реализуются на базе группы особых принципов ориентации свойств покрытий, которые приведены в работах [86, 92] и приложении 1.

Можно отметить, что на базе этого принципа ориентации реализуется процесс обеспечения необходимой совокупности свойств пера лопатки в окрестностях функциональных зон и элементов, его полной адаптации при изготовлении к особенностям эксплуатации и обеспечения максимального потенциала свойств пера лопатки.

Рассмотрим более детально основные особенности обеспечения ФОС по-

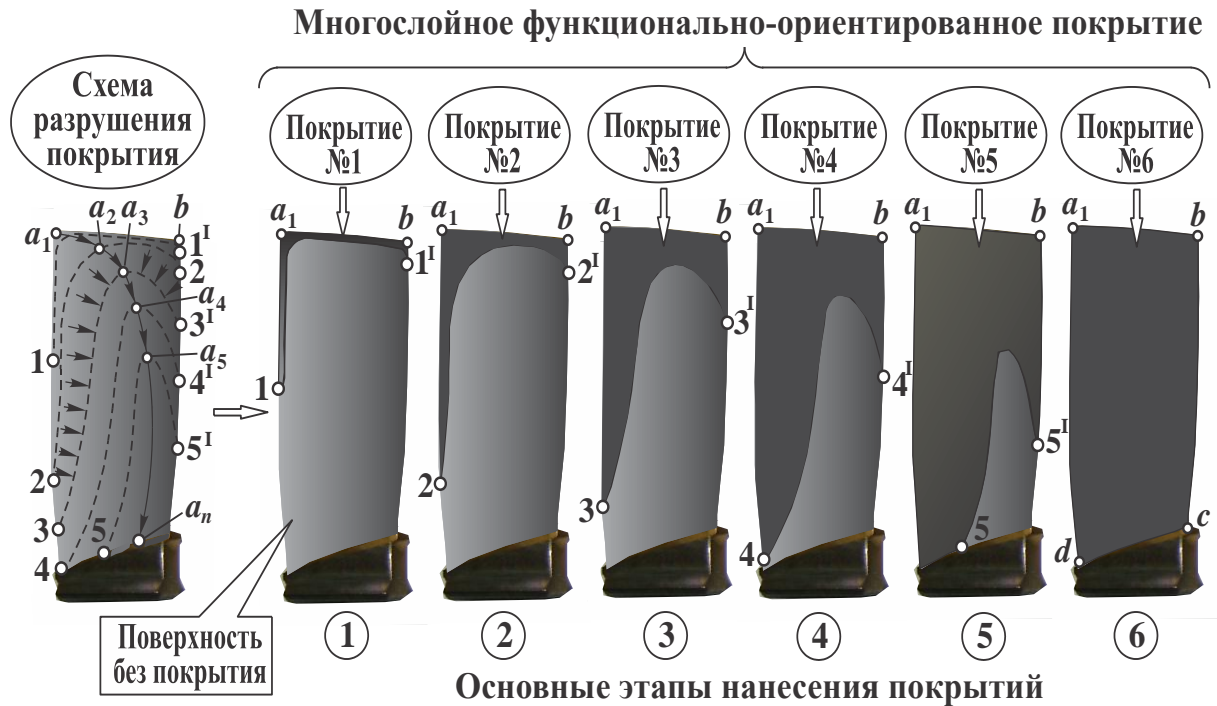


Рисунок 2.18. Схема формирования многослойного функционально-ориентированного покрытия

крытиям лопаток компрессора ГТД ТВ3-117.

На рис. 2.18 представлена схема разрушения оставшегося и последовательного формирования многослойного ФОП на 6-ти этапах – по одному на каждом. На схеме разрушения старого покрытия показана зона начала полного разрушения покрытия $1-a_1-b-1^I$, которая последовательно распространяется до зоны $2-1-a_1-b-1^I-2^I-a_2$, затем до зоны $3-2-1-a_1-b-1^I-2^I-3^I-a_3$ и так далее до зоны $5-4-3-2-1-a_1-b-1^I-2^I-3^I-4^I-5^I-a_n$. В соответствии с этими особенностями разрушения покрытия при эксплуатации лопатки в работе предлагается последовательно формировать многослойное покрытие с топологической ориентацией каждого слоя покрытия на по-

верхности пера лопатки, в соответствии с особым принципом ориентации покрытия (П1.2).

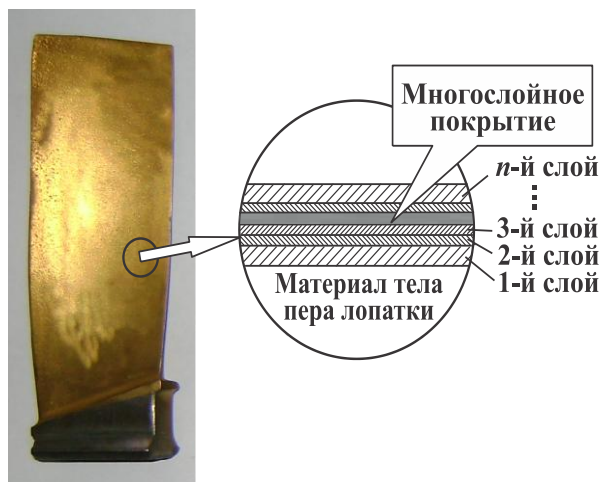


Рисунок 2.19. Схема построения структуры многослойного покрытия

Таким образом, многослойное покрытие (рис. 2.19) формируется в результате последовательного нанесения однослойных покрытий на каждом этапе с учетом выражения 1 топологической ориентации покрытия каждого слоя (рис. 2.18). Здесь, наносится покрытие №1 с топологической ориентацией его на поверхности в соответствии со схемой износа, затем покрытие №2, далее покрытие №3 и так далее, в конце наносится покрытие на все

поверхности пера лопатки. В этом случае, свойства каждого покрытия может определяться в соответствии с выражением (П1.1).

Многослойные покрытия, сформированные в соответствии с выражениями (2.1) и (2.2) обладают свойствами единовременного полного износа в заданный период эксплуатации лопаток компрессора ГТД. Это позволяет в длительный период времени исключить возможность разрушения основного материала пера лопатки и одновременно повысить технико-экономические показатели их восстановления. Сформированное подобным образом покрытие, на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств поверхности лопатки (приложение 1) и принципа ЕПИП, назовем ФОП.

Ионно-плазменные покрытия пера лопатки может реализовываться следующих вариантов [162, 164, 183, 190]:

- в зависимости от применяемого материала: одноэлементные и многоэлементные, многокомпонентные и композиционные;
- в зависимости от количества слоев: однослойные и многослойные;
- в зависимости от вида покрытий: традиционные и ФОП;

- ФОП могут иметь следующие свойства: функционально-зависимые, функционально независимые, специальные свойства, другие свойства.

Значение толщины, геометрические параметры, топография, структура и свойства покрытия поверхностей и элементов лопатки должны определяться из условия его одновременного полного коррозионно-эрозионного разрушения в любой точке пера лопатки или в зависимости от действия эксплуатационных функций. В целом ФОС покрытий лопаток должны формироваться в зависимости от особенностей эксплуатации лопатки и коррозионно-эрозионных разрушений покрытия в каждой точке пера.

Приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств пера лопатки дают технологам ключ для научно обоснованного обеспечения заданного, требуемого или предельного потенциала возможностей изделия при эксплуатации в машине или технологической системе.

Таким образом, приведенные принципы (приложение 1) и принцип ЕПИП на пере лопатки дают возможность решать вопросы полной ориентации технологических воздействий и свойств покрытия пера лопатки компрессора при реализации ФОС покрытия в зависимости от особенностей ее эксплуатации. А это позволяет обеспечивать качественно новую совокупность свойств и меру полезности лопаток компрессора.

2.6. Деление лопаток компрессора ГТД на функциональные элементы

При реализации функционально-ориентированных технологий, технологические воздействия орудий и средств обработки на лопатку компрессора выполняются на местных уровнях. Для обеспечения процесса ориентации технологических воздействий и обеспечения заданных свойств лопатки компрессора, предварительно выполняется ее деление по следующим иерархическим уровням [86, 89]:

1. Уровень всей лопатки, как изделия в целом ($\Phi И$).
2. Уровень функциональных частей ($\Phi Ч$).
3. Уровень функциональных составляющих ($\Phi С$).
4. Уровень функциональных зон ($\Phi З$).
5. Уровень макрозон ($\Phi ЗМ$).
6. Уровень микрозон ($\Phi Зм$).
7. Уровень нанозон ($\Phi Зн$).

Можно отметить, что в целом каждый уровень иерархической структуры деления лопатки можно характеризовать функциональными элементами данного уровня $f_j = \{f_{j1}, f_{j2}, f_{j3}, \dots, f_{jv_j}\}$, где f_j - множество функциональных элементов j -го уровня глубины технологии; f_{js_j} - функциональный элемент j -го уровня иерархической структуры деления; v_j - мощность множества f_j j -го уровня деления.

Если рассматривать одно конкретное изделие, следует иметь в виду, что для конкретного функционального элемента j -го уровня деления необходимо выполнять его декомпозицию на множество функциональных элементов $(j+1)$ -го уровня. На рис. 2.20,а представлена схема декомпозиции функционального элемента j -го уровня глубины технологии на множество функциональных элементов $(j+1)$ -го уровня, а именно $f_{jz_j} = \{f_{(j+1)1}, f_{(j+1)2}, f_{(j+1)3}, \dots, f_{(j+1)Z_{(j+1)}}\}$. Здесь: f_{jz_j} - функциональный элемент j -го уровня деления лопатки; $f_{(j+1)z_{(j+1)}}$ - любой $z_{(j+1)}$ -й функциональный элемент $(j+1)$ -го уровня деления лопатки; $Z_{(j+1)}$ - мощность

множества f_{jz_j} (количество функциональных элементов на $(j+1)$ -м уровне лопатки).

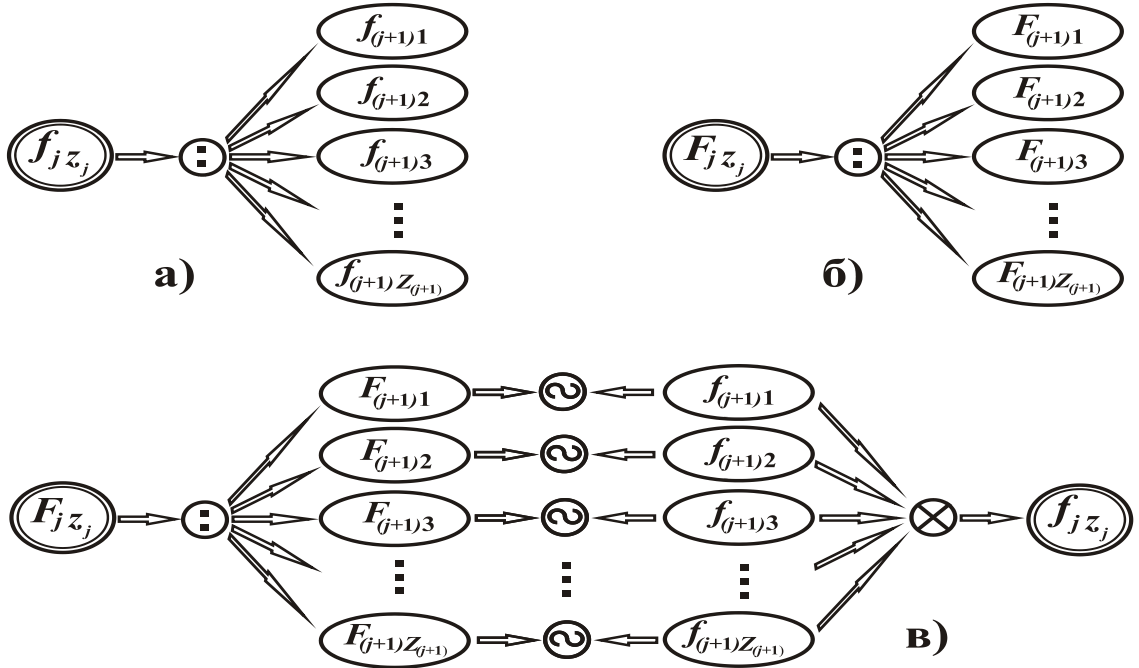


Рисунок 2.20. Схемы декомпозиции и синтеза функциональных элементов (ФЭ) и функций: а – схема декомпозиции функционального элемента j -го уровня глубины технологии на множество ФЭ $(j+1)$ -го уровня; б - схема декомпозиции сложной функции j -го уровня глубины технологии на множество функций $(j+1)$ -го уровня; в – схема синтеза ФЭ лопатки на базе сложной функции. \vdots - знак декомпозиции, \otimes - знак композиции, \approx - знак бинарного соответствия

Аналогично можно выполнять декомпозицию сложной функции j -го уровня деления на множество функций $(j+1)$ -го уровня. На рис. 2.20,б показана схема декомпозиции сложной функции j -го уровня глубины технологии на множество функций $(j+1)$ -го уровня $F_{jz_j} = \{F_{(j+1)1}, F_{(j+1)2}, F_{(j+1)3}, \dots, F_{(j+1)Z_{(j+1)}}\}$. Здесь: F_{jz_j} - сложная функция j -го уровня деления лопатки; $F_{(j+1)z_{(j+1)}}$ - любая $z_{(j+1)}$ -я функция $(j+1)$ -го уровня деления лопатки; $Z_{(j+1)}$ - мощность множества F_{jz_j} (количество функций на $(j+1)$ -м уровне лопатки).

Можно отметить, что на базе схемы синтеза функциональных элементов лопатки на базе сложной функции, представленной на рис. 2.20,в, можно выполнять синтез элементов лопатки с необходимыми свойствами на базе операции декомпозиции сложной функции F_{jz_j} на множество функций $F_{jz_j} = \{F_{(j+1)1}, F_{(j+1)2}, F_{(j+1)3}, \dots, F_{(j+1)Z_{(j+1)}}\}$, реализации операции бинарного соответствия элементарной функции $F_{(j+1)z_{(j+1)}}$ и унифицированной структуры функционального элемента $f_{(j+1)z_{(j+1)}}$, а также композиции функционального элемента j -го уровня из множества функциональных элементов $(j+1)$ -го уровня $f_{jz_j} = \{f_{(j+1)1}, f_{(j+1)2}, f_{(j+1)3}, \dots, f_{(j+1)Z_{(j+1)}}\}$.

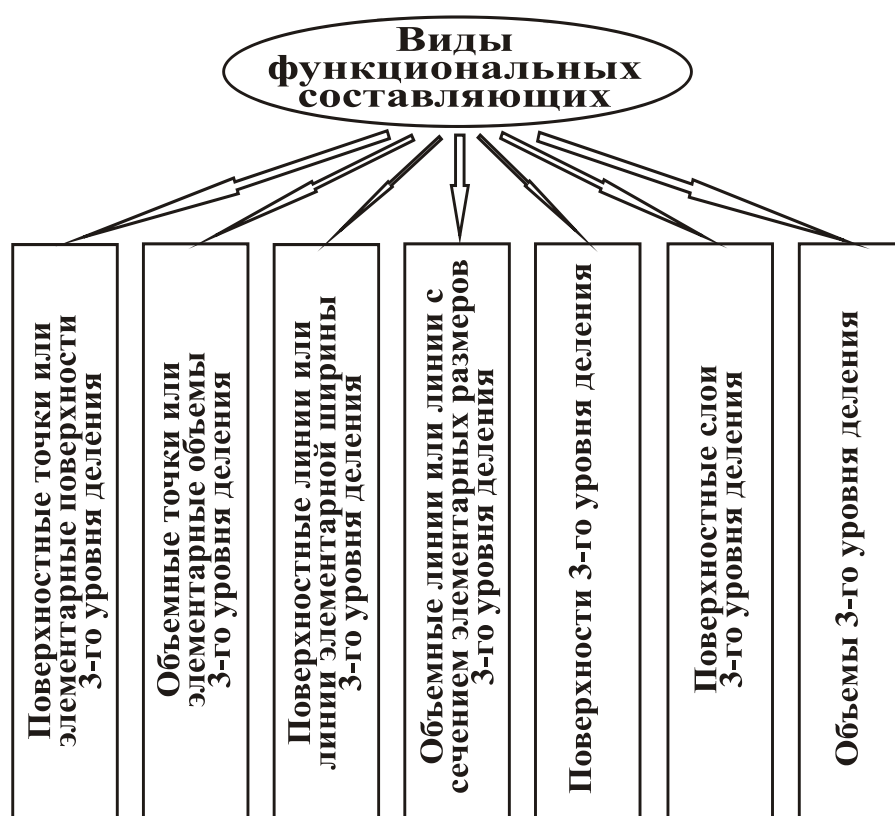


Рисунок 2.21. Виды функциональных составляющих лопатки

Следует заметить, что функциональные (исполнительные) составляющие 3-го уровня деления могут быть семи видов (рис. 2.21):

1. Поверхностные точки или элементарные поверхности 3-го уровня деления, размеры которых определяются эксплуатационными параметрами лопатки.
2. Объемные точки или элементарные объемы 3-го уровня деления, размеры которых определяются эксплуатационными параметрами лопатки.
3. Поверхностные линии или линии элементарной ширины 3-го уровня деления, ширина которых определяется эксплуатационными параметрами лопатки.

4. Объемные линии или линии с сечением элементарных размеров 3-го уровня деления, размеры сечения которых, определяются эксплуатационными параметрами лопатки.

5. Поверхности 3-го уровня деления [168, 169, 173].

6. Поверхностные слои 3-го уровня деления, толщина слоев которых определяется эксплуатационными параметрами лопатки [174, 175, 177].

7. Объемы 3-го уровня деления [178, 179, 180].

На рис 2.22 представлен граф эксплуатационных функций [163] лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя по уровням деления. Здесь, общая эксплуатационная функция лопатки направляющего аппарата делится по 4-м уровням.

Общая эксплуатационная функция лопатки направляющего аппарата на 2-м уровне делится на три составляющие:

- эксплуатационная функция пера лопатки и связей пера с буртиком;
- эксплуатационная функция буртика лопатки и связей буртика с цапфой;
- эксплуатационная функция цапфы лопатки и связей цапфы с диском.

Можно отметить, что каждая из этих трех функции на 2-м уровне подразделяется на две подфункции. При этом эксплуатационная функция пера лопатки и связей пера с буртиком делится следующим образом:

- основная и обеспечивающая функции пера лопатки (f_1);
- основная и обеспечивающая функции переходной части пера лопатки (f_2).

Эксплуатационная функция буртика лопатки и связей буртика с цапфой делится на следующие подфункции:

- основная и обеспечивающая функции буртика пера лопатки (f_3);
- основная и обеспечивающая функции переходной части буртика пера лопатки (f_4).

Следует отметить, что эксплуатационная функция цапфы лопатки и связей цапфы с диском представляет собой основную и обеспечивающую функцию цапфы лопатки, а также функции, действующие от связей цапфы с диском (f_5).

На 3-м уровне каждую из этих подфункций можно разделить на множество подфункций более низкого уровня сложности. Например, подфункция основная и обеспечивающая функции пера лопатки может быть разделена следующим образом:

- обеспечивающие заданные аэродинамические свойства;
- переменные удельные контактные нагрузки, износ и разрушения поверхностного слоя;
- переменные изгибающие напряжения и температурные напряжения.

В качестве следующего примера (рис. 2.22) можно рассмотреть основную и обеспечивающую функцию переходной части пера лопатки, которую можно подразделить следующим образом:

- переменные изгибающие напряжения и температурные нагрузки;
- концентраторы напряжений и переменные напряжения;
- заданные аэродинамические свойства и свойства снижающие концентрацию напряжений.

Далее, каждая подфункция 3-го уровня может быть разделена на функции, которые реализуются поверхностями, поверхностными слоями и объемами.

На 4-м уровне графа эксплуатационных функций лопатки направляющего аппарата (рис. 2.22) могут быть рассмотрены элементарные функции, действующие зонально на функциональные элементы.

После выполнения анализа действия эксплуатационных функций, действующих на лопатку направляющего аппарата ГТД, выполняется деление лопатки на функциональные элементы и составляется их структура.

На рис 2.23 представлен граф функциональных элементов лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя по уровням деления. Здесь, на 3-м уровне деления функциональных элементов введены следующие обозначения: $П_i$ - i -я поверхность, $ПС_j$ - j -й поверхностный слой, $О$ - объемный функциональ-

ный элемент. На 4-м уровне деления функциональных элементов, представлены зональные элементы, которые обозначены Z_k .

На третьем этапе синтеза функционально-ориентированной технологии назначаются схемы технологического воздействия, разрабатываются операции и формируется весь технологический процесс изготовления лопатки (ОУО) на базе особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств функциональных элементов в зависимости от особенностей эксплуатации лопатки.

Можно отметить, что при реализации схем технологического воздействия и обеспечении необходимых свойств необходимо учитывать следующее:

- технологические воздействия и заданные свойства лопатки должны реализовываться на местном уровне прецизионно, особо прецизионно и супер прецизионно;
- технологические воздействия и заданные свойства лопатки должны выполняться в зависимости от эксплуатации изделия в машине или технологической системе;
- технологические воздействия и заданные свойства лопатки должны реализовываться по уровням глубины технологии;

Таким образом, предлагаемый процесс деления лопатки на функциональные элементы для функционально-ориентированных технологий имеет существенное отличие от применяемых в настоящее время методов. В настоящее время традиционно принято, что при разработке технологических процессов, лопатка делится на исполнительные поверхности и для них разрабатываются необходимые технологические операции. Поэтому существующие подходы имеют ограничения по возможностям обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств лопатки, а также не позволяют реализовывать качественно новую совокупность свойств и меру полезности изготавливаемых лопатки.

Представленный процесс деления лопатки по уровням глубины технологий дает возможность технологу прецизионно, особо прецизионно и супер прецизионно реализовывать необходимые технологические воздействия орудий и средств

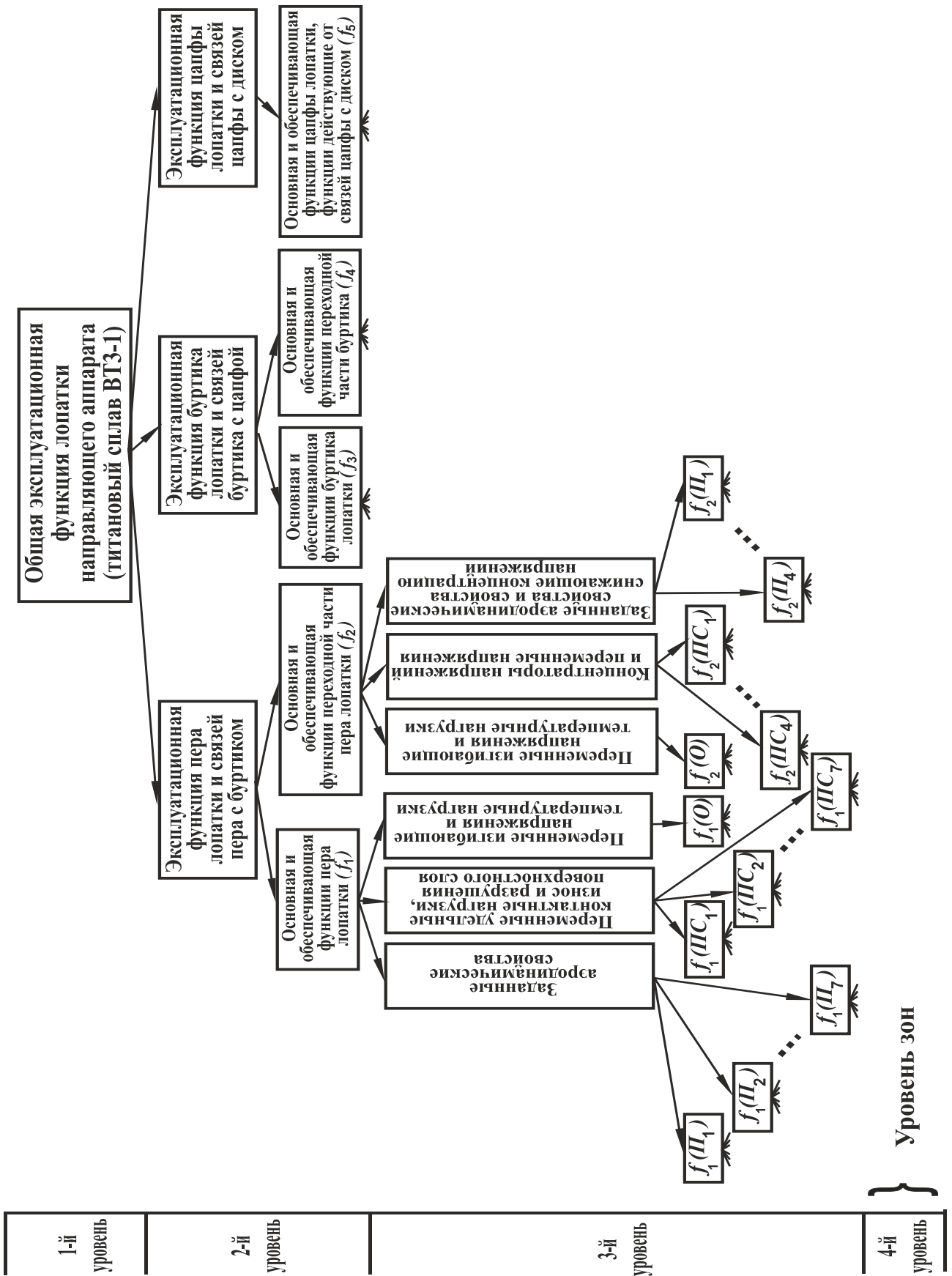


Рисунок 2.22. Граф эксплуатационных функций лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя по уровням деления

Рисунок 2.23. Граф функциональных элементов лопатки направляющего аппарата газотурбинного двигателя по уровням деления

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 ее эксплуатации в ГТД.

2.7. Методика и алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД

Стратегически методику синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД можно рассматривать на основании рис. 2.24. Здесь (рис. 2.24), можно выделить следующие элементы:

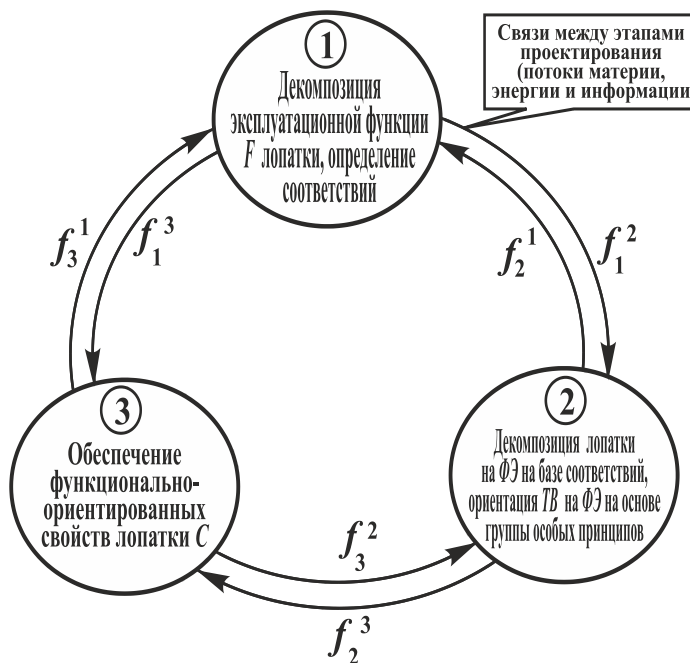


Рисунок 2.24. Структурная модель системы общего подхода реализации функционально-ориентированного подхода в обеспечении свойств

1. Декомпозиция эксплуатационной функции F лопатки, определение соответствий.

2. Декомпозиция лопатки на функциональные элементы (ФЭ) на базе соответствий, ориентации технологических воздействий $ТВ$ на ФЭ на основе группы особых принципов ориентации.

3. Обеспечение ФОС лопатки компрессора C .

На рис. 2.24 показаны связи f_i^j между элементами системы, которые являются операторами и операндами

в системе общего подхода реализации функционально-ориентированного подхода. Здесь под обозначением i подразумевается оператор, а j - операнд системы.

В основе структурной модели системы общего подхода реализации функционально-ориентированного подхода в обеспечении свойств можно исследовать особенности реализации ФОС лопаток компрессора.

На рис. 2.25 представлена последовательность реализации основных этапов

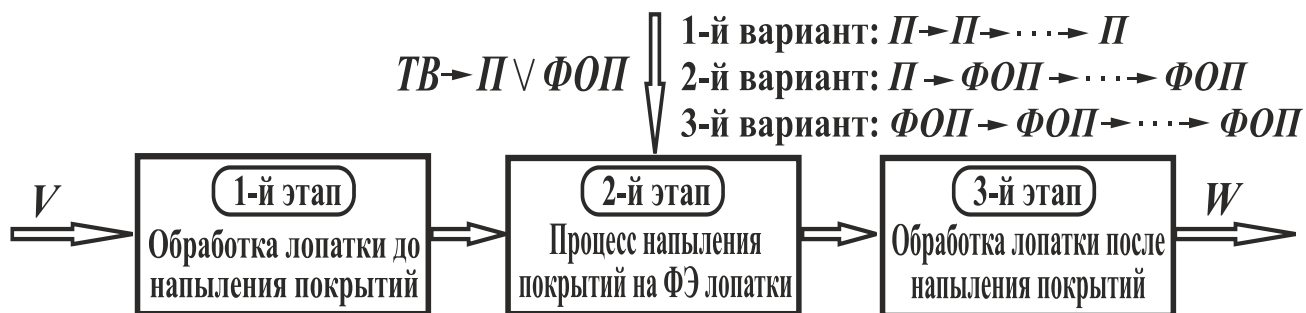


Рисунок 2.25. Последовательность реализации основных этапов ОУО ФЭ лопатки компрессора с напылением покрытий

ОУО ФЭ лопатки компрессора с напылением покрытий. Технологический процесс ОУО лопаток компрессора состоит из следующих этапов:

- 1-й этап – обработка лопатки до напыления покрытия,
- 2-й этап – процесс напыления покрытий на ФЭ лопатки,
- 3-й этап – обработка лопатки после напыления покрытий.

Можно отметить, что на 2-м этапе технологического процесса процесс напыления покрытий может реализовываться двух вариантов:

$$TB \rightarrow P \vee FOP,$$

где TB – технологические воздействия,

P – традиционное покрытие,

FOP – функционально-ориентированное покрытие.

При этом традиционные и FOP могут наноситься со следующими вариантами:

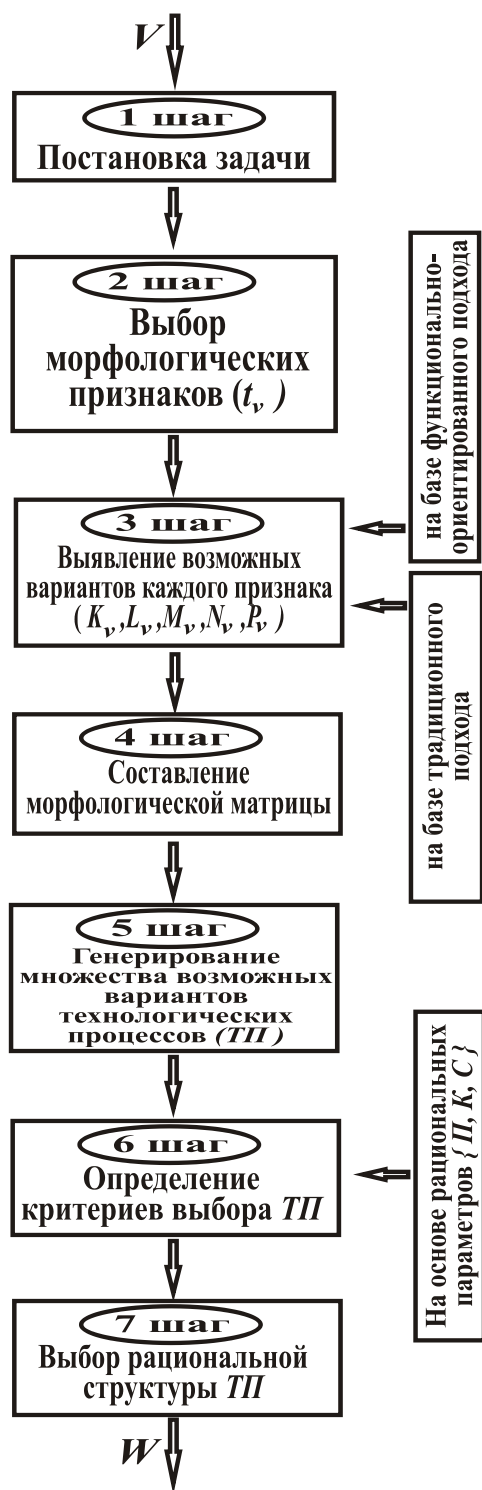


Рисунок 2.26. Основные этапы методики синтеза структуры рационального технологического процесса

1-й вариант: $\Pi \rightarrow \Pi \rightarrow \dots \rightarrow \Pi$,

2-й вариант: $\Pi \rightarrow \Phi \text{ОП} \rightarrow \dots \rightarrow \Phi \text{ОП}$,

3-й вариант: $\Phi \text{ОП} \rightarrow \Phi \text{ОП} \rightarrow \dots \rightarrow \Phi \text{ОП}$.

Процесс синтеза структуры операций технологического процесса ОУО лопаток компрессора основывается на выборе его структуры на множестве технологических операций, в том числе и функционально-ориентированных:

$$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_j, \dots, t_N\}, \quad (2.3)$$

где T - полное множество возможных операций технологического процесса ОУО лопаток компрессора;

t_j - любая элементарная технологическая операция обработки лопатки;

N - общее количество возможных вариантов ОУО лопаток.

Здесь, из полного множества возможных вариантов отделочно-упрочняющих операций, представленного выражением, необходимо выбрать требуемое подмножество операций, из которого будет создан необходимый технологический процесс обработки лопаток компрессора. Этот процесс может быть реализован на основе применения морфологического синтеза технических решений [87, 167].

Процесс морфологического синтеза рациональной структуры технологического процесса ОУО лопаток компрессора состоит из следующих шагов проектирования (рис. 2.26):

1. Постановка задачи.
2. Выбор морфологических признаков t_v (строк) для каждого этапа технологического процесса.
3. Выявление возможных вариантов каждого признака (K_v, L_v, M_v, N_v, P_v) по строкам каждого этапа технологического процесса.
4. Составление морфологической матрицы.
5. Генерирование множество возможных вариантов технологических процессов ($ТП$).
6. Определение критериев выбора технологического процесса.
7. Выбор рациональной структуры технологического процесса.

На рис. 2.26 показано: V - входной поток информации по полному множеству существующих операций обработки лопаток; W - выходной поток информации о структуре технологического процесса обработки лопаток. Здесь, при постановке задачи синтеза, основными параметрами синтеза является выбор структуры технологического процесса по параметрам производительности $П$, качества K и себестоимости обработки лопаток с учетом его свойств C .

Можно отметить, что здесь выбор морфологических признаков t_v выполняется по строкам матрицы. В данной работе осуществляется выявление возможных вариантов каждого признака на основе формирования групп сходных операций по каждой строке мощностями K_v, L_v, M_v, N_v, P_v . Причем с увеличением номера строки повышаются параметры качества дополнительных отделочно-упрочняющих операций обработки лопаток компрессора.

Заметим, что выявление возможных вариантов каждого признака K_m может выполняться следующими методами: на базе функционально-ориентированного подхода; на базе традиционного подхода. При этом морфологическая матрица может иметь различные структуры.

Далее, выполняется определение критериев выбора рационального технологического процесса. В данном случае, в качестве критериев выбора структуры рационального технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора приняты производительность, качество и себестоимость обработки лопатки.

После определения критериев выбора структуры технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток выполняется выбор на полном

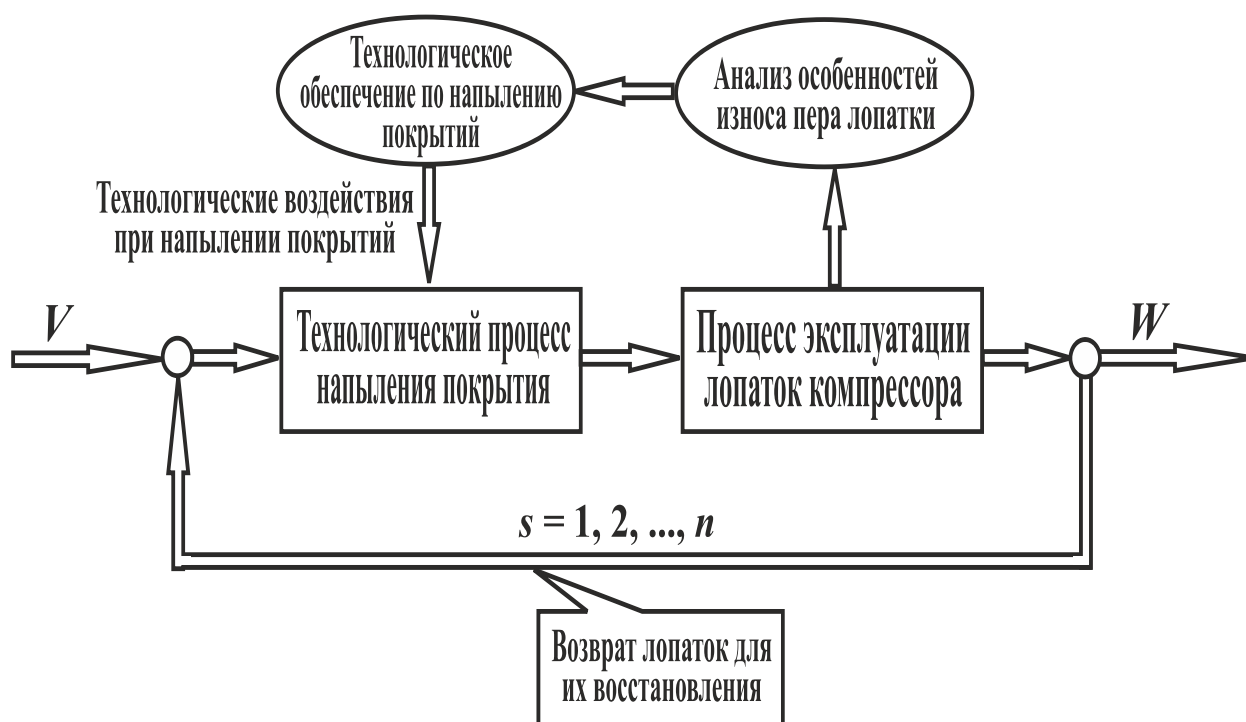


Рисунок 2.27. Структурная схема реализации ФОП на ФЭ на базе анализа особенностей износа пера лопатки

множестве структурных вариантов технологических процессов рационального технологического процесса.

На рис. 2.27 представлена структурная схема реализации ФОП на ФЭ на базе анализа особенностей износа пера лопатки. Здесь показана структурная схема реализации жизненного цикла лопаток компрессора, при этом представлены два этапа:

- технологический процесс реализации ФОП на ФЭ;
- процесс эксплуатации лопаток компрессора.

А также на рис. 2.27 показаны: V - входной поток поступления новых лопаток; W - выходной поток изношенных лопаток компрессора; $s=1, 2, 3, \dots, n$ – обратные циклы возврата лопаток компрессора для их восстановления свойств на этапе технологического процесса. Здесь также показаны циклы технологических воздействий потоков материи, энергии и информации при реализации технологического процесса нанесения ФОП. В этом случае процесс реализации покрытий выполняется посредством технологического обеспечения по напылению покрытий. Причем процесс реализации технологических воздействий выполняется на основе анализа износа пера лопатки компрессора, который определяется на этапе эксплуатации.

На рис. 2.28 представлен алгоритм реализации функционально-ориентированного технологического процесса. Этот алгоритм строится на основе структурной схемы, представленной на рис. 2.27. В этом случае технологический процесс реализации функционально-ориентированного технологического процесса представлен в развернутом виде и состоит из трех этапов:

- 1-й этап – обработка лопатки до напыления покрытий на поверхности пера лопатки;
- 2-й этап – процесс напыления покрытий на ФЭ пера лопатки;
- 3-й этап – обработка лопатки после напыления покрытий

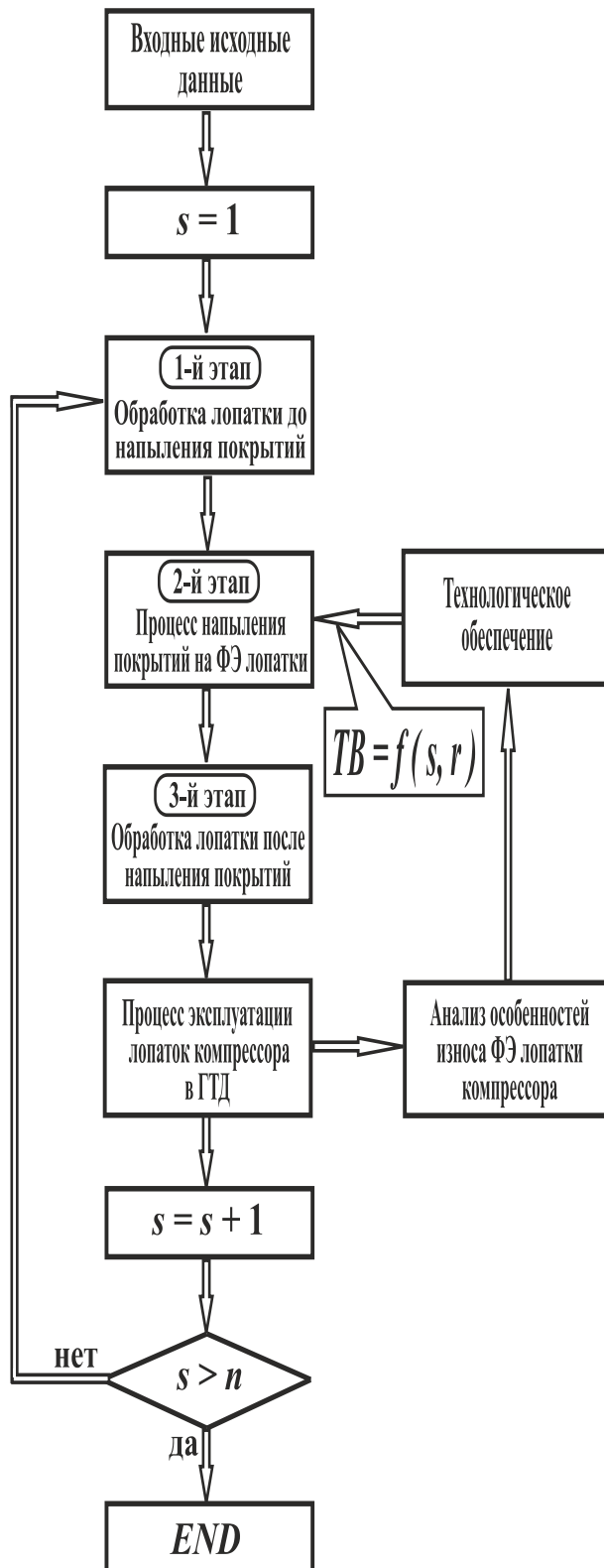


Рисунок 2.28. Алгоритм реализации функционально-ориентированного технологического процесса

На базе представленного алгоритма (рис. 2.28) можно выполнять процессы восстановления лопаток компрессора с функционально-ориентированными и традиционными покрытиями. Возвратный путь слева показывает возврат лопатки при восстановлении после этапа эксплуатации. Технологические воздействия, которые реализуются технологическим обеспечением, в процессе напыления покрытий на ФЭ лопатки зависят от параметров s и r , а именно цикла восстановления и особенностей износа ФЭ лопатки компрессора $TB = f(s, r)$.

Таким образом, 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 функционально-ориентированных и традиционных покрытий.

2.8. Основные этапы и общая блок-схема диссертационной работы

Представленная диссертационная работа содержит следующие основные этапы:

- анализ современного состояния вопроса исследования,
- общий подход в повышении эксплуатационных свойств лопаток ГТД; особенности синтеза структуры технологических процессов обеспечения и восстановления свойств лопаток;
- совершенствование технологического обеспечения для реализации требуемых свойств пера лопатки компрессора;
- структурный синтез функционально-ориентированных технологических процессов обеспечения и восстановления свойств пера лопаток компрессора ГТД;
- структурно-параметрический синтез технологического процесса напыления ионно-плазменных ФОП; экспериментальные исследования; разработка рекомендаций; внедрение результатов работы в производство.

На основании проведенного анализа в представленной работе выполнено повышение ресурса и ремонтпригодности лопаток компрессора ГТД при их изготовлении и/или восстановлении, а также увеличение числа восстановлений в период их общего срока службы, за счет применения ФОП, формируемых на пера лопатки на базе принципа единовременного полного износа покрытия и реализуемых посредством специального технологического обеспечения, структурируемого посредством закономерностей, действующих между операциями технологического процесса. Для пояснения выполненного процесса исследований разработана блок-схема работы (рис. 2.29).

Можно отметить, что данная работа базируется на общем подходе обеспечения свойств ФЭ лопатки, который основывается на принципе ЕПИП. При этом выполняется разработка технологического обеспечения синтеза

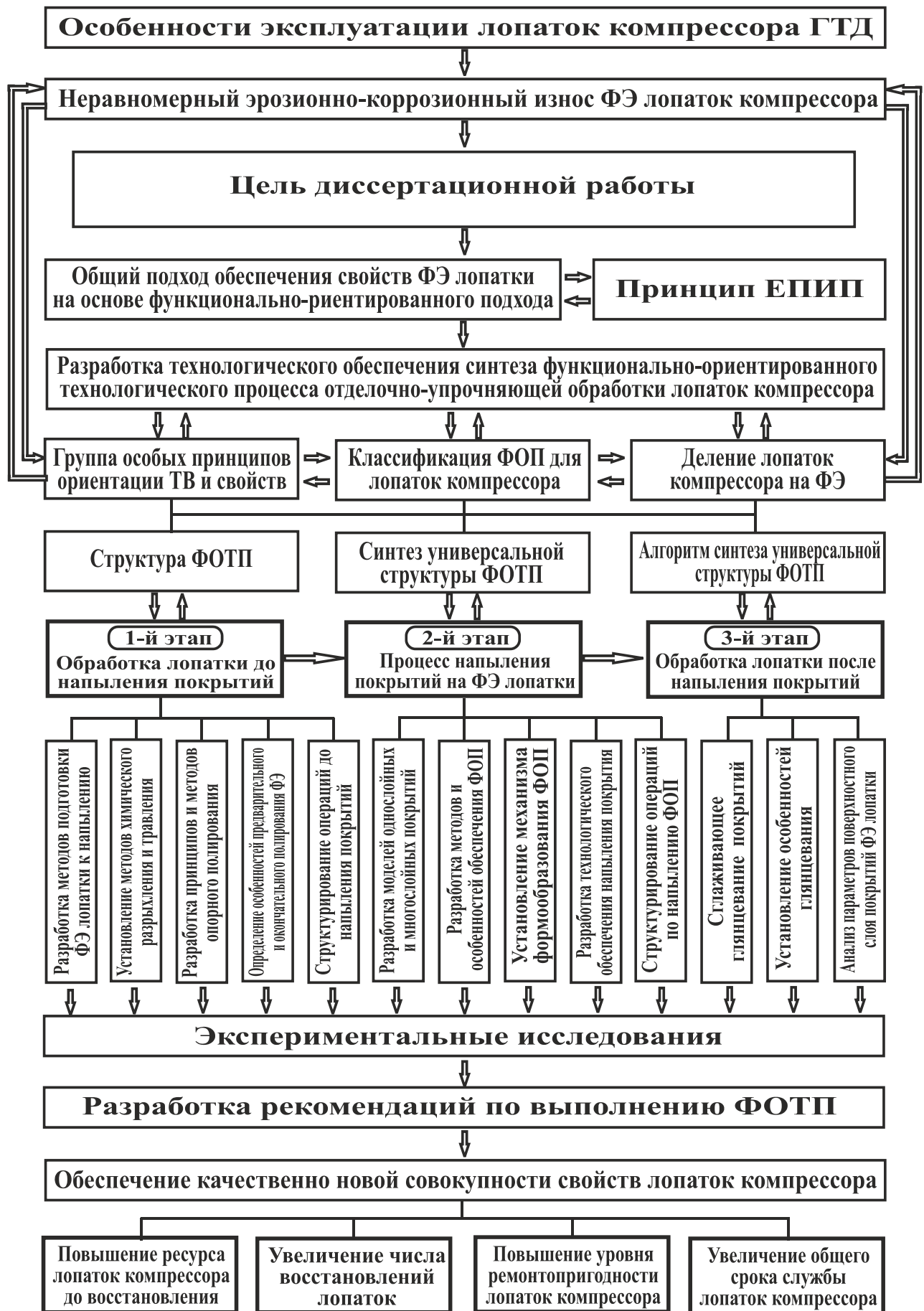


Рисунок 2.29. Блок-схема диссертационного исследования

функционально-ориентированного технологического процесса ОУО лопаток компрессора. В этом случае данный технологический процесс разрабатывается на основе следующего: группы особых принципов ориентации технологических воздействий (ТВ) и свойств; классификации ФОП для лопаток компрессора; деление лопаток компрессора на ФЭ. Для синтеза технологического процесса необходимо: разработать структуру функционально-ориентированного технологического процесса (ФОТП); выполнить синтез универсальной структуры ФОТП; разработать алгоритм синтеза универсальной структуры ФОТП.

Для каждого из трех основных этапов технологического предусматривается выполнение целого комплекса различных исследований. Предусматривается проведение экспериментальных исследований по определению параметров качества обеспечения свойств лопаток компрессора. А также будут представлены общие рекомендации по выполнению ФОТП и обеспечения заданных параметров свойств лопаток компрессора.

Выполненные исследования направлены на обеспечение качественно новой совокупности свойств лопаток компрессора ГТД.

Разработанная блок-схема (рис. 2.29) даёт возможность определять взаимосвязи между отдельными этапами разрабатываемого технологического процесса, позволяет связать этапы между собой, благодаря этому становится видна последовательность и взаимозависимость каждого этапа, его влияние на формирование заданных свойств лопаток компрессора ГТД при их ОУО. Представленная блок-схема позволяет решить общие вопросы синтеза функционально-ориентированного технологического процесса и обеспечить достижение поставленной цели.

2.9. Выводы

Выполненные исследования позволили разработать общий подход в повышении эксплуатационных свойств лопаток ГТД. При этом установлены основные особенности синтеза структуры технологических процессов обеспечения и восстановления свойств лопаток. Проведенные исследования позволили:

1. Установить, что износ лопатки компрессора имеет определенные особенности, а именно:

- входная кромка (зона около входной кромки) имеет переменный износ, увеличивающийся от полки лопатки к периферии пера лопатки, величина которого может изменяться до 2-х раз;

- выходная кромка (зона около выходной кромки) имеет переменный износ, 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, уменьшающийся от входной к выходной кромке, величина которого может изменяться до 1,3 ... 1,5 раз;

- поверхность корыта пера лопатки имеет переменный износ, изменяющийся по поверхности до 2-х раз;

- поверхность спинки пера лопатки имеет сравнительно незначительный износ.

2. Разработать общий подход обработки и восстановления функциональных элементов пера лопатки на основе ФОП, обеспечивающих ЕПИП в период эксплуатации лопатки T . Это обеспечивает возможность повысить ресурс лопаток до их восстановления и увеличить количество восстановлений. Все это существенно повышает общий ресурс лопаток компрессора при эксплуатации ГТД.

3. Разработать классификацию ФОП. Эта классификация позволяет генерировать полное множество различных вариантов ФОП и выбирать наиболее рациональные 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.

4. Установить особенности обеспечения ФОС поверхности пера лопатки компрессора на базе особых принципов ориентации покрытий.

Разработанные приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств пера лопатки дают технологам ключ для научно обоснованного обеспечения заданного, требуемого или предельного потенциала возможностей изделия при эксплуатации в машине или технологической системе.

5. Разработать новые особенности деления лопаток компрессора ГТД на функциональные элементы.

Представленный процесс деления лопатки по уровням глубины технологий дает возможность технологам прецизионно, особо прецизионно и супер прецизионно 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 ее эксплуатации в ГТД.

6. Разработать методику и алгоритм синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса обеспечения и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД. Представленные результаты позволяют универсально решать вопросы нанесения функционально-ориентированных и традиционных покрытий.

7. Разработать общую блок-схему исследований, которая даёт возможность определять взаимосвязи между отдельными этапами разрабатываемого техноло-

гического процесса, позволяет связать этапы между собой, благодаря этому становится видна последовательность и взаимозависимость каждого этапа, его влияние на формирование заданных свойств лопаток компрессора ГТД при их ОУО. Представленная блок-схема позволяет решить общие вопросы синтеза функционально-ориентированного технологического процесса и обеспечить достижение поставленной цели.

РАЗДЕЛ 3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА

3.1. Структура операций отделочной обработки лопаток компрессора до и после нанесения покрытий

В данном разделе будут рассмотрены вопросы, связанные с синтезом структуры технологического процесса ОУО [45, 49, 51, 52, 61] пера лопатки компрессора до и после нанесения покрытия (рис. 3.1), а также с особенностями реализации отдельных операций и их выполнением. На рис. 3.1 пунктирными линиями показаны этапы технологического процесса, структура которых рассматривается в данном разделе.



Рисунок 3.1. Этапы технологического процесса, структура которых рассматривается в данном разделе

Здесь показано: три этапа технологического процесса, V - входной поток лопаток компрессора, W - выходной процесс лопаток компрессора.

Можно отметить, что 1-й этап технологического процесса обработки лопатки компрессора до напыления покрытия имеет структуру [142], которая приведена на рис. 3.2. Здесь можно отметить, что на рис. 3.2 представлена структура отделочной обработки элементов пера лопатки для восстановления лопаток после эксплуатации. Процесс восстановления лопаток компрессора выполняется за счет

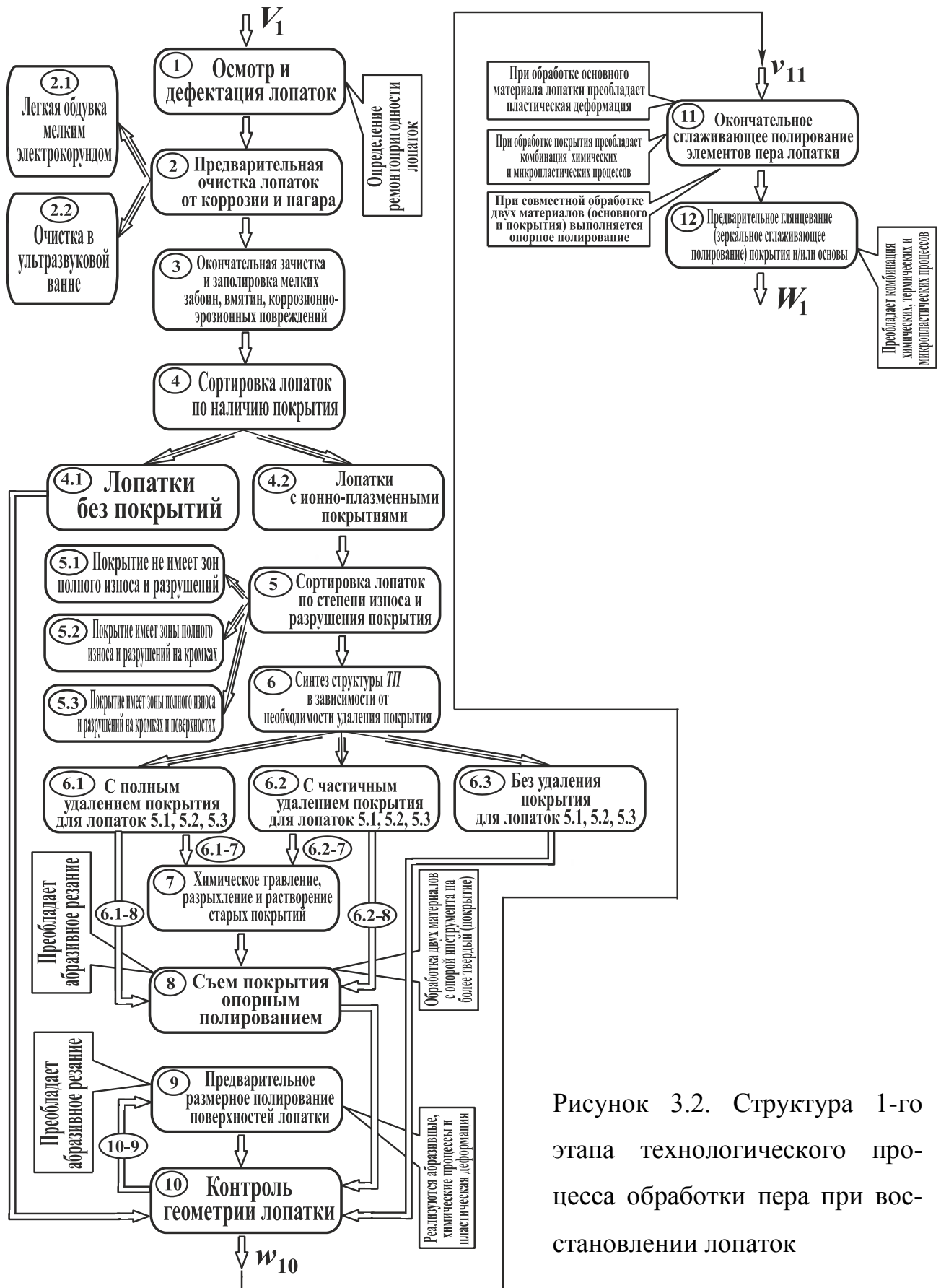


Рисунок 3.2. Структура 1-го этапа технологического процесса обработки пера при восстановлении лопаток



Рисунок 3.3. Структура 1-го этапа технологического процесса отделочной обработки пера новых лопаток

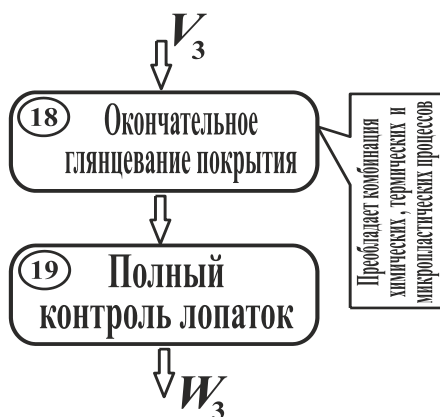


Рисунок 3.4. Структура 3-го этапа технологического процесса обработки пера при восстановлении лопаток компрессора

реализации целого комплекса операций. Этот процесс имеет многовариантную структуру и начинается с определения ремонтпригодности лопатки компрессора. При этом заканчивается 1-й этап технологического процесса восстановления лопаток предварительным глянцеованием пера.

Для новых лопаток, процесс механической отделочной обработки пера лопатки имеет структуру, представленную на рис. 3.3:

- предварительное размерное полирование поверхностей пера лопатки,

патки,

- контроль геометрии пера лопатки компрессора,

- окончательное сглаживающее полирование элементов пера лопатки компрессора.

Далее, реализуется 2-й этап технологического процесса восстановления лопаток компрессора, связанный с нанесением вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Структура 3-го этапа технологического процесса обработки пера при восстановлении лопаток компрессора представлена на рис. 3.4. Здесь выполняются следующие операции:

- окончательное глянцеование покрытия,
- полный контроль лопаток.

Можно отметить, что на приведенных двух этапах технологического процесса изготовления или восстановления лопаток имеются определенные особенности отделочной обработки [30, 33, 38, 39]. Среди этих особенностей можно выделить следующие:

- повышение эффективности обработки лопаток компрессора на основе принципа последовательной минимизации параметров предшествующих операций;
- особенности съема старых покрытий методом опорного полирования поверхностей пера лопатки компрессора;
- некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток компрессора из титановых сплавов;
- особенности полировки тонких покрытий лопаток компрессора и назначение припусков;
- сглаживающее зеркальное полирование поверхностей;
- предварительное и окончательное глянцеование поверхностей пера лопатки компрессора.

3.2. Физическая сущность и особенности процесса полирования поверхностей пера лопаток компрессора из титановых сплавов без покрытий и с покрытиями

Для решения вопросов, связанных с особенностями процесса полирования поверхностей пера лопаток компрессора необходимо рассмотреть физическую сущность процесса полирования [171, 172, 176]. Это обусловлено тем, что процесс обработки предусматривает решение следующих вопросов [128]:

1. Полирование поверхностей лопаток компрессора из титановых сплавов без покрытия [129, 135, 136].
2. Полировка нитрид титановых покрытий на лопатках компрессора (глянцеование или полная выполировка покрытия) [143, 151, 152, 153, 159].

3. Комбинированная обработка двух материалов пера лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и титанового сплава.

Для определения вопросов физической сущности процесса полирования лопаток компрессора, имеющих указанные выше особенности материала поверхностей, необходимо рассмотреть следующие вопросы:

1. Выполнить анализ составов паст и суспензий для их использования при полировке поверхностей пера лопатки компрессора.

2. Проанализировать применяемый инструмент для обработки лопаток – полировальники.

3. Исследовать особенности полировки титановых сплавов, выполировки покрытий с поверхностей пера лопатки и глянцеования титанового сплава, нитрид титанового покрытия или сразу двух материалов.

4. Определить структуру операций процессов полирования поверхностей пера лопатки компрессора.

5. Рассмотреть технологические особенности процесса полирования.

Приготовление или подбор паст или суспензий на машиностроительном заводе для полировки лопаток ГТД обычно выполняется на специальном участке или лаборатории. Для двигателя модели ТВЗ-117, лопатки компрессора выполняются из титановых сплавов (ВТ-8, ВТ-8м и т.п.), при этом в ряде случаев на поверхности пера лопатки наносятся нитрид титановые покрытие. В процессе эксплуатации лопаток компрессора происходит эрозионно-коррозионные разрушение поверхностей пера лопатки. При этом в случае если лопатка имеет покрытие, оно разрушается зонально. Поэтому полировка поверхностей лопаток компрессора имеет многовариантные особенности:

- полируемые поверхности функциональных элементов пера лопатки выполнены из титанового сплава, поэтому полировка выполняется только титанового сплава;

- полируемая поверхность лопатки из титанового сплава имеет вакуумное ионно-плазменное нитрид титановое покрытие, при этом полируется только покрытие;

- полностью заполировывается только нитрид титановое покрытие с поверхностей пера лопатки;

- полируемая поверхность лопатки из титанового сплава имеет вакуумное ионно-плазменное нитрид титановое покрытие, при этом полируется покрытие и зоны основного материала без покрытия, имеющие эрозионно-коррозионные разрушения (комбинированная полировка).

На особенности подбора паст и суспензий влияют следующие факторы:

1. Физико-механические, структурные, химические свойства и параметры обрабатываемых материалов лопатки компрессора (титановый сплав, покрытия).

2. Свойства и параметры обрабатывающего инструмента (полировальника) и обрабатывающей среды (паста или суспензии) [117].

3. Исходные и конечные свойства лопаток (геометрия, параметры шероховатости и качества поверхностного слоя) [102].

4. Структура операций и переходов технологического процесса обработки лопаток компрессора [80, 98, 105, 106, 113, 114].

5. Режимы, кинематика и особенности обработки лопаток компрессора.

6. Техничко-экономические параметры обработки лопаток компрессора.

Выбор паст и суспензий для полирования поверхностей лопатки начинается с подбора абразивного материала [40, 172]. При выборе абразивных (алмазных, эльборовых и др.) микропорошков и их зернистости анализируются требования, предъявляемые к качеству обрабатываемой поверхности. В зависимости от требуемых параметров шероховатости поверхностного слоя пера лопатки и точности полирование выполняется обычно за несколько операций [132].

Достижение заданной шероховатости поверхности во многом зависит от однородности зернового состава микропорошков [172]. Резкое улучшение параметров шероховатости поверхности лопатки и устранение отдельных дефектов (рисок, точек, царапин) достигается при уменьшении до минимума предельной фракции порошка [118, 119, 120, 122, 125, 126].

Для окончательных полировальных операциях поверхностей лопаток компрессора (зеркальное полирование или глянцеование) рекомендуется применять

микropорошки с повышенной размерной однородностью зернового состава [172]. С изменением зернистости абразива изменяется соотношение между процессами резания-царапания и химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материала. При выборе пасты или суспензии необходимо учитывать предполагаемое образование пленок и других химических соединений. При этом нужно стремиться к тому, чтобы пленки были мягкими, рыхлыми и легко удалялись под действием абразивных микropорошков и субмикropорошков. От правильного их выбора зависит производительность полирования.

Особенностью некоторых мягких абразивных материалов (окись хрома, окись железа) является их способность оказывать на обрабатываемую поверхность пера лопатки не только механическое, но и химическое воздействие [64, 65, 68, 78]. Оно характеризуется образованием окисной пленки на обрабатываемой поверхности. Благодаря этому окислы металлов имеют повышенную полирующую способность по сравнению с карбидами. Особенно велико влияние на полирующую способность окислов металлов с переменной валентностью, таких как окись хрома, окись железа, двуокиси марганца [172]. Высокая стоимость и дефицитность окиси хрома ограничивают ее применение. В качестве частичного или полного заменителя окиси хрома хорошо себя зарекомендовали прокаленный глинозем, двуокиси марганца, окись железа и др. Эти материалы особенно эффективны для окончательного полирования и глянцевого полирования поверхностей пера лопатки.

Окончательный состав пасты и суспензии должен быть откорректирован в зависимости от применяемого инструмента и режимов обработки. Наиболее распространен метод полирования поверхностей пера лопатки кругами. Полировальный круг – это мягкий эластичный инструмент, на котором закреплен слой абразивных зерен или нанесена полировальная паста. Материалы для полировальных кругов должны обладать достаточной прочностью и способностью хорошо удерживать на рабочей поверхности полировальную пасту, а также быть эластичными и сравнительно легкими. Полировальные круги для полирования лопаток компрес-

сора изготавливают из фетра, войлока, различных тканей и резины, для полирования и съема нитрид титановых покрытий.

Можно отметить, что полирование поверхностей пера лопаток компрессора может выполняться за несколько последовательных операций [182, 185, 187, 188], которые отличаются величиной снимаемого припуска. Количество операций полирования определяется параметрами шероховатости и точности лопатки до и после обработки. Например, при исходном параметре шероховатости $R_a = 0,25 \dots 0,32$ мкм для получения шероховатости $R_z = 0,025 \dots 0,032$ мкм не менее четырех полировальных операций, особенно в случае наличия неразрушенного нитрид титанового покрытия:

1. Выполировка нитрид титанового покрытия или удаление покрытия. Припуск на обработку $0,050 \dots 0,070$ мм, шероховатость поверхности $R_a = 0,08 \dots 0,125$ мкм.

2. Предварительное полирование. Припуск на обработку $0,010 \dots 0,015$ мм, шероховатость поверхности $R_a = 0,04 \dots 0,063$ мкм.

3. Окончательное полирование. Припуск на обработку $0,005 \dots 0,007$ мм, шероховатость поверхности $R_a = 0,02 \dots 0,025$ мкм.

4. Глянцевание или зеркальное полирование. Припуск на обработку $0,0005 \dots 0,001$ мм, шероховатость поверхности $R_z = 0,025 \dots 0,032$ мкм.

Следует иметь в виду, что назначение припусков на обработку представляет сложную задачу. Малый припуск не обеспечивает получение заданных параметров точности из-за неполного удаления дефектного поверхностного слоя, полученного на предыдущей операции, при этом большой припуск может привести к повышению себестоимости обработки, а в ряде случаев и снижению точности.

Структуру операций полирования лопаток можно определять на основании понятия уточнения с помощью следующих коэффициентов уточнения:

$$\left. \begin{aligned} k_{o\bar{o}}^R &= k_1^R k_2^R \cdots k_n^R = \prod_{i=1}^n k_i^R, \\ k_{o\bar{o}}^h &= k_1^h k_2^h \cdots k_n^h = \prod_{i=1}^n k_i^h, \\ k_{o\bar{o}}^\Delta &= k_1^\Delta k_2^\Delta \cdots k_n^\Delta = \prod_{i=1}^n k_i^\Delta, \\ k_{o\bar{o}}^T &= k_1^T k_2^T \cdots k_n^T = \prod_{i=1}^n k_i^T; \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где $k_{o\bar{o}}^R, k_{o\bar{o}}^h, k_{o\bar{o}}^\Delta, k_{o\bar{o}}^T$ - общие коэффициенты уточнения параметров поверхностного слоя, соответственно высоты неровностей профиля, глубины дефектного слоя, суммарного отклонения расположения поверхности и допуска на размер;

$k_i^R, k_i^h, k_i^\Delta, k_i^T$ - частные коэффициенты уточнения i -х параметров поверхностного слоя, соответственно высоты неровностей профиля, глубины дефектного слоя, суммарного отклонения расположения поверхности и допуска на размер.

Здесь:

$$\left. \begin{aligned} k_{o\bar{o}}^R &= \frac{R_{z0}}{R_{zn}}, & k_i^R &= \frac{R_{z(i-1)}}{R_{zi}}; \\ k_{o\bar{o}}^h &= \frac{h_0}{h_n}, & k_i^h &= \frac{h_{(i-1)}}{h_i}; \\ k_{o\bar{o}}^\Delta &= \frac{\Delta_{\Sigma 0}}{\Delta_{\Sigma n}}, & k_i^\Delta &= \frac{\Delta_{\Sigma(i-1)}}{\Delta_{\Sigma i}}; \\ k_{o\bar{o}}^T &= \frac{T_{A0}}{T_{An}}, & k_i^T &= \frac{T_{A(i-1)}}{T_{Ai}}; \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

где T_{A0}, T_{An}, T_{Ai} - допуск на размер заготовки, готового изделия и поверхности с i -м переходом (операцией), соответственно [50];

$R_{z(i-1)}$ - высота неровностей на предшествующем переходе (операции) [60, 67];

$h_{(i-1)}$ - глубина дефектного поверхностного слоя на предшествующем переходе (обезуглероженный, отбеленный или трещиноватый слой);

$\Delta_{\Sigma(i-1)}$ - суммарные отклонения расположения и, в некоторых случаях, отклонения формы поверхности на предшествующем переходе (операции).

Значения коэффициентов уточнения может находиться в широких пределах [20] при различных видах механической обработки изделий. При этом на основа-

нии опытно-статистических данных для выполнения процессов полирования можно рекомендовать следующие значения коэффициентов уточнения:

- при выполировке нитрид титанового покрытия или удалении покрытия – $k_i = 2,5 \dots 4,0$ и более;
- при предварительном полировании – $k_i = 2,0 \dots 2,5$;
- при окончательном полировании – $k_i = 1,5 \dots 1,8$;
- при глянцевании или зеркальном полировании – $k_i = 1,2 \dots 1,5$.

При полировании изделий в зоне обработки одновременно действует целый ряд различных факторов [172], при этом при полировании лопатки компрессора из титанового сплава, имеющей тонкое нитрид титановое покрытие, можно выделить следующие воздействия:

1. Химическое воздействие поверхностно-активных полирующих веществ (стеариновой кислоты, парафина и других веществ). При этом это воздействие может реализовываться в обычном условии, так и при действии температуры.
2. Резание абразивными зернами или размельчение (диспергирование) тончайшего поверхностного слоя [41, 57, 63, 76].
3. Пластическое течение микрорельефа полируемой поверхности. Пластическая деформация поверхностного слоя может реализовываться в холодном состоянии и горячем.
4. Термическое воздействие.
5. Сколы и хрупкие разрушения нитрид титановых покрытий [59].

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. При выполировке покрытия и предварительном полировании лопаток преобладает процесс резания, а при глянцевании – пластическая деформация поверхностного слоя с химическими процессами.

Можно отметить, что частота вращения полировального круга при полировании поверхности лопатки не должна превышать 2800 об/мин ($v_p = 7,5 \dots 10$ м/с). Сила прижатия полировального круга при предварительном полировании опреде-

ляется из удельного давления $P_1 = 5 \dots 10 \text{ кг/см}^2$, а при глянцеваии $P_4 = 2 \dots 5 \text{ кг/см}^2$. Также следует иметь в виду, что при предварительном полировании должны использоваться грубые пасты, затем средние, при глянцеваии тонкие пасты с микропорошками абразива.

3.3. Повышение эффективности полировки лопаток компрессора на основе принципа последовательной минимизации параметров на предшествующих переходах

С развитием научно-технического прогресса непрерывно повышаются требования к качеству изделий машиностроения и эффективности их изготовления. В настоящее время для решения этих вопросов разработано множество различных технологических процессов, способов технологических воздействий и прогрессивных методов преобразования свойств. Это обеспечивает повышение эффективности полирования поверхностей лопатки компрессора.

Операциям технологического процесса полирования поверхностей лопатки компрессора свойственны следующие особенности: длительность обработки, высокая стоимость обработки, низкая производительность обработки, производительность обработки поверхности изделия на последующей операции обычно длительнее предшествующей операции из-за повышения качества обработки, стоимость обработки поверхности изделия на последующей операции на порядок дороже предшествующей операции из-за повышения качества обработки.

Каждая операция или переход технологического процесса (рис. 3.5) реализует при обработке заданные параметры точности и шероховатость поверхностей изделий машиностроения. Параметры точности и шероховатости поверхностей



Рисунок 3.5. Структура технологического процесса изделия определяются определенным допуском. В этом допуске учтены отклоне-

ния формы и расположения поверхности изделия, а также параметры (шероховатость, волнистость и тому подобное) поверхностного слоя поверхности изделия.

На рис. 3.5 представлена структура технологического процесса. Здесь показано: $1, 2, \dots, n$ – множество операций технологического процесса; n – общее количество операций; V – входной поток заготовок; W – выходной поток изделий.

В работе предлагается выполнение повышения эффективности процесса обработки поверхности изделия на основе реализации **принципа последовательной минимизации** (обеспечение нижнего значения) отклонений поверхности, обеспечения параметров поверхностного слоя и уменьшения допуска **на предшествующих** переходах и операциях технологического процесса [86, 96, 181]. Реализация принципа последовательной минимизации параметров операций технологического процесса комбинированной отделочной обработки поверхности на предшествующих операциях и переходах позволяет проще и эффективнее достигать заданные параметры на данной операции или переходе за счет обеспечения более высоких параметров поверхности изделия на предшествующих операциях. Это связано с тем, что по ходу технологического процесса отделочной обработки предшествующие отделочные операции обычно выполняются проще и эффективнее чем последующие, так как последующие операции должны обеспечивать параметры поверхности более высокого качества [86, 96, 181].

Можно отметить, что в этом параграфе предполагается решить следующие основные задачи: выполнить анализ особенностей обработки изделий по операциям технологического процесса, предложить мероприятия по повышению эффективности обработки изделий в технологическом процессе, выполнить сравнение повышения производительности обработки изделия при применении разработанного принципа для заданной структуры технологического процесса.

Рассмотрим более детально применение принципа последовательной минимизации параметров обработки на предшествующих переходах технологического процесса для повышения эффективности полирования поверхностей лопаток компрессора.

В основе применения этого принципа лежит тот факт, что каждый вид обработки имеет разбросы параметров точности поверхности, а именно – верхнее значение и нижнее значение параметров шероховатости поверхности (см. табл. 3.1). При этом реализация нижних параметров шероховатости на предшествующей операции позволяет повысить производительность обработки на данной операции, так как здесь необходимы меньшие затраты на обработку для получения заданных параметров шероховатости поверхности изделия, чем на более точной операции или переходе. Отметим, что выполнение операций для получения более точных параметров поверхностей и шероховатости является более трудоемким процессом, чем выполнение операций с меньшим качеством. Это в целом ведет к повышению эффективности технологического процесса (переходов) обработки, в том числе полирования поверхностей лопаток компрессора.

Обработка поверхностей лопаток компрессора по различным операциям и переходам технологического процесса имеет параметры, представленные в табл. 3.1. Здесь представлены данные по шероховатости поверхности пера лопатки компрессора по операциям технологического процесса.

Например, выполнение предшествующей операции (менее точной) по минимальному значению параметров шероховатости повышает длительность обработки на этой операции на 8 ... 10%. Это обусловлено тем, что здесь, необходимо более длительно и точно достигать минимальные значения параметров качества поверхностей лопатки по заданным допускам. Это обеспечивает повышение эффективности обработки на последующей, более точной операции, приблизительно на 30-40 %. Применение такого подхода в целом дает возможность повысить эффективность полирования поверхностей лопатки компрессора в целом для технологического процесса.

При полировании лопаток компрессора технологическая производительность обработки для четырех операций технологического процесса (табл. 3.1) определяется по следующей формуле:

$$П_{Ta} = \frac{1}{t_{o1} + t_{o2} + t_{o3} + t_{o4}}, \quad (3.3)$$

где Π_{Ta} - технологическая производительность традиционного процесса полирования поверхностей лопатки компрессора;

$t_{o1}, t_{o2}, t_{o3}, t_{o4}$ - основное время обработки поверхностей изделия на 1-й, 2-й, 3-й и 4-й операциях технологического процесса.

Таблица 3.1. Параметры шероховатости поверхностей лопатки компрессора по различным отделочным операциям

№ п/п	Обработка поверхности лопатки	Параметры шероховатости поверхности R_a или R_z , мкм
1	Выполировка нитрид титанового покрытия	$R_a = 0,08 \dots 0,125$ мкм
2	Предварительное полирование	$R_a = 0,04 \dots 0,063$ мкм
3	Окончательное полирование	$R_a = 0,02 \dots 0,025$ мкм
4	Глянцевание или зеркальное полирование	$R_z = 0,025 \dots 0,032$ мкм

В выражении (3.3) если длительность основного времени обработки на всех операциях приблизительно равна $t_{o1} = t_{o2} = t_{o3} = t_{o4} = t_o$, то можно записать следующую формулу по определению технологической производительности

$$\Pi_{Ta} = \frac{1}{4 t_o}. \quad (3.4)$$

При реализации принципа последовательной минимизации (обеспечения нижнего значения) отклонений поверхности, обеспечения параметров поверхностного слоя и уменьшения допуска на предшествующих переходах и операциях технологического процесса формула по определению технологической производительности полировки поверхностей лопатки будет иметь следующий вид:

$$P_{Tb} = \frac{1}{(1 + 0,1) t_{o1} + (1 + 0,1) t_{o2} (1 - 0,3) + (1 + 0,1) t_{o3} (1 - 0,3) + t_{o4} (1 - 0,3)}, \quad (3.5)$$

где P_{Tb} - технологическая производительность нового процесса полировки поверхностей изделия на базе предлагаемого принципа.

Здесь, в выражении (3.5) имеются следующие обозначения: значение 0,1 обозначает увеличение длительности обработки поверхности изделия на 10% на предшествующей операции, значение 0,3 – уменьшение длительности обработки на данной операции на 30%. Принимая, что $t_{o1} = t_{o2} = t_{o3} = t_{o4} = t_o$ можно записать следующую формулу по определению технологической производительности

$$P_{Tb} = \frac{1}{3,34 t_o}. \quad (3.6)$$

На основании выражений (3.3) и (3.6) увеличение относительной производительности обработки поверхности в процентном выражении при использовании данного подхода составит на 16,5%, а именно

$$\Delta P_{To} = \left(\frac{P_{Tb}}{P_{To}} - 1 \right) 100 \% = 16,5 \% . \quad (3.7)$$

Учитывая (3.7), в общем виде выражение для определения значения увеличения относительной производительности обработки поверхности в процентном выражении, можно записать следующим образом:

$$\Delta P_{To} = \left[\frac{n}{(1 + k_1) + (1 + k_1)(1 - k_2)(n - 2) + (1 - k_2)} - 1 \right] 100 \% , \quad (3.8)$$

где ΔP_{To} - значение увеличения относительной производительности обработки поверхности в процентном выражении;

n - количество операций технологического процесса;

k_1 - коэффициент увеличения длительности обработки на предшествующей операции;

k_2 - коэффициент уменьшения длительности обработки на данной операции технологического процесса.

Выражение (3.8) действительно в условиях, когда количество операций технологического процесса $n \geq 2$ и $k_1 < k_2$.

На рис. 3.6 представлена зависимость увеличения производительности отделочной обработки поверхности изделия в зависимости от количества операций технологического процесса для различных значений коэффициентов увеличения и уменьшения длительности обработки на предшествующей и данной операции

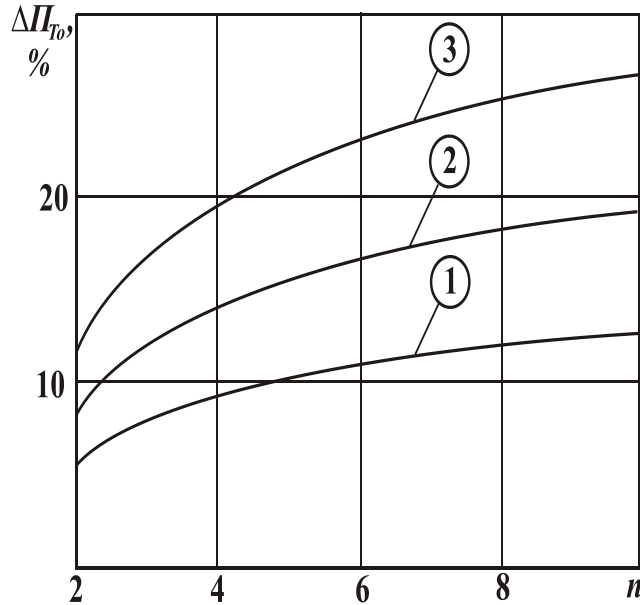


Рисунок 3.6. Зависимость относительной производительности от количества операций для различных значений коэффициентов:

- график 1 – при $k_1 = 0,1; k_2 = 0,2$;
- график 2 – при $k_1 = 0,1; k_2 = 0,25$;
- график 3 – при $k_1 = 0,1; k_2 = 0,3$

технологического процесса. Этот график свидетельствует о необходимости применения предлагаемого принципа при синтезе структуры технологического процесса комбинированной отделочной обработки поверхностей изделий.

На базе использования принципа последовательной минимизации (обеспечения нижнего значения) отклонений поверхности, обеспечения параметров поверхностного слоя и уменьшения допуска на предшествующих переходах и операциях технологического процесса обеспечивается возможность повышения производительности обработки поверхностей изделий. Этот факт необходимо

учитывать при составлении структуры технологического процесса и определении параметров обработки по операциям.

Применение предлагаемого принципа последовательной минимизации отклонений в машиностроении для синтеза технологического процесса комбинированной отделочной обработки поверхностей изделия позволяет повысить производительность обработки на 5-25% по сравнению с обычными традиционными подходами. А также использования данного подхода ведет к снижению затрат на обработку и себестоимости изготовления поверхностей изделий.

Таким образом, выполняя последовательную минимизацию параметров геометрии и шероховатости поверхности лопатки компрессора на предшествующих переходах и операциях полирования по ходу технологического процесса, обеспечивается близкая к предельным значениям производительность и себестоимость изготовления поверхности на данном этапе процесса. Принцип последовательной минимизации (обеспечения нижнего значения) отклонений геометрии поверхности, параметров поверхностного слоя и уменьшения допуска на предшествующих переходах и операциях технологического процесса обеспечивает повышение эффективности технологического процесса обработки поверхностей лопатки компрессора ГТД.

3.4. Особенности съема старых покрытий методом опорного полирования поверхностей пера лопатки компрессора

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) это сложные и дорогостоящие элементы авиационных двигателей (рис. 3.7), которые имеют целое множество вариантов геометрии в зависимости от номера ступени. Например, для двигателя ТВ3-117 применяются лопатки компрессора двенадцати ступеней. Для повышения стойкости лопаток компрессора широко используются различные вакуумные ионно-плазменные покрытия. Эти покрытия значительно снижают коррозионно-эрозионные разрушения пера лопаток. Можно отметить, что нитрид титановые, нитрид титановые циркониевые или другие покрытия имеют высокую микротвердость, коррозионную и эрозионную стойкость по сравнению с параметрами основного материала пера лопатки [1, 5, 20, 21]. Поэтому они позволяют существенно повысить стойкость лопаток компрессора и соответственно всего ГТД.

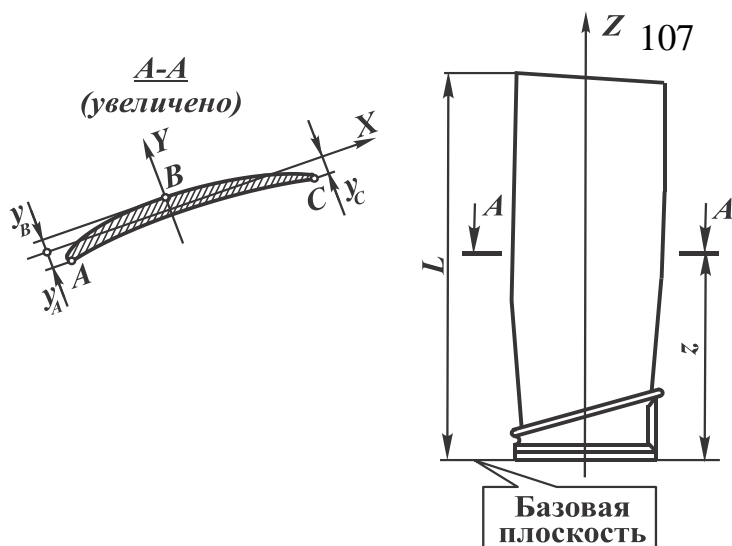


Рисунок 3.7. Лопатка 3-й ступени компрессора ГТД ТВ3-117

Вместе с тем, в процессе эксплуатации лопаток компрессора ГТД происходит абразивный износ и эрозия, газовая, кислотная и солевая коррозия покрытия, которое в процессе эксплуатации лопаток ГТД разрушается (рис. 3.8). Поэтому для повышения стойкости лопаток компрессора покрытия необходимо

восстанавливать. Вместе с тем, следует отметить, что процесс повторного нанесения покрытия имеет определенные особенности, связанные со следующим.

Процесс разрушения вакуумного ионно-плазменного покрытия, например нитрид титанового покрытия, имеет неравномерный характер. Возможны следующие случаи разрушения покрытия (рис. 3.8):

- без полного разрушения покрытия по его толщине (рис. 3.8,а);
- с полным разрушением покрытия по его толщине на входной и периферийной кромке (рис. 3.8,б);
- прогрессирующее разрушение покрытия на поверхности пера (рис. 3.8,б).

Здесь обозначено: 1 – перо лопатки, 2 – покрытие пера лопатки, 3 – переходная зона пера лопатки между основным материалом пера лопатки и покрытием. Можно отметить, что в переходной зоне 3 пера лопатки необходимо обеспечивать некоторые особенности обработки, связанные с одновременной полировкой двух материалов пера лопатки.

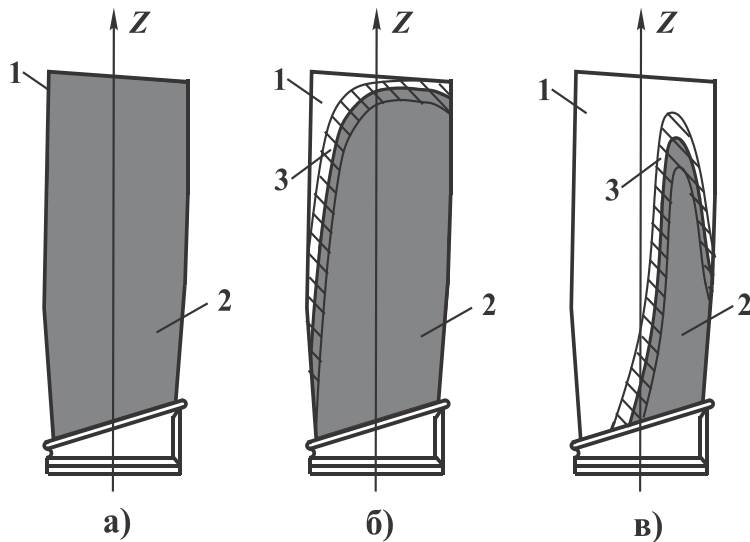


Рисунок 3.8. Особенности разрушения ионно-плазменного покрытия лопатки: а – без полного разрушения, б – с полным разрушением, в – прогрессирующее разрушение покрытия на поверхности пера

В этом параграфе работы [89, 91] предлагается выполнять подготовку лопатки ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий под напыление нового покрытия за счет обеспечения одинаковых параметров шероховатости нитрид титанового покрытия и титанового сплава поверхностей пера в условиях совместного опорного их полирования. Для этого в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть особенности износа ионно-плазменного покрытия поверхностей пера лопатки.
2. Исследовать особенности подготовки поверхностей пера лопатки к напылению нового покрытия посредством полирования.
3. Предложить схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки – титанового сплава.
4. Для нанесения нового нитрид титанового покрытия на оставшееся старое покрытие и основной материал поверхности - с одинаковыми свойствами, разработать рекомендации по опорному одновременному полированию двух материалов и обеспечению близких параметров шероховатости на покрытии и на основном материале пера лопатки.

Эти задачи решаются в данной работе.

Следует отметить, что при подготовке пера лопатки, в зоне 3 (рис. 3.8) необходимо обеспечивать совместную обработку двух различных материалов,

имеющих различные физико-механические свойства, а именно нитрид титанового покрытия (микротвердость $H_{\mu}= 21 \dots 23$ ГПа), располагающегося на поверхностях пера лопатки, и основного материала пера лопатки, изготовленного из титанового сплава, например ВТ-8М (микротвердость $H_{\mu}=1,2 \dots 1,5$ ГПа). При этом в случае совместной полировки двух принципиально различных материалов возникают случаи продавливания покрытия и углубления инструмента в основной материал пера лопатки. Это обусловлено тем, что для обработки покрытия необходимы усиленные режимы обработки, а именно удельное давление полирования поверхности с покрытием должно превышать в 1,5 ... 2,0 раза по сравнению с обработкой основного материала пера лопатки. При этом для нанесения нового нитрид титанового покрытия необходимо обеспечивать следующие особенности:

- для исключения процесса продавливания покрытия и углубления инструмента в основной материал пера лопатки (старое покрытие имеет переменную толщину) необходимы новые схемы совместной обработки двух разнородных материалов;

- для обеспечения заданных параметров качества нового покрытия, параметры шероховатости предыдущего покрытия и основного материала пера лопатки должны иметь близкие значения;

- для повышения производительности полировки поверхностей лопатки с покрытием режимы обработки должны быть ориентированы на обработку покрытия.

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. 3.9 и рис. 3.10. Здесь показаны: обработка поверхности спинки пера лопатки (рис. 3.9,а и рис. 3.10,а) и обработка поверхности корыта пера лопатки (рис. 3.9,б и рис. 3.10,б). На верхнем рис. 3.9 или рис. 3.10 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 – эпюр удельного

давления прижатия инструмента к поверхности пера лопатки, 5 - траектория трасирования 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.

В соответствии со схемами рис. 3.9 и рис. 3.10 полировальный круг следует располагать относительно полируемой поверхности пера лопатки таким образом,

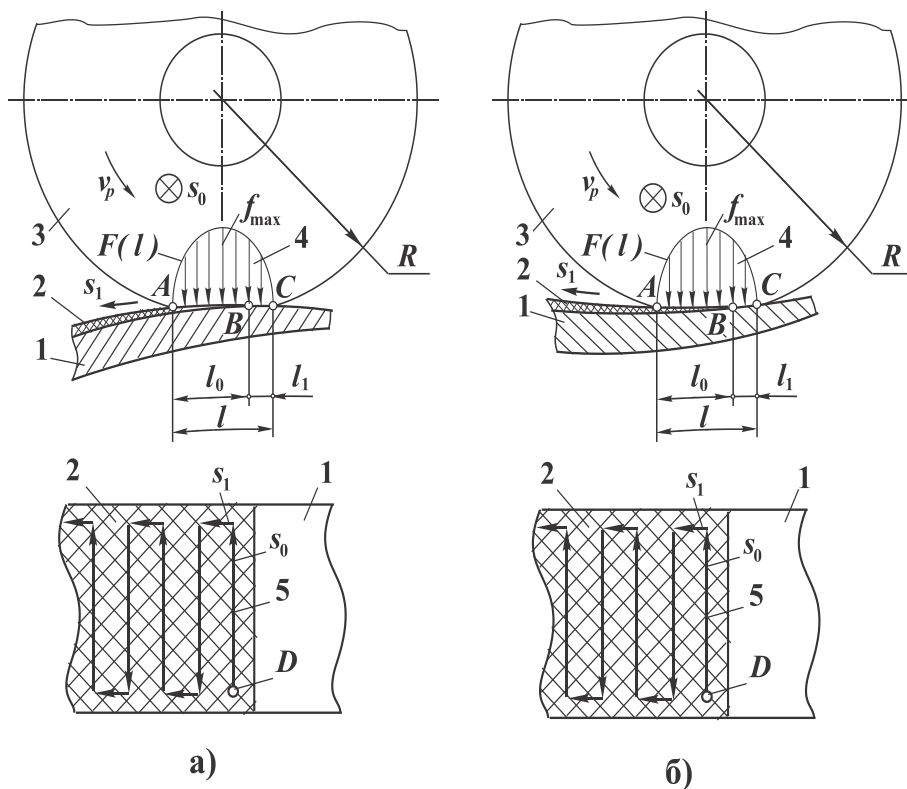


Рисунок. 3.9. Схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга по подаче s_o : а – полирование покрытия спинки, б – полирование покрытия корыта

чтобы 75% эпюра (расстояние от точки А до точки В) распределения удельного давления приходилось на нитрид титановое покрытие, а 25% эпюра (расстояние от точки В до точки С) распределения удельного давления приходилось на взаимодействие инструмента и основного материала пера лопатки. В этом случае основная часть нагрузки концентрируется на

нитрид титановом покрытии (более твердом материале в зоне AB), при этом инструмент как бы опирается на покрытие пера лопатки. Причем меньшая часть нагрузки – с меньшими удельными давлениями действует на основной материал по-

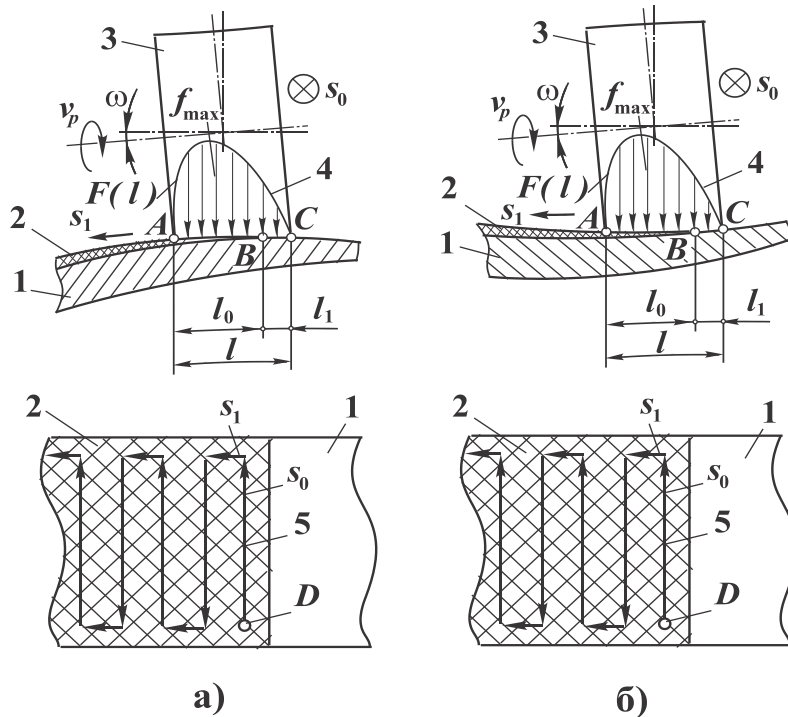


Рисунок 3.10. Схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга перпендикулярно подаче s_0 и перекосом ω : а – полирование покрытия спинки, б – полирование покрытия корыта

верхности пера лопатки в зоне BC . При этом удельное давление, приходящееся на основной материал пера лопатки должно быть примерно в 1,5 ... 2 раза меньше, чем удельное давление, действующее на материал покрытия. Это связано с тем, что нитрид титановое покрытие имеет микротвердость $H_\mu = 21 \dots 23$ ГПа, а основной материал пера лопатки (титановый сплав ВТ-8М) имеет микротвердость $H_\mu = 1,2 \dots 1,5$ ГПа и для обработки необходимы принципиально

различные удельные давления. Здесь точка D - исходная точка начала обработки покрытия пера лопатки.

На рис. 3.9 приведена схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга по подаче s_0 . Здесь, на рис. 3.9,а представлена схема полирования покрытия спинки, на рис. 3.9,б – схема полирования покрытия корыта. Основной особенностью одновременного полирования двух материалов является то, что зона взаимодействия полировального круга с полируемой поверхностью двух материалов распределяется из условия 75% по поверхности с покрытием и 25% по поверхность без покрытия. При этом макси-

мальное удельное давление действует в зоне покрытия. Это обеспечивает при обработке двух материалов усиленные удельные давления в зоне покрытия и смягченные режимы в зоне обработки поверхности без покрытия. При этом реализуется опорное полирование двух материалов с опорой инструмента на более твердый материал – нитрид титановое покрытие. Это исключает процесс продавливание полировального круга через покрытие в основной материал пера лопатки.

На рис. 3.10 приведена схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга перпендикулярно подаче s_0 и перекосом ω . Здесь, на рис. 3.10,а представлена схема полирования покрытия спинки, на рис. 3.10,б – схема полирования покрытия корыта лопатки. В представленной схеме полирования все позиции и обозначения аналогичны рис. 3.9. При этом процесс опорного полирования реализуется за счет перекоса оси ω полировального круга относительно полируемой поверхности лопатки.

Представленные схемы обработки позволяют вести подготовку поверхностей пера лопатки состоящих из двух принципиально различных материалов, а именно из титанового сплава и неразрушенного нитрид титанового покрытия, к нанесению нового нитрид титанового покрытия. При этом обеспечивать заданные параметры качества обработки пера лопатки ГТД.

Таким образом, выполненные исследования позволили следующее:

1. В представленной работе рассмотрены особенности износа ионно-плазменного покрытия поверхностей пера лопатки. При этом установлено, что при эксплуатации лопатки покрытие изнашивается не равномерно на ее поверхностях.
2. Исследованы особенности подготовки поверхностей пера лопатки имеющих разнородные материалы к напылению нового покрытия посредством полирования.
3. В работе разработаны схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки – титанового сплава.

4. Для нанесения нового нитрид титанового покрытия на оставшееся старое покрытие и основной материал поверхности - с одинаковыми свойствами, разработаны рекомендации по опорному одновременному полированию двух материалов и обеспечению близких параметров шероховатости на покрытии и на основном материале пера лопатки.

3.5. Выводы

Выполненные исследования позволили провести совершенствование технологического обеспечения для механической отделочной обработки пера лопатки компрессора ГТД. Эти исследования позволили установить следующее.

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

2. В работе разработана модель преобразования систем координат в процессе реального формообразования поверхностей пера лопатки компрессора при отделочной обработке. Эта модель позволяет решать вопросы формообразования поверхностей пера лопатки при их механической обработке с использованием кинематического метода исследований огибаемых поверхностей.

3. Установлена физическая сущность и особенности процесса полирования поверхностей пера лопаток компрессора из титановых сплавов без покрытий и с покрытиями. При этом выявлено, что при полировании изделий в зоне обработки одновременно действует целый ряд различных факторов [172]. А также показано, что 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 ло-

патов 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. При выполировке покрытия и предварительном полировании лопаток преобладает процесс резания, а при глянцеваии - пластическая деформация поверхностного слоя с химическими процессами.

4. Рассмотрены вопросы повышения эффективности полировки лопаток компрессора на основе принципа последовательной минимизации параметров на предшествующих переходах. Применение предлагаемого принципа последовательной минимизации отклонений в машиностроении для синтеза технологического процесса отделочной обработки лопаток позволяет повысить производительность обработки на 5-25% по сравнению с обычными традиционными подходами.

5. В работе предложено вести съём старых покрытий методом опорного полирования поверхностей пера лопатки компрессора, которые необходимо выполнять при восстановлении их работоспособности. Разработанные схемы обработки позволяют вести подготовку поверхностей пера лопатки состоящих из двух принципиально различных материалов, а именно из титанового сплава и старого нитрид титановые покрытия. При этом обеспечиваются заданные параметры качества обработки пера лопатки ГТД.

6. В работе выполнены исследования некоторых особенностей полировки криволинейных поверхностей лопаток компрессора из титановых сплавов для предварительного и окончательного размерного полирования. При этом разработаны схемы взаимодействия инструмента и криволинейных поверхностей лопатки.

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

ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД

4.1. Особенности и общие положения по напылению покрытий на базе функционально-ориентированного подхода

Одним из перспективных направлений повышения качества деталей машин является обеспечение их свойств на базе применения специальных покрытий [1, 4, 5, 83]. В настоящее время, существующие виды покрытий позволяют решать целое множество различных проблем, связанных с повышением качества деталей машин, а именно: снижают износ поверхностного слоя, коррозионные разрушения, окислительные процессы, солевые, кислотные и щелочные воздействия, эрозийные разрушения, уменьшают повреждаемость основного материала, повышают жаростойкость и параметры теплобарьерности деталей, снижают температурные воздействия на основной материал, улучшают внешний вид, решают проблемы декоративности и эстетики, а также целый комплекс других вопросов.

Для покрытий деталей машин используются различные материалы и их комбинации, составы и структуры веществ. При этом широко применяются металлические и интерметаллидные, композитные и композиционные покрытия, а также комплексные и комбинированные покрытия. Покрытия поверхностей деталей машин могут быть однослойными и многослойными [97, 99, 101, 123].

Для нанесения покрытий деталей машин применяется множество различных методов [165, 170]. К наиболее перспективным методам нанесения покрытий для лопаток компрессора можно отнести следующие: химическое осаждение (НТ-CVD), физическое осаждение (PVD), электролитический способ, газотермического напыления, электроискрового легирования, наплавки.

Рассмотрим особенности разрушений функциональных элементов лопатки компрессора ГТД при эксплуатации. Применение различных видов покрытий по-

звolyют существенно повысить эксплуатационные параметры лопаток и решить целый комплекс функциональных задач. Вместе с тем, обычно, процесс эксплуатации лопаток с покрытиями в ГТД связан со сложными особенностями разрушений, а именно:

1. Неравномерным износом поверхности лопатки.

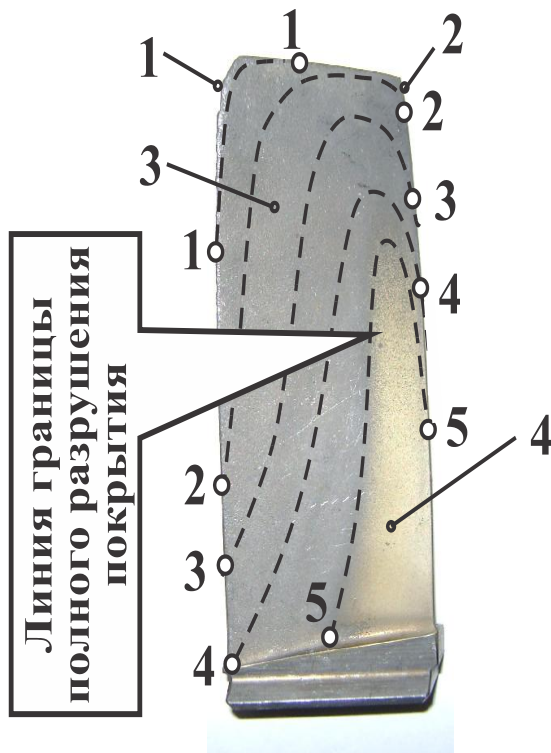


Рисунок 4.1. Схема неравномерного разрушения нитрида титанового покрытия поверхности пера лопатки: 1 — разрушения входной кромки пера, 2 — разрушения выходной кромки пера, 3 — поверхность без покрытия, 4 — поверхность с покрытием

2. Неравномерными коррозионно-эрозионными и другими разрушениями поверхности лопатки.

3. Действием неравномерной удельной контактной нагрузки по поверхности лопатки.

4. Действием неодинаковых эксплуатационных функций по различным поверхностям лопатки (не одинаковые параметры структуры эксплуатационных функций) и других особенностей эксплуатации.

Рассмотрим процесс неравномерного действия эксплуатационных функций для лопатки компрессора газотурбинного двигателя ТВ3-117. Здесь, по поверхности корыта пера лопатки действуют неравномерные эрозионно-коррозионные разрушения покрытия и основного материала тела лопатки (рис. 4.1).

Этот процесс обусловлен пространственной формой элементов лопатки и кинематикой её движения, особенностями движения газовых потоков в тракте двигателя и действием частиц пыли и жидкости. Разрушение покрытия на лопатке обычно начинается на входной кромке 1

пера в зоне пересечения входной и периферийной кромок. Далее, разрушение покрытия распространяется от этой зоны по входной кромке вниз к замку лопатки и по периферийной кромке к выходной кромке 2. Затем, от этих зон начинает разрушаться покрытие на поверхности корыта 3 лопатки, и потом покрытие остаётся только в зоне 4 поверхности корыта лопатки. На рис. 4.1 представлена схема разрушения нитрид титанового покрытия поверхности пера лопатки со стороны корыта в зависимости от длительности эксплуатации (штриховые линии показывают границы полного разрушения покрытия, которые изменяются во времени).

Таким образом, лопатки компрессора с покрытиями при эксплуатации разрушаются не равномерно. При этом даже при их длительной эксплуатации часть покрытия остается на поверхностях пера лопаток (рис. 4.1). 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.

Рассмотрим общий подход и принципы реализации ФОП лопаток компрессора ГТД. При эксплуатации лопатки на нее действует множество эксплуатационных функций, на каждую поверхность воздействуют неравномерные нагрузки, каждая зона действия удельных нагрузок имеет определенные топологические параметры, при этом действующие функции имеют определенную структуру. В этих условиях для обеспечения ФОС деталей необходимо определить соответствия между эксплуатационными функциями F , технологическими воздействиями TB и свойствами C изделия (рис. 4.2). Между эксплуатационными функциями F , технологическими воздействиями TB и свойствами C изделия действуют определенные связи [86], а именно: подобия, соответствия, идентичности, аналогии, эквивалентности и адекватности.

На рис. 4.2. представлена модель взаимосвязей φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C детали. На базе этих связей реализуются ФОП [86]. Здесь можно отметить, что структура

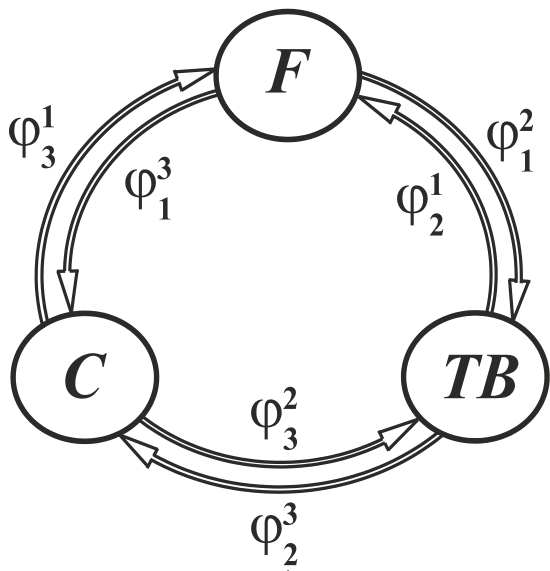


Рисунок 4.2. Модель взаимосвязей φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия $ТВ$ и свойства C лопатки компрессора ГТД

связей между элементами модели имеет замкнутую форму, которая позволяет определять параметры технологических воздействий и свойств детали в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на функциональные элементы детали. Все эти параметры определяются на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий [86].

ФОП могут иметь следующие свойства (рис. 4.3):

1. Изменяющиеся свойства (равномерно- и неравномерно-изменяющиеся, функционально-изменяющиеся, градиентные и другие) (рис. 4.3,а) в пределах каждой поверхности пера лопатки компрессора и/или структуры поверхностей пера лопатки компрессора.
2. Ступенчатые свойства (в одном направлении, в двух направлениях, широкие, средние, мелкие ступени и другие) (рис. 4.3,б) в пределах каждой поверхности пера лопатки компрессора и/или структуры поверхностей пера лопатки компрессора.
3. Зональные свойства (традиционные размеры зон, макро-зональные, микро-зональные, с изменяющимися свойствами по зонам и другие) (рис. 4.3,в) в пределах каждой поверхности пера лопатки компрессора и/или структуры поверхностей пера лопатки компрессора.
4. Пятнистые свойства (пятна больших, средних малых размеров, с разными или одинаковыми свойствами и другие) (рис. 4.3,г) в пределах каждой поверхности пера лопатки компрессора и/или структуры поверхностей пера лопатки.
5. Специальные свойства в пределах каждой поверхности пера лопатки компрессора и/или структуры поверхностей пера лопатки.

ФОП лопатки компрессора обеспечивают выполнение следующих особенностей эксплуатации при действии изменяющихся параметров функции по поверхности и неодинаковым структурным составляющим множества функций по поверхности лопатки:

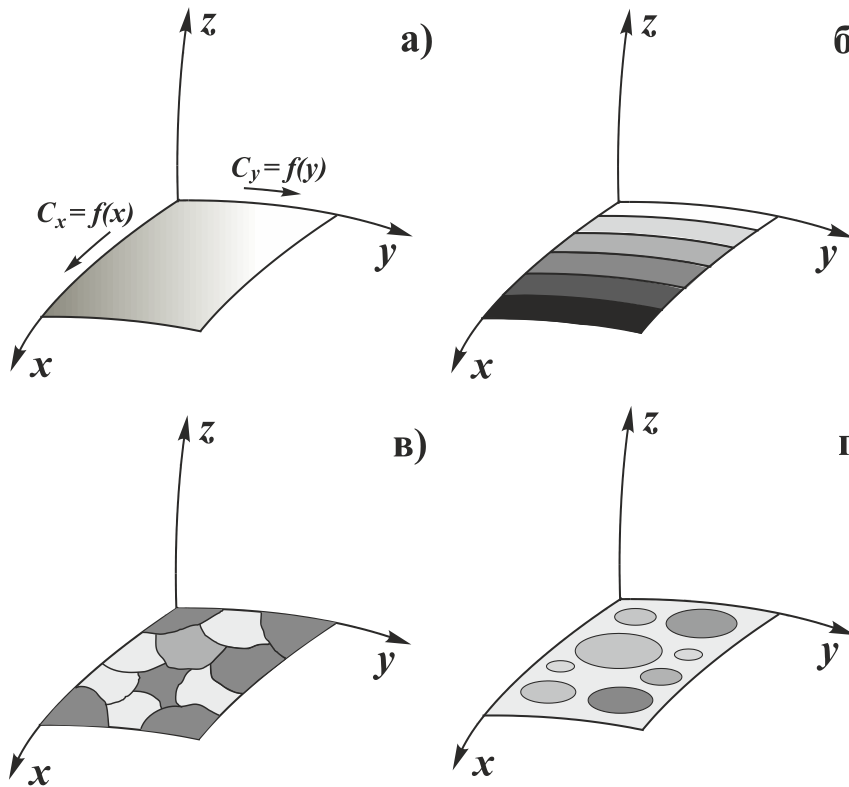


Рисунок 4.3. Гипотетические варианты однослойных ФОП

б) в) г) верхности и неодинаковых структурных составляющих множества функций по поверхности лопатки:

1. Полную адаптацию лопатки при изготовлении к особенностям ее эксплуатации в машине или технологической системе.

2. Предельный эксплуатационный потенциал лопатки в ГТД или кратный предельному эксплуатационному потенциалу (величина кратности определяется проектировщиком).

3. Единовременный полный износ всего покрытия на поверхности лопатки в заданный период ее эксплуатации.

4. Единовременный полный износ всех видов покрытий на всех поверхностях лопатки.

5. Качественно новую совокупность свойств лопатки при эксплуатации и другие особенности.

6. Качественно новую совокупность свойств лопатки при эксплуатации и другие особенности.

4.2. Технологическое и структурное обеспечение реализации функционально-ориентированных покрытий

Можно отметить, что процессы нанесения функционально-ориентированных покрытий рабочих поверхностей пера лопатки можно выполнять различными методами. Перечислим наиболее перспективные методы реализации ФОП функциональных элементов пера лопаток:

1. Метод нанесения функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий [89, 90, 92].
2. Метод нанесения функционально-ориентированных детонационных покрытий.
3. Метод формирования 3D ФОП (легированных слоев), работающее на подобию печатающего принтера с обеспечением заданного «рисунка» свойств.
4. Другие методы нанесения ФОП.

Этими методами можно реализовывать множество различных вариантов функционально-ориентированных покрытий.

Рассмотрим более детально процесс реализации одного из возможных вариантов ФОП лопатки компрессора ГТД.

На рис. 4.4 представлена схема разрушения старого и последовательного формирования многослойного ФОП на 6-ти этапах – по одному на каждом. На схеме разрушения старого покрытия показана зона начала полного разрушения покрытия $1-a_1-b-1^I$, которая последовательно распространяется до зоны $2-1-a_1-b-1^I-2^I-a_2$, затем до зоны $3-2-1-a_1-b-1^I-2^I-3^I-a_3$ и так далее до зоны $5-4-3-2-1-a_1-b-1^I-2^I-3^I-4^I-5^I-a_n$. В соответствии с этими особенностями разрушения покрытия при эксплуатации лопатки в работе предлагается последовательно формировать многослойное покрытие с топологической ориентацией каждого слоя покрытия на поверхности пера лопатки, в соответствии с особым принципом ориентации покрытия. В этом случае ФОП формируется с использованием специальных экранирующих матриц, сформированных на базе выражений (П1.1), (П1.2) и (П1.3).

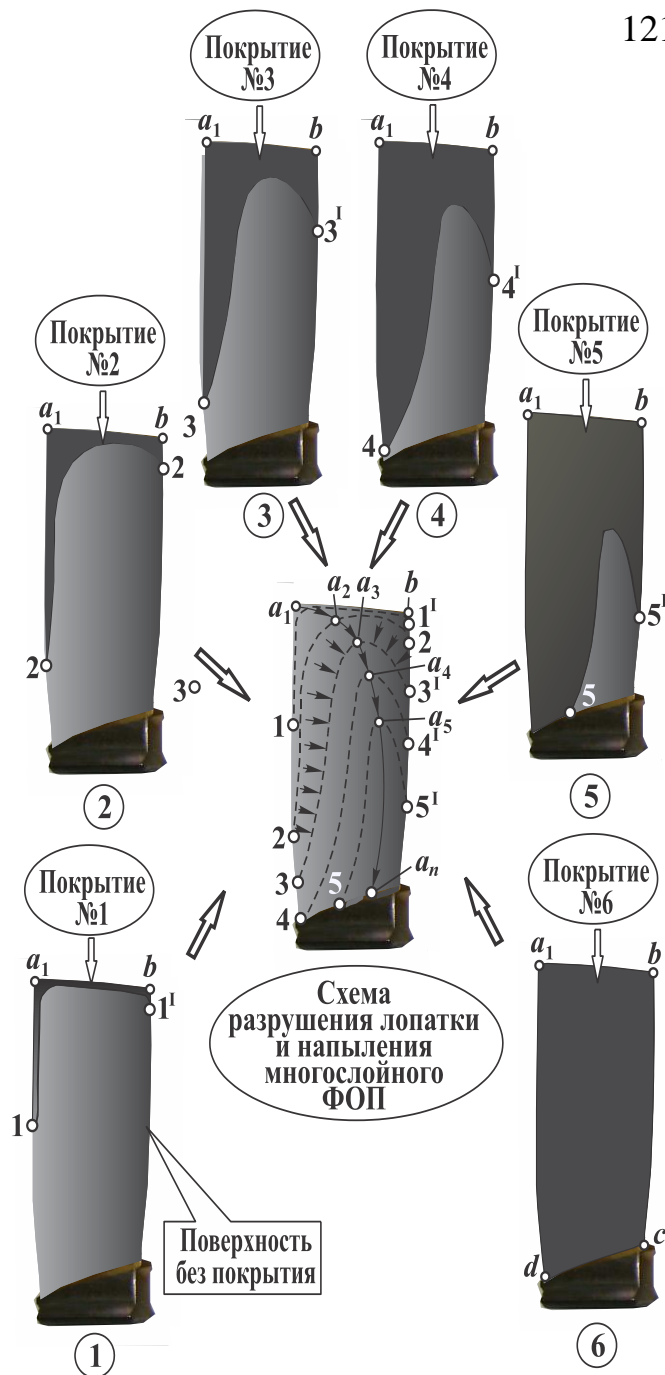


Рисунок 4.4. Схема формирования многослойного ФОП лопатки компрессора

прессора ГТД. Это позволяет в длительный период времени исключить возможность разрушения основного материала пера лопатки и одновременно повысить технико-экономические показатели их восстановления.

Рассмотрим некоторые варианты технологического обеспечения для реализации ФОС лопаток. Для реализации ФОП необходимо технологическое обеспечение, а именно технологические установки обеспечивающие нанесение покры-

Таким образом, многослойное ФОП формируется в результате последовательного нанесения однослойных покрытий на каждом этапе с учетом выражения (2.1) и топологической ориентации покрытия (П1.2) каждого слоя (рис. 4.4). Здесь, наносится покрытие №1 с топологической ориентацией его на поверхности в соответствии со схемой износа, затем покрытие №2, далее покрытие №3 и так далее, в конце наносится покрытие на все поверхности пера лопатки. В этом случае, свойства каждого покрытия может определяться в соответствии с выражением (П1.3).

Многослойные покрытия, сформированные в соответствии с выражениями (П1.1), (П1.2) и (П1.3) обладают свойством единовременного полного разрушения в заданный период эксплуатации лопаток ком-

тий на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и обеспечения свойств лопаток компрессора.

Для реализации ФОП функциональных элементов лопаток компрессора созданы специальные установки:

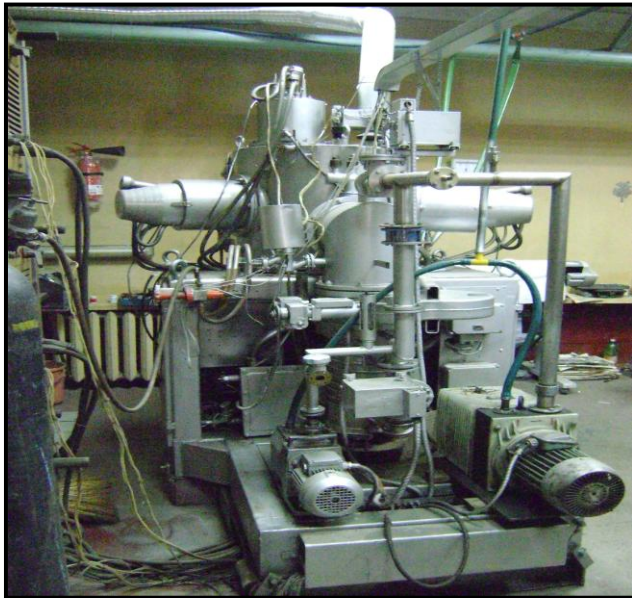


Рисунок 4.5. Установка для нанесения вакуумных ионно-плазменных ФОП

1. Установка для вакуумного ионно-плазменного напыления ФОП, выполненная на базе модернизированной системы ННВ 6.6-И1 (рис. 4.5).

2. Специальная детонационная установка для напыления ФОП.

3. Устройство, для формирования 3D ФОП (легированных слоев), работает по принципу печатающего принтера с обеспечением заданного «рисунка» свойств. Предлагаемое устройство (рис. 4.6) работает на базе электроискрового легирования поверхностного слоя детали с обеспечением ФОС.

На рис. 4.5 представлена установка для вакуумного ионно-плазменного напыления ФОП, выполненная на базе модернизированной системы ННВ 6.6-И1. На этой установке обеспечивается возможность реализации ФОП для различных деталей машин.

Для обеспечения ФОС лопаток компрессора может использоваться специальная детонационная установка для напыления ФОП. Данная установка специально модернизирована для реализации функционально-ориентированных покрытий и имеет три натекаателя, а также содержит специальные мехатронные устройства для точной подачи различных газов или их смесей. Она позволяет наносить вакуумные ионно-плазменные покрытия различных металлов и их сплавов, а также композиционные покрытия.

В специальной детонационной установке (общий вид установки в данной работе не представляется), ФОС покрытия формируется за счет наличия в установке трех дозаторов и накопителей для различных видов порошковых материалов и смешивания их в установке в определенной пропорции в зависимости от действия эксплуатационных функций.

При работе установки ствол заполняется смесью газов, способных детонировать, при этом в ствол подается заданная навеска смеси порошковых материалов, состав которой изменяется в соответствии с особенностями структуры ФОП, и срабатывает воспламенитель (свеча поджига). При этом горение газов переходит в детонацию. Детонационная волна представляет собой комплекс ударной волны и зоны химической реакции. Детонационная волна перемещается по стволу установки со сверхзвуковой скоростью.

При истечении по стволу установки продукты детонации увлекают разогретые напыляемые частицы смеси порошкового материала и происходит процесс напыления покрытия. При этом имеет место процессы их плавления и испарения. При нанесении покрытий детонационные процессы повторяются с частотой до 5 ... 10 выстрелов в секунду. При этом обеспечивается возможность изменять свойства покрытия в зависимости от особенностей смешивания порошкового материала из трех дозаторов и накопителей, процесс смешивания которых определяется свойствами ФОП, определяемыми выражением (4.3) (см. далее). В процессе нанесения ФОП происходит горячее прессование заданного слоя покрытия из различных материалов.

На рис. 4.6 представлено устройство для формирования 3D ФОП (легированных слоев). Здесь показано: рис. 4.6,а – схема устройства, рис. 4.6,б – зона и элементы для формирования покрытий, рис. 4.6,в – схема покрытия с изменяющимися 3D-свойствами.

Предлагаемое устройство (рис. 4.6) работает по принципу печатающего принтера с обеспечением заданного «рисунка» свойств. При этом выполняется электроискровое легирование поверхностного слоя детали с обеспечением ФОС. Устройство содержит следующие элементы: 1 – деталь или лопатка (катод); 2 –

система блоков инструментов; 3, 4, 5, 6 – блоки инструментов; 7, 8, 9, 10 – сменные легирующие инструменты (электроды - аноды), выполненные например из четырех различных материалов: 7 – из молибдена, 8 – из вольфрама, 9 – из ванадия, 10 – хрома; 11 – сердечник катушки; 12 – катушка (соленоид); 13 – пружина (упругий элемент); 14 – регулятор положения электрода, обеспечивающий заданную амплитуду его вертикального возвратно-поступательного движения; 15 – направляющие для продольных возвратно-поступательных движений системы блоков инструментов; 16 – электрическая дуга между электродами при электроискровом легировании; 17 – единичная зона включения одного легирующего металла на поверхности детали (диаметром r); 18 – один поверхностный слой легирующих металлов с множеством зон их включений.

Можно отметить, что на базе предлагаемой установки (рис. 4.6) механизм формирования легированного слоя покрытия осуществляется вследствие как перенесения и взаимодействия материала электродов, так и теплового действия искрового разряда. При этом заданные свойства поверхностного слоя покрытия могут реализовываться как за счет отдельных материалов анодов, так и посредством сочетаний смеси материалов четырех анодов.

Работа предлагаемого устройства (рис. 4.6) может выполняться на базе нескольких схем. На рис. 4.7 представлены варианты схем трассирования инструмента относительно детали (развертка). Здесь показано: рис. 4.7,а – движение B_1 периодически, движение $П$ возвратно-поступательное; рис. 4.7,б – движение B_2 возвратно-вращательное, движение $П$ возвратно-поступательное; рис. 4.7,в – движение B_3 постоянное вращательное, движение $П$ возвратно-поступательное.

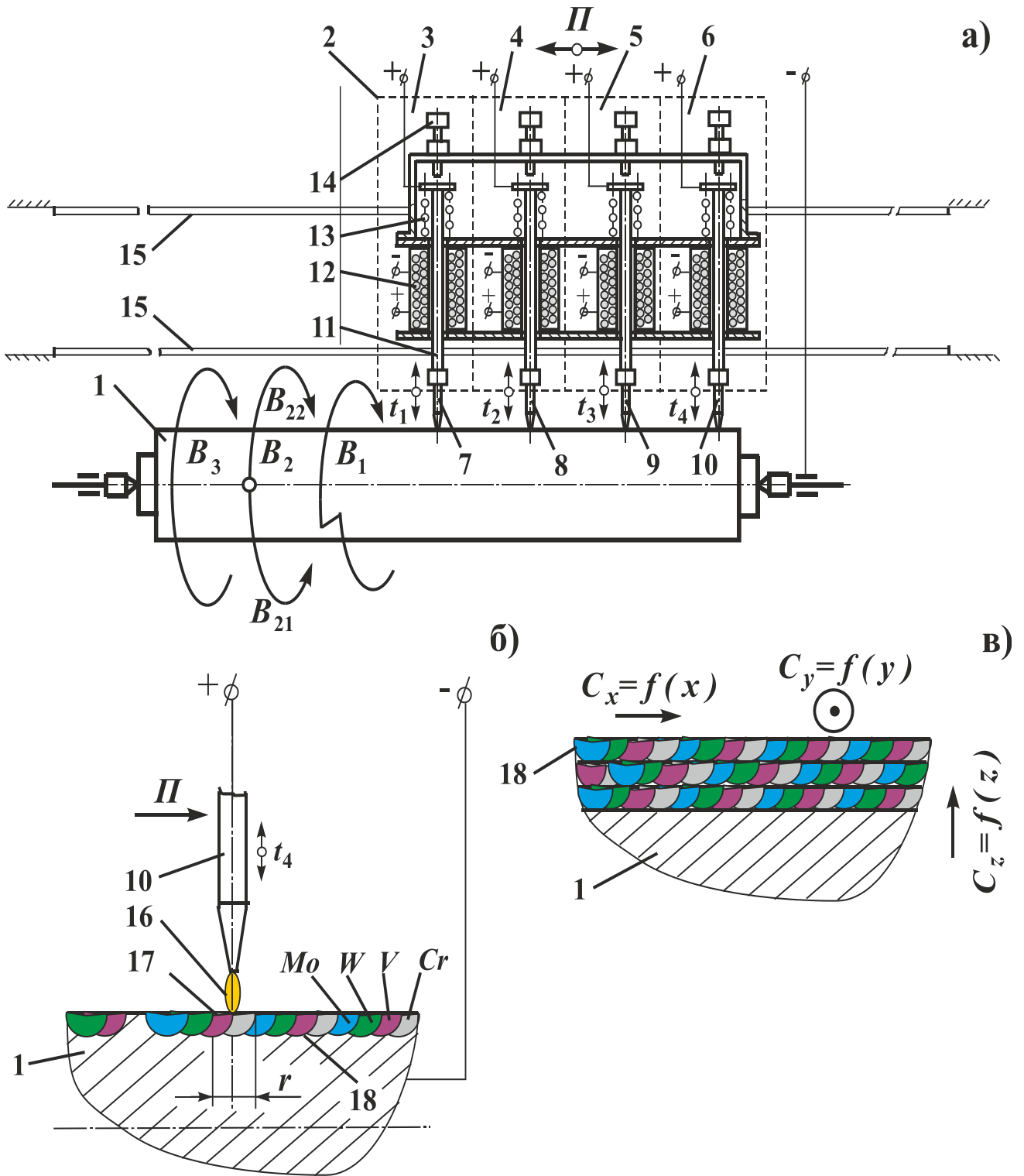


Рисунок 4.6. Устройство для формирования 3D-функционально-ориентированных покрытий (легированных слоев): а – схема устройства, б – зона и элементы для формирования покрытий, в – схема покрытия с изменяющимися 3D-свойствами

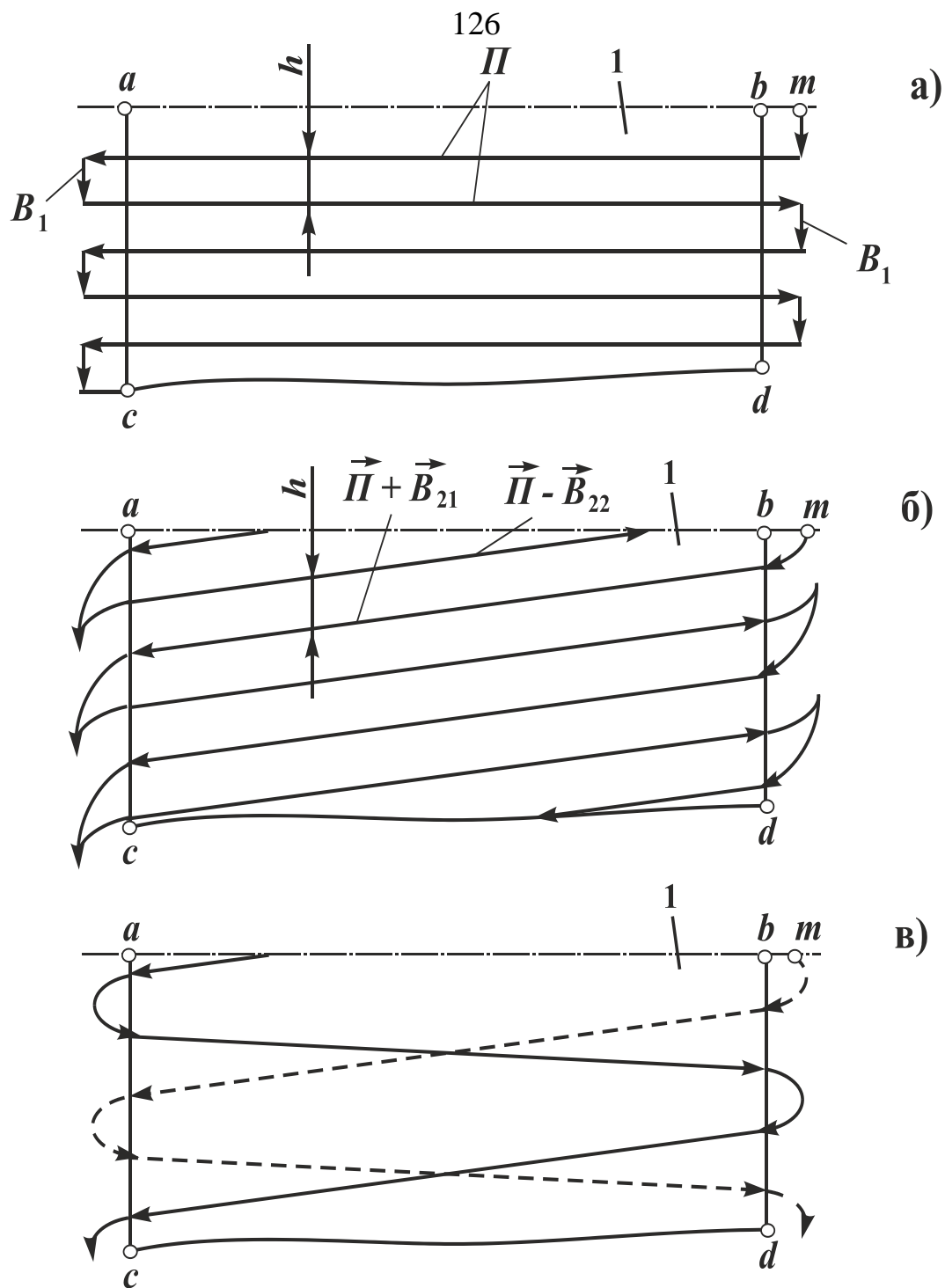


Рисунок 4.7. Варианты схем трассирования инструмента относительно детали (развертка): а – движение B_1 периодически, движение Π возвратно-поступательное; б - движение B_2 возвратно-вращательное, движение Π возвратно-поступательное; в - движение B_3 постоянное вращательное, движение Π возвратно-поступательное

Следует отметить, что для реализации ФОП может применяться большое множество методов и вариантов установок. Это зависит от особенностей конкретной детали, параметров ФОП, кинематики движений, метода реализации покрытия и множества других условий.

4.3. Особенности подготовки лопаток к напылению специальных покрытий на базе ультразвуковых воздействий

Ультразвуковая обработка лопаток компрессора является эффективным методом удаления загрязнений, очистки оксидных и нитридных покрытий с поверхностей. Приведем некоторые данные по ультразвуковой обработке.

Ультразвук – это механические колебания материальной среды (воздуха, газов, жидкостей и др.) с частотой более 16 кГц, которые распространяются в ней в виде волн. Верхний предел частот ультразвуковых колебаний составляет $10^9 \dots 10^{13}$ Гц и граничит с гиперзвуковыми частотами, которые соизмеримы с тепловыми колебаниями молекул твердых тел. Нижняя граница области ультразвуковых частот, отделяющая ее от диапазона слышимого звука, является условной и определяется субъективными свойствами слухового восприятия. Физическая природа всех звуков едина. Поэтому излучение и распространение ультразвуковых колебаний, как и колебаний других частотных диапазонов (инфразвук, звук), подчиняется общим законам линейной акустики. Вместе с тем, важной особенностью ультразвука, определившей его широкое применение в различных областях науки и техники, является возможность получения направленного, хорошо сфокусированного излучения высокой интенсивности. Кроме того, при прохождении ультразвуковых колебаний в среде возникают специфические эффекты, которые широко используются для технологических целей [176].

Поэтому исследование вопросов применения ультразвуковых колебаний для обработки лопаток компрессора и обеспечения их очистки перед нанесением вакуумных ионно-плазменных покрытий представляет особый интерес для технологии машиностроения. Можно отметить, что вопросы теории колебаний, в том

числе и ультразвуковых, достаточно подробно изложены в специальной литературе. Здесь приведены только специальные сведения, связанные с его технологическим применением для ультразвуковой обработки лопаток компрессора.

Для выполнения ультразвуковой обработки лопаток компрессора были спроектированы и изготовлены специальные ультразвуковые ванны. На рис. 4.8 представлена установка для комплексной ультразвуковой обработки лопаток компрессора. В качестве источника колебаний применена установка ультразвуковых колебаний УЗГ 3-4 и магнитострикционные преобразователи ПМС 2,5-18, смонтированные на днище специальных ванн. Ультразвуковые ванны (рис. 4.8) спроектированы и изготовлены специально для ультразвуковой очистки лопаток



Рисунок 4.8. Установка для ультразвуковой обработки лопаток ГТД компрессора. Обезжиривание выполнялось путем погружения лопаток сора в раствор при температуре 50-60 °С. Состав раствора: тринатрийфосфат технический – 30-40 г/л; сода кальцинированная техническая 20-30 г/л; поверхностно активное вещество ОП-7 или ОП-10 – 3,5 г/л. Дополнительно здесь может применяться бензин «Галоша» (БР-1) ГОСТ 443-76 с последующей промывкой в спирте этиловом ректификационном.

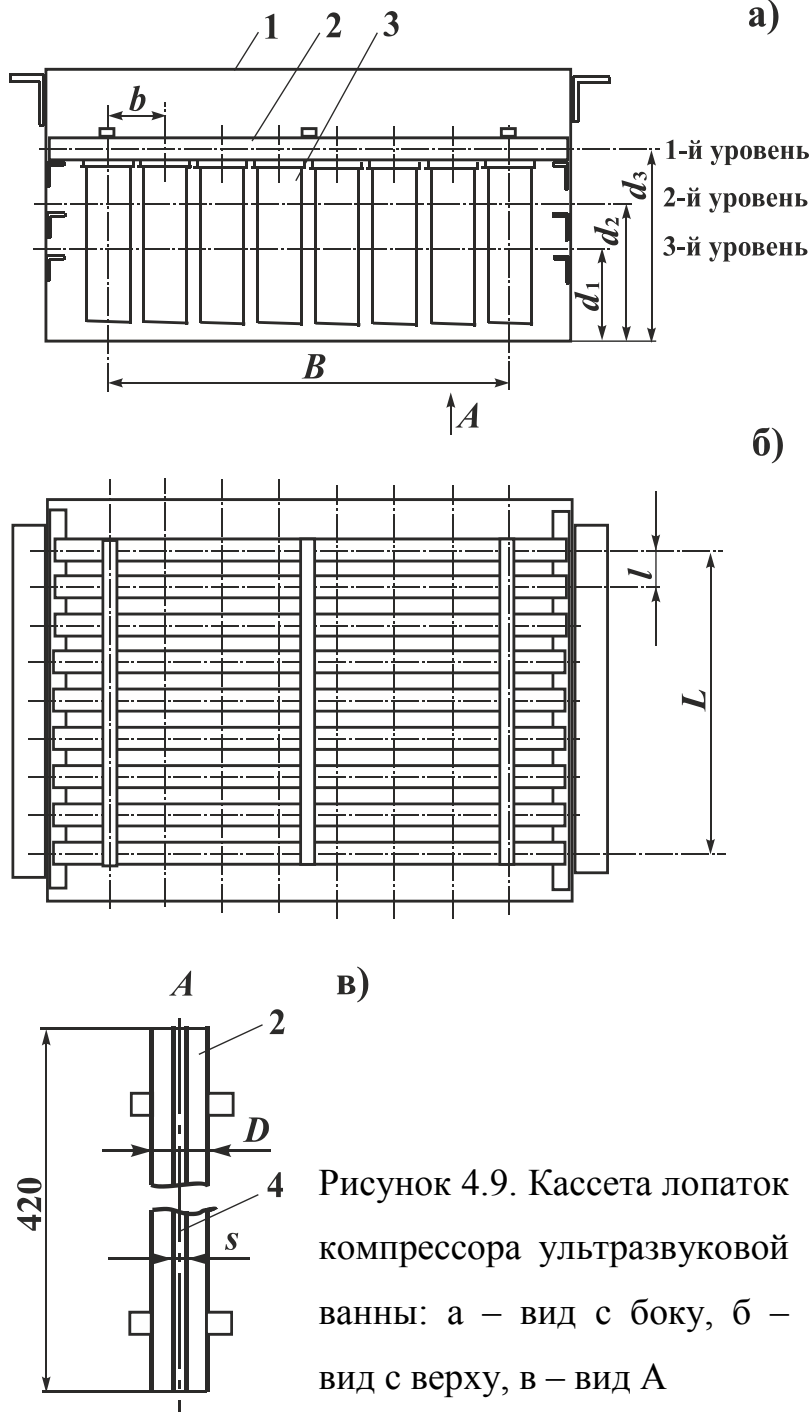


Рисунок 4.9. Кассета лопаток компрессора ультразвуковой ванны: а – вид с боку, б – вид с верху, в – вид А

- а) Для повышения производительности ультразвуковой обработки лопаток компрессора применяется специальная кассета. На рис. 4.9 представлена кассета лопаток компрессора ультразвуковой ванны.
- б) Здесь показано: рис. 4.9,а – вид с боку; рис. 4.9,б – вид с верху; рис. 4.9,в – вид А. На рис. 4.9 позиции обозначают следующие элементы: 1 – корпус кассеты, 2 – направляющая для установки лопаток, 3 – лопатка компрессора, 4 – продольный паз направляющей. Кассета имеет 3 уровня установки лопаток, а именно: 1-й уровень – для лопаток 1, 2, 3 ступеней; 2-й уровень – для лопаток 4, 5, 6, 7 ступеней; 3-й уровень – для лопаток 8, 9, 10, 11, 12 ступеней.

Цикловая производительность ультразвуковой обработки лопаток компрессора с использованием кассеты определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{ц}} = \frac{B L}{(t_o + t_e) b l}, \quad (4.1)$$

где $P_{\text{ц}}$ – цикловая производительность ультразвуковой обработки лопаток компрессора;

B, L, b, l – геометрические параметры кассеты (рис. 4.9);

t_o - основное время ультразвуковых воздействий установки при обработке лопаток компрессора (определяется на основании графика рис. 4.10);

t_e - вспомогательное время (длительность загрузки и выгрузки лопаток компрессора из ультразвуковой ванны, для разработанных кассет – 10 ... 15 мин).

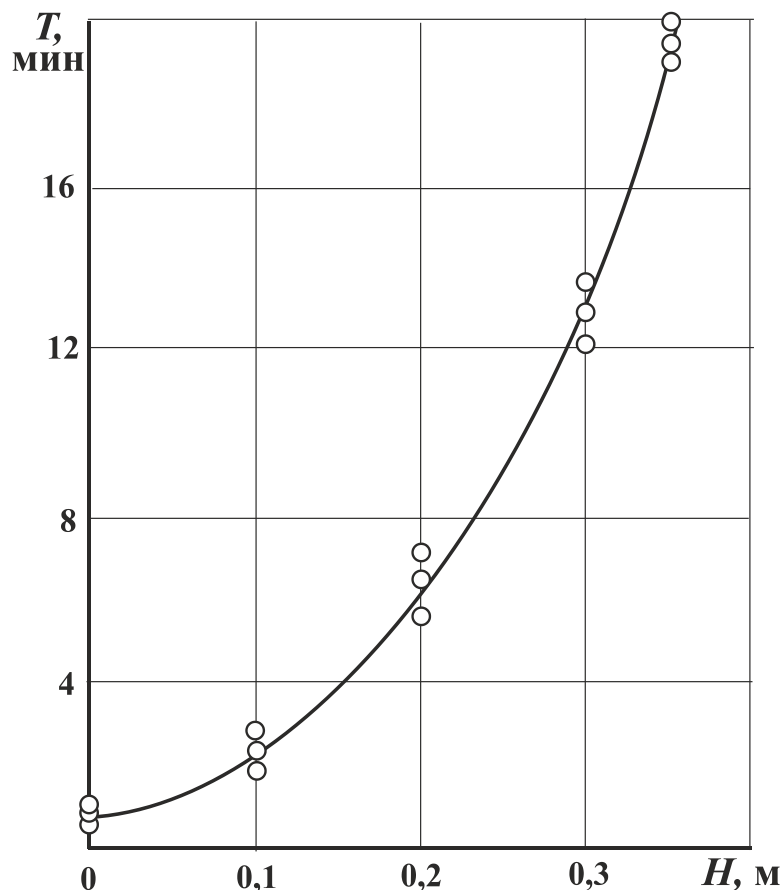


Рисунок 4.10. Зависимость длительности ультразвуковых воздействий от высоты расположения листа алюминиевой фольги в ультразвуковой ванне в условиях разрушения 80 ... 90% ее поверхности

Время ультразвуковой обработки лопаток компрессора может определяться в соответствии с графиком рис. 4.10. Здесь, в зависимости от высоты загрузки ванны ультразвуковой установки и особенностей разрушения алюминиевой фольги, а следовательно, и разрушения различных видов загрязнений, выбирается длительность ультразвуковой обработки изделий. Выполненные исследования показывают, что качественная очистка, удаление окисных и нитридных пленок с поверхностей лопатки происходит при длительности обработки соответствующей времени разрушения 80 – 90 % поверхности

алюминиевой фольги. На основании этого, например, если ультразвуковая ванна загружена лопатками компрессора по высоте $H = 0,2$ м (по верхнему краю группы изделий) на основании графика рис. 4.10 длительность обработки будет

составлять $T(0,2) = 6$ мин. Необходимая длительность ультразвуковой обработки лопаток компрессора определяется по следующей формуле:

$$t_0 = T(H), \quad (4.2)$$

где t_0 - необходимая длительность ультразвуковой обработки изделий;

$T(H)$ - длительность технологических воздействий в зависимости от высоты H загрузки ультразвуковой ванны.

График рис. 4.10 построен из условия разрушения 80 ... 90 % поверхности алюминиевой фольги по высоте моющего вещества ультразвуковой ванны в зависимости от длительности технологических воздействий ультразвуковой обработки. Выполненные исследования показывают, что при разрушении 80 ... 90 % поверхности алюминиевой фольги (рис. 4.11) разрушаются основные виды загрязнений, оксидные и нитридные пленки на поверхностях пера лопатки компрессора. Поэтому данный график является основополагающим для определения параметров ультразвуковой обработки лопаток компрессора.

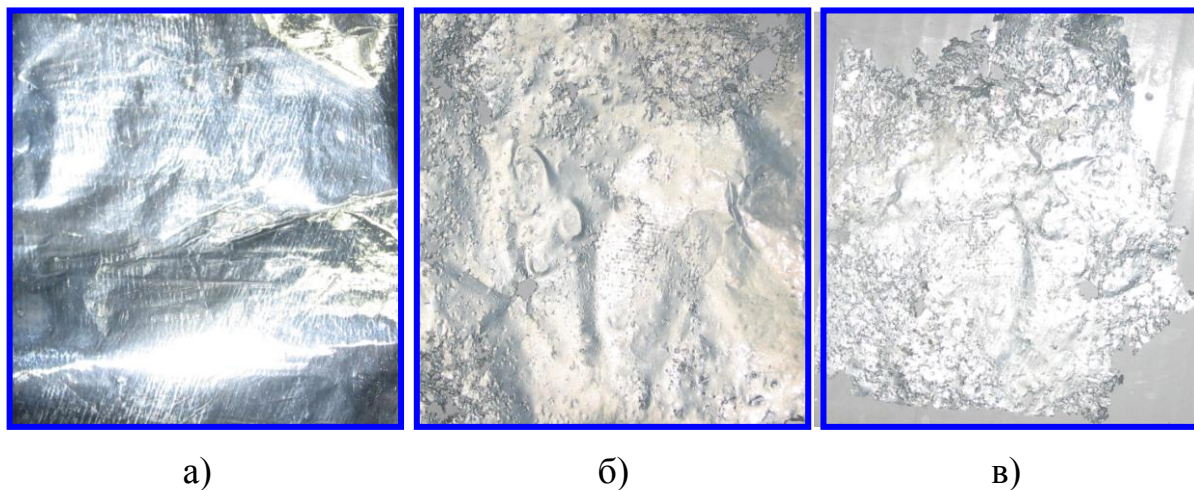


Рисунок 4.11. Общий вид поверхности алюминиевой фольги при ультразвуковых воздействиях в установке (расстояние до поверхности магнито-стрикционной головки 0,1 м, частота колебаний 18 кГц):

На рис. 4.11 показан общий вид поверхности алюминиевой фольги при ультразвуковых воздействиях в установке (расстояние до поверхности магнито-стрикционной головки 0,1 м, частота колебаний 18 кГц). Здесь показано: рис. 4.11,а

– до обработки, рис. 4.11,б – обработка 60 секунд, рис. 4.11,в – обработка 120 секунд.

Для изучения особенностей влияния ультразвуковой обработки на поверхность лопаток компрессора выполнены исследования состояния поверхности после выполнения ультразвуковых технологических воздействий. На рис. 4.12 представлен общий вид полированных поверхностей ($R_a = 0,025 \dots 0,063$ мкм, глянце-вание), материал ВТ-8М (увеличение $\times 150$ раз): 4.12,а – до ультразвуковой обработки, 4.12,б – после ультразвуковой обработки (расстояние до поверхности маг-

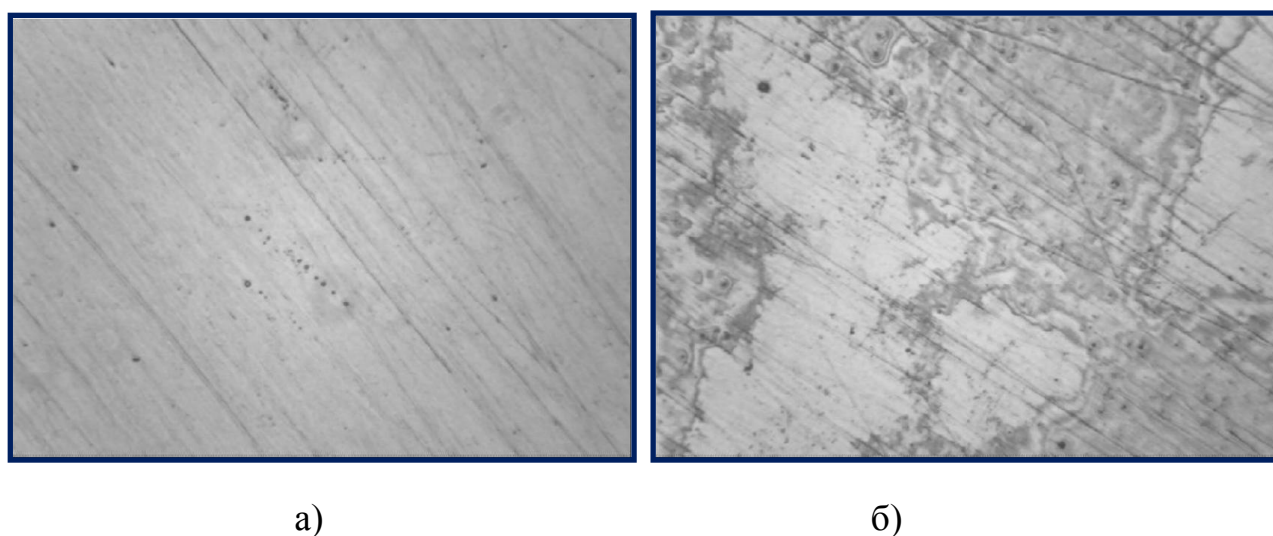


Рисунок 4.12. Общий вид полированных поверхностей, материал ВТ-8М (увеличение $\times 150$ раз): а – до ультразвуковой обработки, б – после ультразвуковой обработки (расстояние до поверхности магнитострикционной головки 0,1 м; частота колебаний 18 кГц; время обработки 120 с.)

нитострикционной головки 0,1 м; частота колебаний 18 кГц; время обработки 120 с.).

Таким образом, выполненные исследования позволили установить, что ультразвуковая обработка лопаток компрессора является одним из основных высокопроизводительных методов их очистки от загрязнений перед выполнением вакуумного ионно-плазменного напыления покрытий. Без реализации ультразву-

ковой обработки лопаток компрессора невозможно выполнение процесса нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий.

4.4. Универсальная структура технологического процесса напыления покрытий. Синтез структурных вариантов

Каждый технологический процесс можно описывать структурированным множеством операций. При этом процесс проектирования таких технологических процессов может иметь многовариантные решения по структуре и эффективности. Это зависит от особенностей технологической структуры процесса. Поэтому далее будет рассмотрен вопрос, связанный с особенностями синтеза структурных вариантов технологических процессов напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий поверхностей лопаток компрессора (изделий) [87, 94].

Гипотетическая модель технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий реализует функцию φ преобразования N множества входов процесса $V = \{V_k\}$ в множество выходов $W = \{W_m\}$, которая описывается отображением $\varphi : \{V_k\} \rightarrow \{W_m\}$.

Каждый технологический процесс напыления покрытия на поверхности изделия может состоять из n операций. Операция это законченная часть технологического процесса, выполняемая в процессе преобразования изделия. Согласованная совокупность операций представляет собой технологический процесс. Структура технологического процесса зависит в первую очередь от технологии и представляет собой иерархические образования, которые можно разделить на операции.

Понятие структура технологического процесса характеризует внутреннюю организацию, порядок и построение технологического процесса напыления покрытия на изделия. Представляя операции технологического процесса как совокупность элементов и отношений между ними, строится математическая модель структуры. Если $T = \{t_1, t_2, \dots, t_s\}$ есть множество элементов (операций) техноло-

гического процесса, а $A = \{a_1, a_2, \dots, a_x\}$ - множество отношений, то структура технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных

покрытий на поверхности изделия представляет собой множество, состоящее из T и A :

$$Str_T = \{T, A\}, \quad (4.3)$$

где Str_T - структура технологического процесса;

T - множество подпроцессов;

A - множество отношений.

Технологический процесс напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий задается структурой. При этом технологический процесс с заданной структурой имеет однозначный алгоритм преобразования заготовки в изделие. Заметим, что алгоритм преобразования заготовки в изделие не определяет однозначно структуру технологического процесса, так как один и тот же алгоритм преобразования может реализовываться различными способами. Понятие отношения служит в математике [79] для выражения на теоретико-множественном языке связей между объектами. Обобщением понятия отношения является соответствие.

При построении технологических процессов напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделия особое значение имеют следующие отношения: с помощью математических функций, пространственные отношения и временные отношения [79].

Отношения с помощью математических функций. Это класс отношений, который выражает математические функции как закономерные зависимости от переменной. Такого рода математические функции представляют точно установленное отношение между элементами с детерминированной связью.

Пространственные отношения характеризуют взаимное положение элементов в пространстве и определяют границы объемно-пространственной структуры пространственно-функциональной единицы технологического процесса.

Временные отношения описывают упорядочение процессов и событий во времени. Кроме того, в практике проектирования технологических процессов зна-

чительную роль при принятии конкретных решений играют также отношения подобия, аналогии, гомоморфизма, изоморфизма, идентичности, эквивалентности, логики и другие.

Для наглядности структура технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделия может быть представлена с помощью графа $G(T, A)$, где T – множество вершин графа, отражающих множество элементов (операций) технологического процесса; A – набор упорядоченных и неупорядоченных пар вершин, отражающих отношения элементов. Неупорядоченная пара вершин называется ребром, упорядоченная пара – дугой. Граф, содержащий только ребра, называется неориентированным, а граф, содержащий только дуги – ориентированным. Более детальные рекомендации по представлению графов для технологических процессов приведены в работе [79].

На рис. 4.13 представлен граф универсального технологического процесса нанесения покрытия на поверхности изделия [87, 94]. Здесь последовательно показаны все возможные операции t_1, t_2, \dots, t_{10} , где 10 – общее количество возможных операций технологического процесса. С помощью ориентированных ребер a_1, a_2, \dots, a_x , где x – общее количество ориентированных ребер графа, показаны возможные связи между операциями технологического процесса напыления покрытий на поверхности изделия. Любое из ребер можно представить следующим

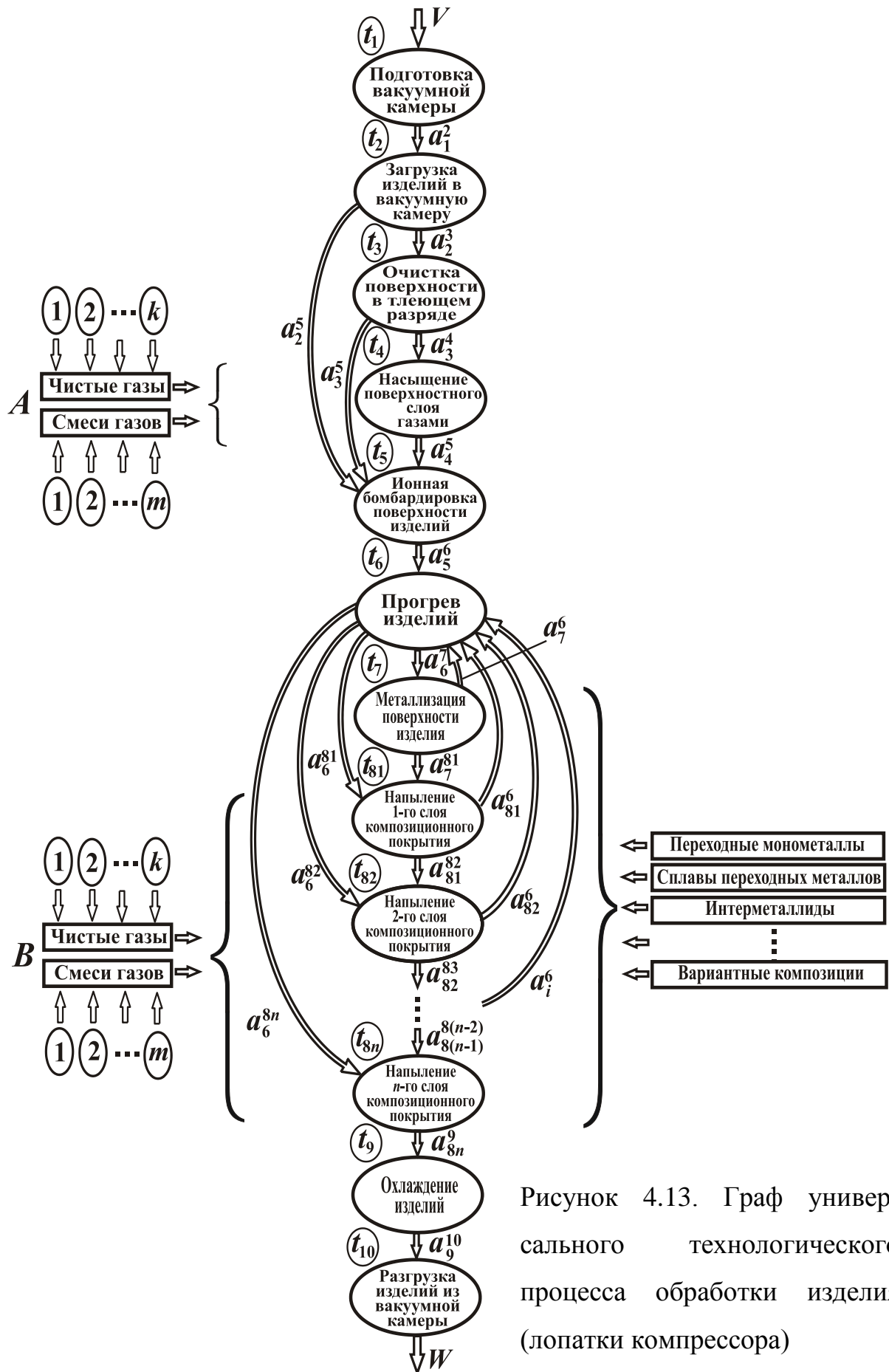


Рисунок 4.13. Граф универсального технологического процесса обработки изделия (лопатки компрессора)

обозначением $a_y = a_i^j$, где i - любая данная операция технологического процесса, а j - любая последующая операция технологического процесса.

Разработанный граф технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделий, представленный на рис. 4.13, является универсальным, так как он учитывает все возможные варианты структуры технологического процесса. На базе этого универсального графа технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий выполняется синтез конкретных вариантов технологических процессов. Здесь варьируемые параметры могут быть следующие операции технологического процесса:

- очистка поверхности изделия в тлеющем разряде t_3 ;
- насыщение поверхностного слоя изделия газами t_4 , этот процесс может выполняться с помощью чистых газов или их смесей (позиция A (рис. 4.13));
- металлизация поверхности изделия, этот процесс может выполняться с помощью монометаллов, сплавов металлов, интерметаллидов или их вариантных композиций (катоды);
- количество слоев композиционного покрытия, этот процесс выполняется на базе композиции вещества катодов и газов (позиция B).

Варьируя эти параметры универсального технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий можно создавать конкретные варианты технологических процессов напыления покрытий варьируемых по функциональным свойствам.

Можно отметить, что для обеспечения заданных параметров качества и производительности необходимо выполнять синтез рациональных вариантов структуры технологического процесса нанесения ионно-плазменного покрытия на изделия. Рассмотрим более детально этот процесс.

Граф универсального технологического процесса нанесения покрытия на изделия, представленный на рис. 4.13, можно представить с помощью двух этапов. Первый этап универсального технологического процесса состоит из следую-

щих операций $t_A = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$, второй этап универсального технологического процесса – из следующих операций $t_B = \{t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}\}$.

Рассмотрим особенности проектирования первого этапа технологического процесса. На рис. 4.14. представлены структурные варианты 1-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке.

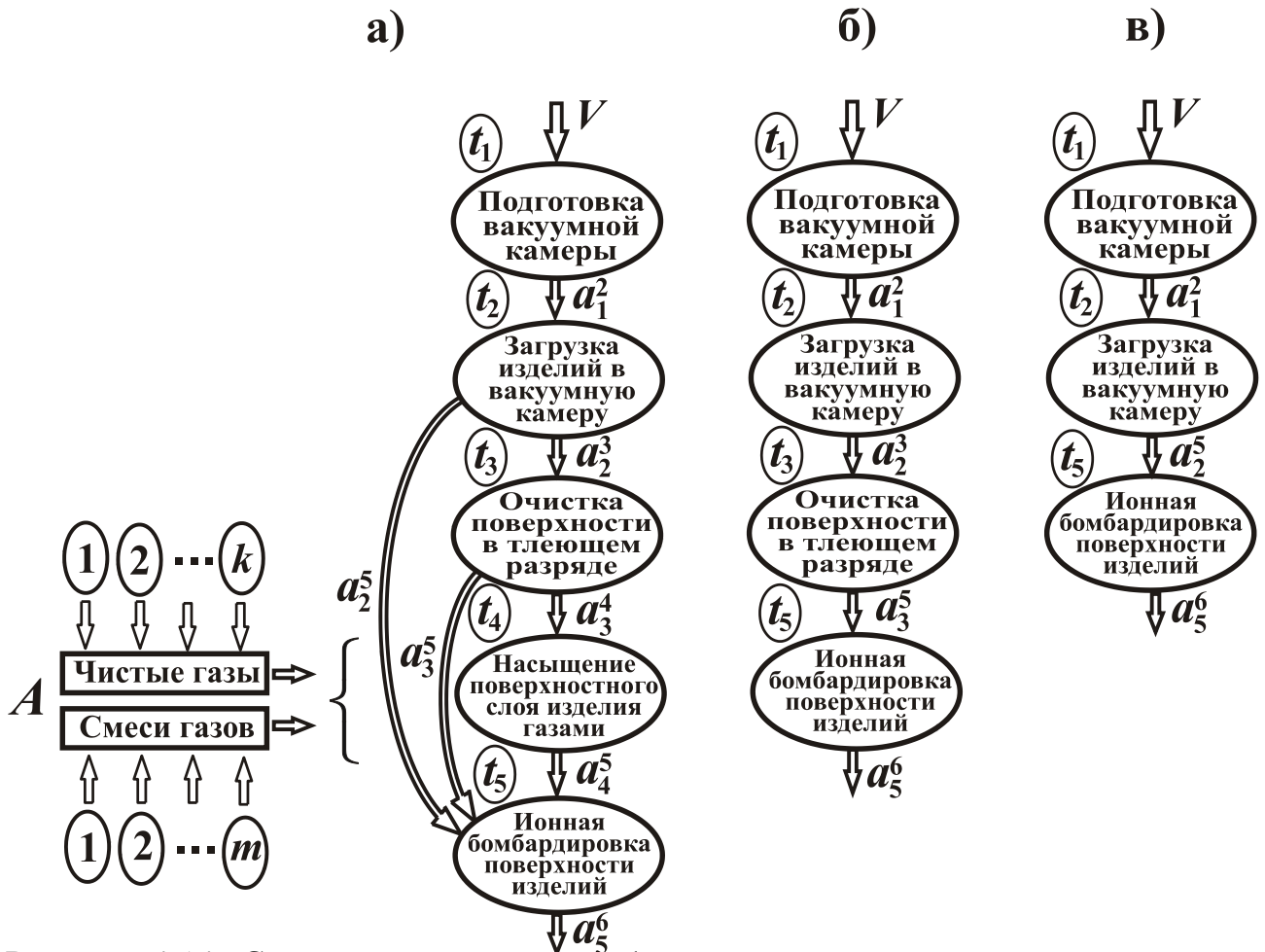


Рисунок 4.14. Структурные варианты 1-го этапа технологического процесса обработки лопатки компрессора (изделия) в вакуумной ионно-плазменной установке: а – вариант полного состава операций, б – вариант укороченного состава операций, в – вариант неполного состава операций

На рис. 4.14,а показан структурный вариант полного состава операций, на рис. 4.14,б – вариант укороченного состава операций, на рис. 4.14,в – вариант неполного состава операций

Приведенные на рис. 4.14 структурные варианты 1-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке поз-

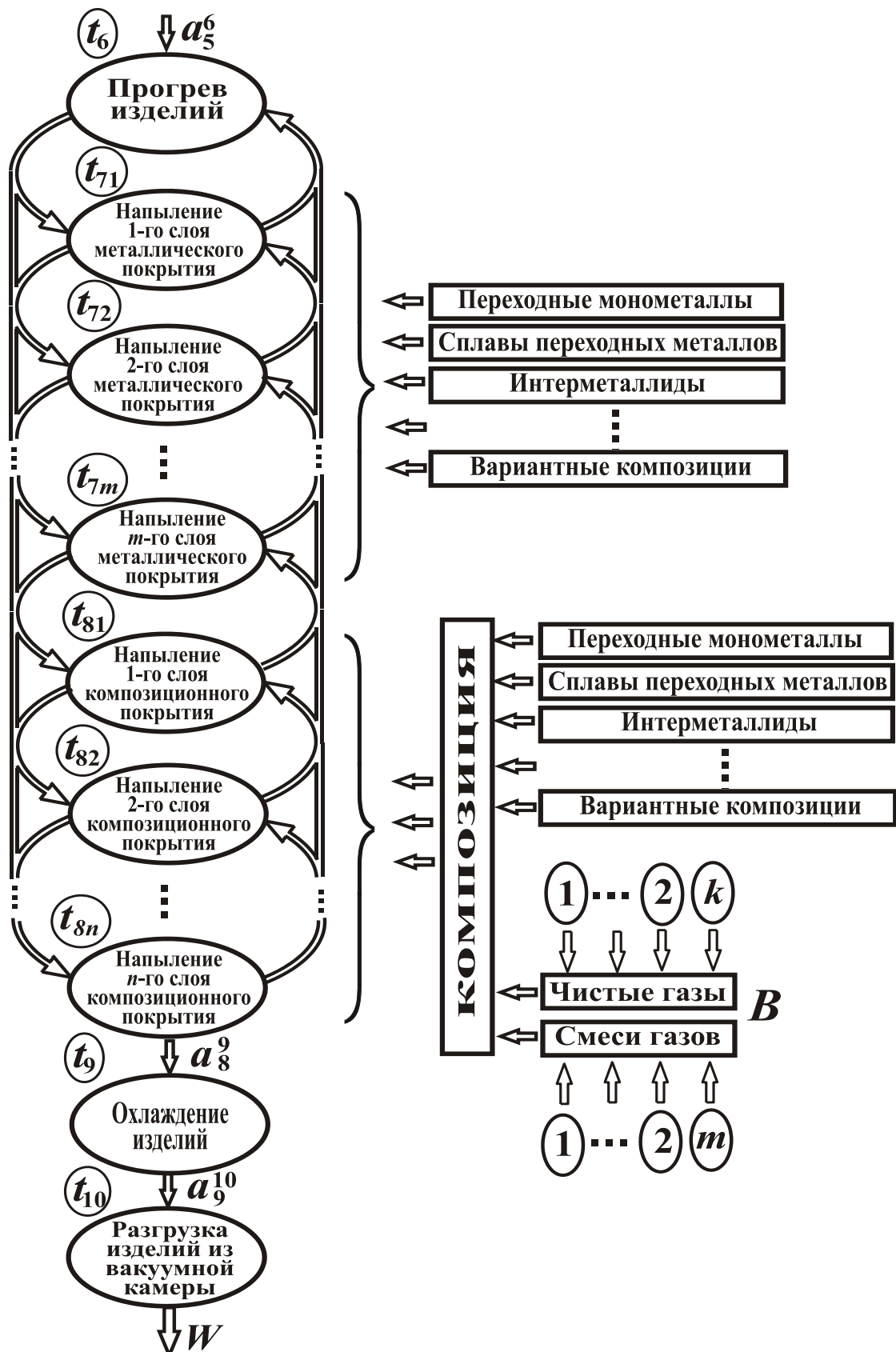


Рисунок 4.15. Структурный вариант полного состава операций 2-го этапа технологического процесса обработки изделия (лопатки компрессора) в вакуумной ионно-плазменной установке

воляют решать заданные технологические задачи по подготовке изделия к нанесению покрытий.

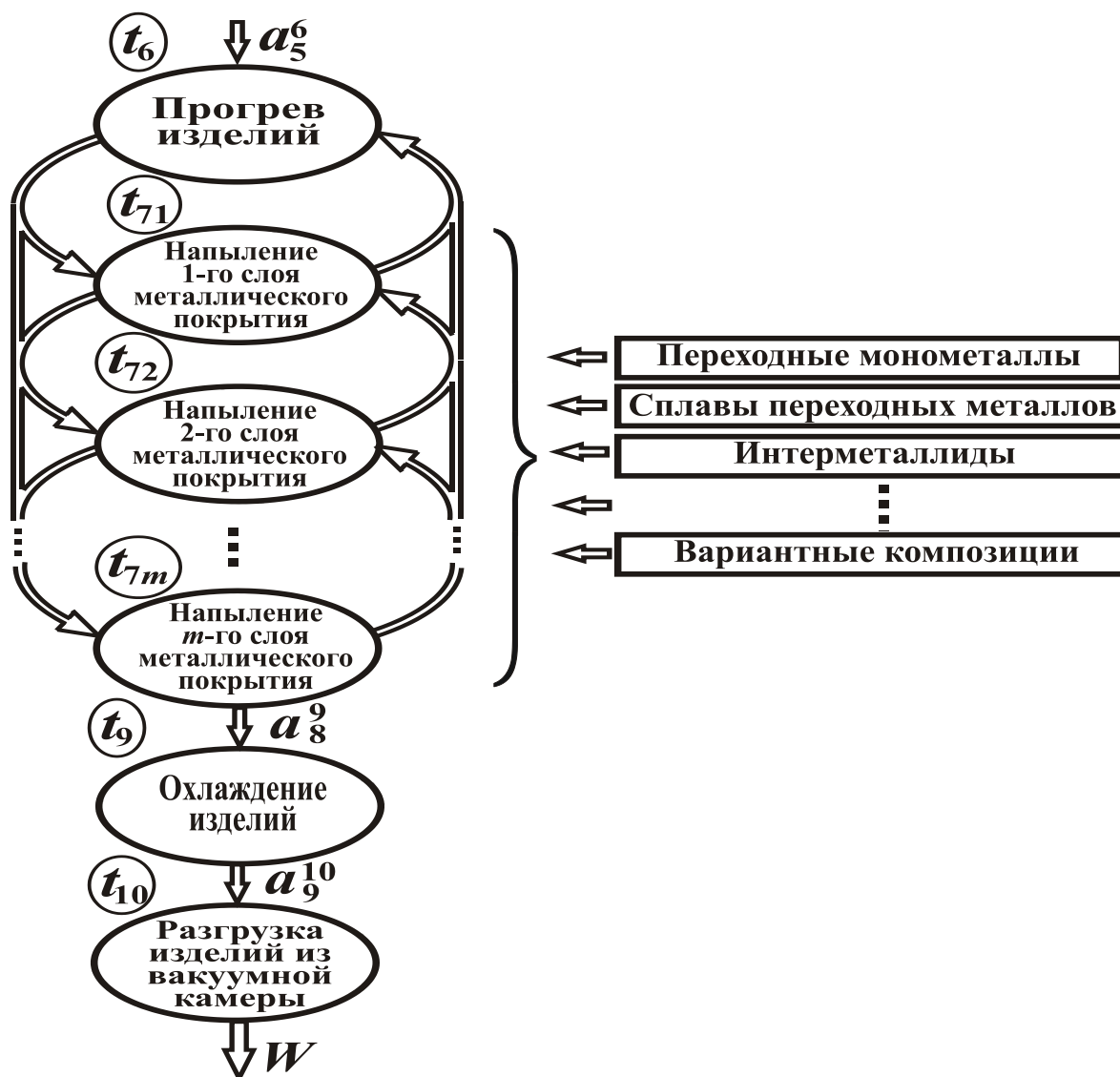


Рисунок 4.16. Структурный вариант операций металлизации 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке

Для нанесения различных вариантов покрытий применяется структурные варианты 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке. Разработанная структура технологического процесса обеспечивает возможность нанесения следующих типов покрытий:

- однослойные покрытия,
- многослойные покрытия.

А также в зависимости от вида покрытий разработанная структура технологического процесса позволяет выполнять следующие покрытия:

- металлические покрытия,
- композиционные покрытия.

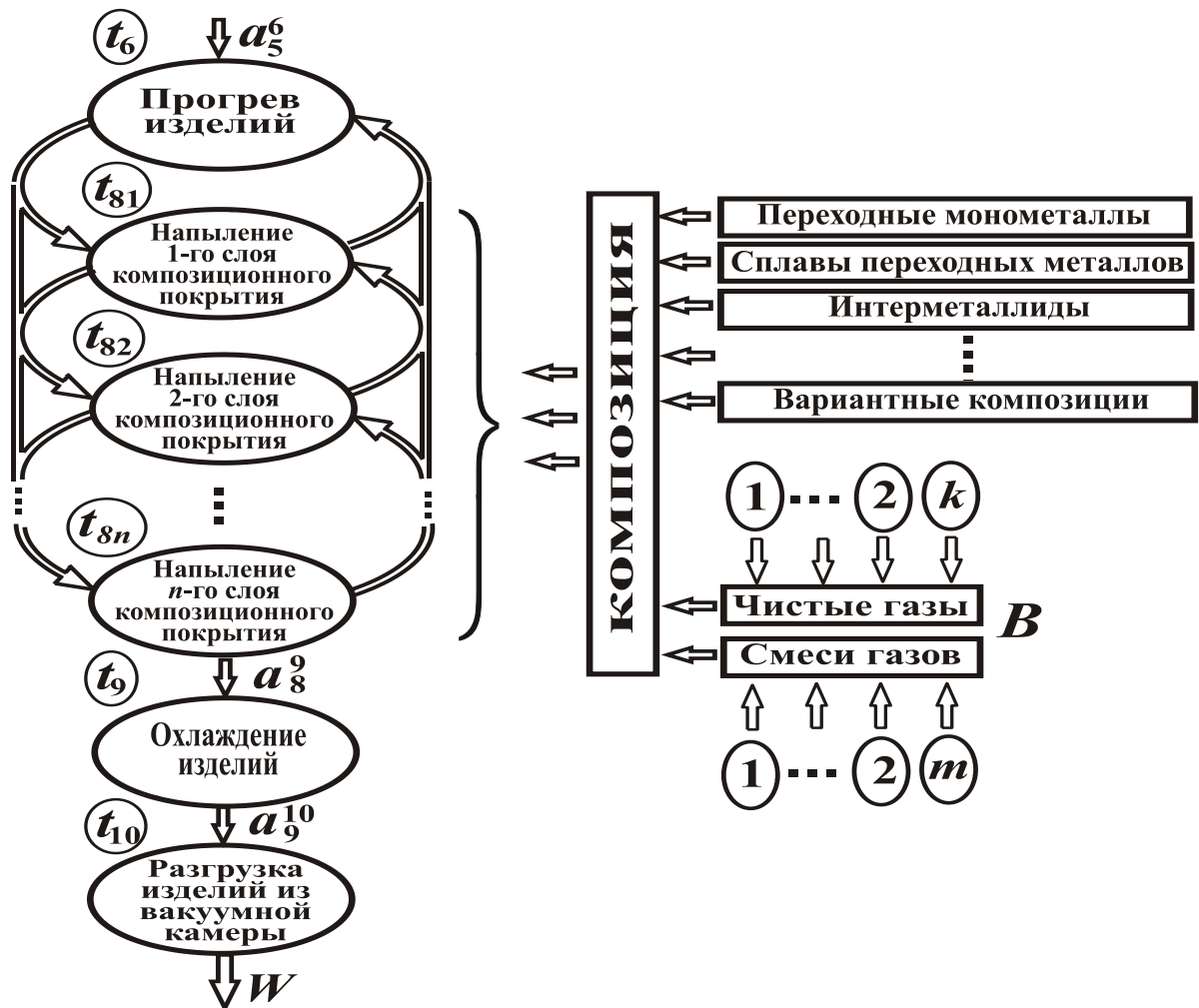


Рисунок 4.17. Структурный вариант операций нанесения композиционных покрытий 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке

На рис. 4.15 представлен структурный вариант полного состава операций 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке. Эта структура позволяет решать вопросы как нанесения однослойных и многослойных покрытий, так и металлических и композиционных покрытий.

В ряде случаев технологические процессы с полным составом операций не нужны. В этом случае могут применяться технологические процессы, предназначенные только для металлизации поверхности изделия или для нанесения композиционных покрытий.

В связи с этим, на рис. 4.16. представлен структурный вариант операций для металлизации 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке. На рис. 4.17 представлен структурный вариант для операций нанесения композиционных покрытий 2-го этапа технологического процесса обработки изделия в вакуумной ионно-плазменной установке.

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать универсальную структуру технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделий. С помощью этой универсальной структуры технологического процесса можно вести синтез конкретных вариантов технологических процессов для изделий с заданными функциональными свойствами, для их эксплуатации в машине или технологической системе.

4.5. Структура технологического обеспечения и производительность процесса напыления покрытий в ионно-плазменных установках

Наиболее нагруженными деталями ГТД, определяющими их ресурс, являются лопатки [1, 20]. Элементы лопаток в процессе их эксплуатации испытывают напряжения растяжения и изгиба от центробежных сил, напряжения изгиба и кручения от газового потока, переменные напряжения от вибрационных нагрузок, частота и амплитуда которых изменяются в широких пределах, а также тепловые напряжения от тепловых нагрузок. Температура на лопатках первой ступени турбины может достигать 1200 °С [1, 20]. При этом цикличность знакопеременных напряжений приводит к разрушению лопаток вследствие термической усталости из-за возникающих микротрещин и изменения свойств материала.

А также можно отметить, что лопатки ГТД работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре, что в ряде случаев приводит к возникновению газовой коррозии. При том наличие влажности и пыли в воздушном потоке оказывают химико-абразивное изнашивание элементов лопаток, а именно поверхностей, входных и выходных кромок пера.

Особенно значительное изнашивание элементов пера лопаток проявляется у ГТД вертолетов, например ТВЗ-117, эксплуатирующихся в пустынях с песчаными бурями, в местностях, с пылевыми и соляными составляющими в воздушных потоках, образующихся из-за эрозии почвы, вблизи действующих вулканов с выбросами пепла и тому подобными особенностями. Это приводит к снижению долговечности лопаток и ГТД в целом.

Для повышения долговечности лопаток ГТД применяются различные технологические методы и способы увеличения их эксплуатационных свойств [1, 20, 21]. В частности для снижения износа элементов пера лопаток применяют вакуумное ионно-плазменное (электродуговое) напыление специальных композиционных покрытий, образованных на основе нитрид титана, нитрид цирконий титана и других соединений. Вместе с тем, применение этих видов напыления требует решения вопросов повышения технико-экономических показателей. Прежде всего, повышения производительности и снижения себестоимости напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий. На практике эти вопросы решаются за счет повышения концентрации рабочих позиций в вакуумной камере. Однако в этом случае сразу возникает целый ряд вопросов. Прежде всего, сколько лопаток можно располагать в вакуумной камере? Какая структура рабочих позиций будет наиболее рациональной для тех или иных видов лопаток? Какие пространственные связи в расположении лопаток необходимо реализовать? А также, какую кинематику движений элементов приспособления необходимо обеспечить, чтобы уменьшить влияние теневых зон на качество напыляемого покрытия. На эти вопросы в этой работе сделана попытка дать ответы.

Можно отметить, что особенно важным при ОУО является повышение производительности и снижение себестоимости напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатки ГТД за счет дальнейшего повышения их концентрации в вакуумной камере путем реализации специальной структуры рабочих позиций технологической оснастки, выполнения необходимых пространственных связей между ее элементами и обеспечения требуемой кинематики движений ее

элементов из условия обеспечения равномерности толщины покрытия на поверхностях лопатки.

В работе предполагается выполнить 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 равномерности толщины покрытия на поверхностях лопаток.

Рассмотрим основные особенности концентрации изделий в вакуумной камере. Главной задачей синтеза технологического обеспечения вакуумной камеры является определение необходимой концентрации рабочих позиций вращающейся оснастки или мощности множества рабочих позиций вакуумной камеры. При этом концентрация рабочих позиций или мощности множества рабочих позиций вакуумной камеры или общая плотность изделий вакуумной камеры определяется по следующей формуле:

$$\nu = \Pi_{\text{ц}} T_{\text{ц}} = \frac{V}{V_0}, \quad (4.4)$$

где ν - мощность множества рабочих позиций вакуумной камеры;

$\Pi_{\text{ц}}$ - цикловая производительность напыления покрытий на лопатки;

$T_{\text{ц}}$ - полный технологический цикл напыления покрытий на лопатки ГТД;

V - общий объем вакуумной камеры;

V_0 - удельный объем вакуумной камеры для расположения одной рабочей позиции (лопатки).

Можно отметить, что при проектировании вакуумной камеры процесс определения мощности множества рабочих позиций зависит от необходимой цикловой производительности $\Pi_{\text{ц}}$ установки. Время полного технологического цикла $T_{\text{ц}}$ напыления покрытия на лопатки ГТД обычно задается предварительно.

Задаваясь конкретными параметрами цикловой производительности $\Pi_{\text{ц}}$ и временем полного технологического цикла $T_{\text{ц}}$ в выражении (4.4) можно определить необходимое количество напыляемых лопаток ν в соответствии с заданными начальными условиями. Когда необходимо определить объём вакуумной камеры можно воспользоваться следующим выражением

$$V = \Pi_{\text{ц}} T_{\text{ц}} V_0 .$$

В случае, когда необходимо вести процесс дальнейшего повышения производительности установки, с заданным объёмом вакуумной камеры, можно воспользоваться следующими условиями:

$$\left. \begin{array}{l} \nu \rightarrow \max , \\ V_0 \rightarrow \min . \end{array} \right\}$$

Процесс определения множества рабочих позиций вакуумной камеры имеет следующие ограничения:

- возникновением эффекта «теневые зоны», этот эффект действует в случае особенностей пространственного расположения лопаток относительно друг друга и в случае особенностей кинематики лопатки относительно катодов установки;
- наличием предельной удельной плотности лопаток в вакуумной камере, которая определяется по следующей формуле $P = 1/\nu$;
- особенностями структуры технологического обеспечения, пространственных связей между элементами структуры и кинематики движений лопаток в вакуумной камере.

Рассмотрим структурные модели технологической оснастки вакуумной камеры. При этом, в случае когда определена мощность множества рабочих позиций вакуумной камеры (концентрация рабочих позиций) составляется их структура. Структура рабочих позиций характеризует внутреннюю организацию, порядок и построение технологической оснастки и представляет собой совокупность элементов и отношений между ними.

Структура рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры представляет собой совокупность упорядоченных множеств y и a , которую представляем следующим образом:

$$Str = \{y, a\}, \quad (4.5)$$

где Str - рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры;

y - множество рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры;

a - множество отношений на множестве y .

Здесь множества y и a имеют вид:

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_v\},$$

где y_η - η -й элемент множества y ;

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_{v_i}\},$$

где 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 (рис. 4.18) 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 будет определяться на основании следующего выражения:

$$v = \prod_{k=1}^p v_k,$$

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

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

Для представленной структуры (рис. 4.18), цикловая производительность вакуумной ионно-плазменной установки определяется по следующей формуле

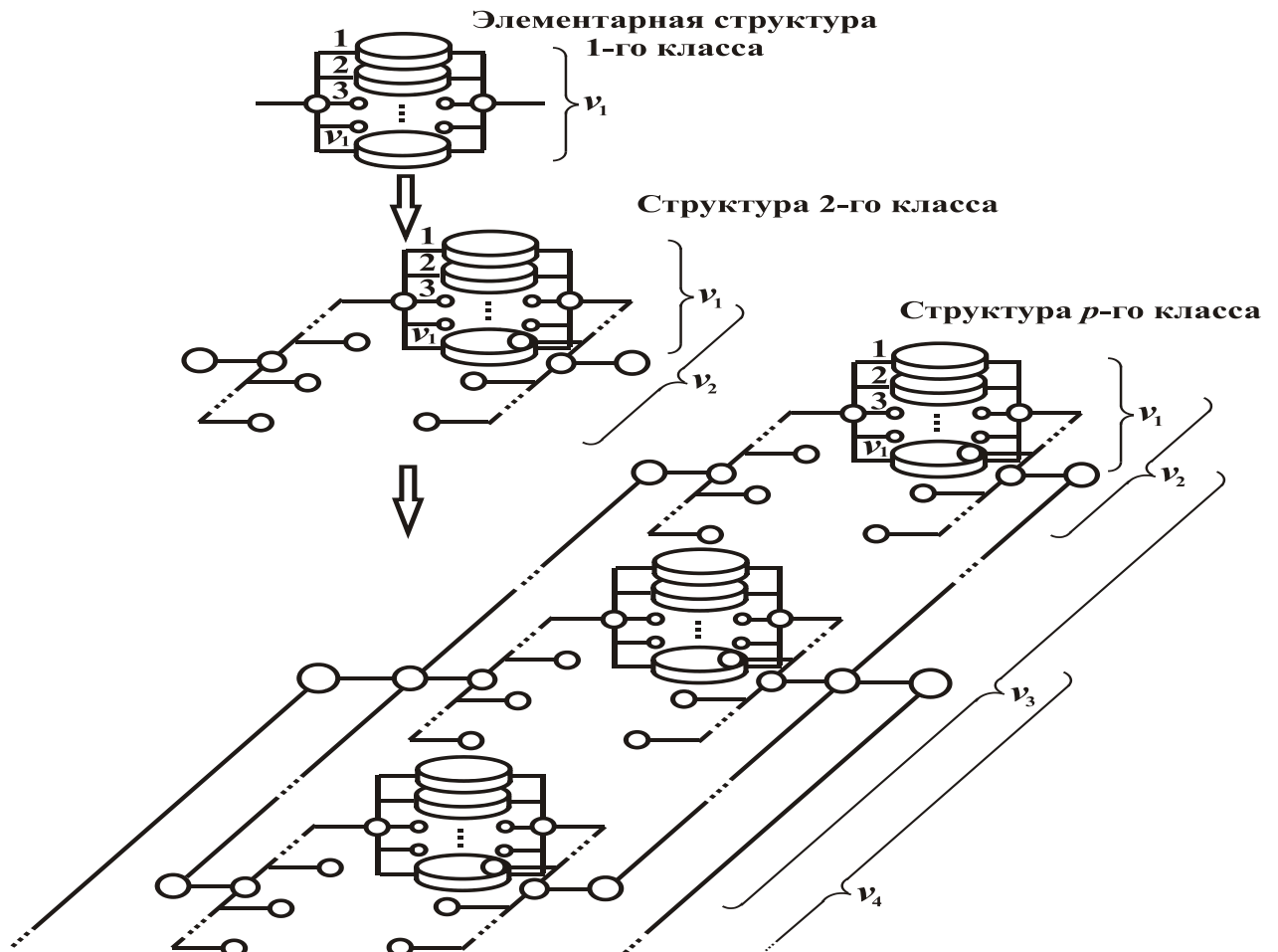


Рисунок 4.18. Особенности формирования структуры рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры установки

$$П_{ц} = \frac{\prod_{k=1}^p v_k}{T_{ц}} .$$

Структурная модель рабочих позиций оснастки вакуумной камеры по классам подсистем может быть представлена следующим образом:

$$Str = \{Str_1, Str_2, ..., Str_p\},$$

где Str_k - структура подсистем k -го класса технологической оснастки вакуумной камеры установки.

Общую структурную модель состава рабочих позиций можно представить следующим выражением

$$Str = \bigcup^{v_p} \dots \bigcup^{v_2} \bigcup^{v_1} y_{\eta}.$$

Рассмотрим варианты пространственных моделей. В представленном ранее выражении (4.5), определяющем структуру рабочих позиций технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки, множество отношений a

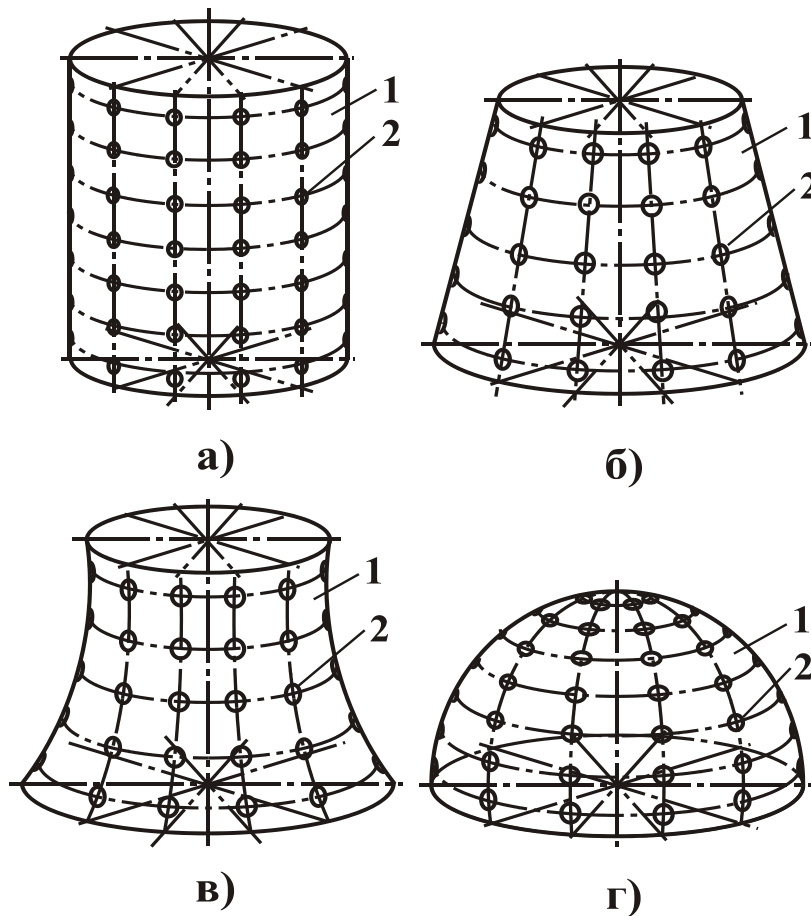


Рисунок 4.19. Варианты пространственных моделей технологической оснастки вакуумной камеры: а – цилиндрическая, б – усеченный конус, в - сложной формы, г - полусфера

на множестве рабочих позиций y остается неизвестным. Поэтому здесь необходимо определить пространственные отношения между рабочими позициями. Эти вопросы могут решаться на базе пространственных моделей, приведенных на рис. 4.19 [137].

На рис. 4.19 показаны варианты пространственных моделей технологической оснастки вакуумной камеры, а именно: на рис. 4.19,а – цилиндрическая, на рис. 4.19,б – усеченный конус, на рис. 4.19,в – сложной формы, на рис. 4.19,г – полусфера. Здесь цифрами обозначено следующее:

1 – пространственная форма модели, 2 – рабочие позиции технологической оснастки. Следует заметить, что возможны и другие варианты пространственных моделей. Процесс выбора той или иной модели зависит от технологических особенностей напыления покрытий и видов лопаток ГТД.

Можно отметить, что на базе элементарных моделей технологической оснастки можно создавать их комбинированные варианты. На рис. 4.20 представлены

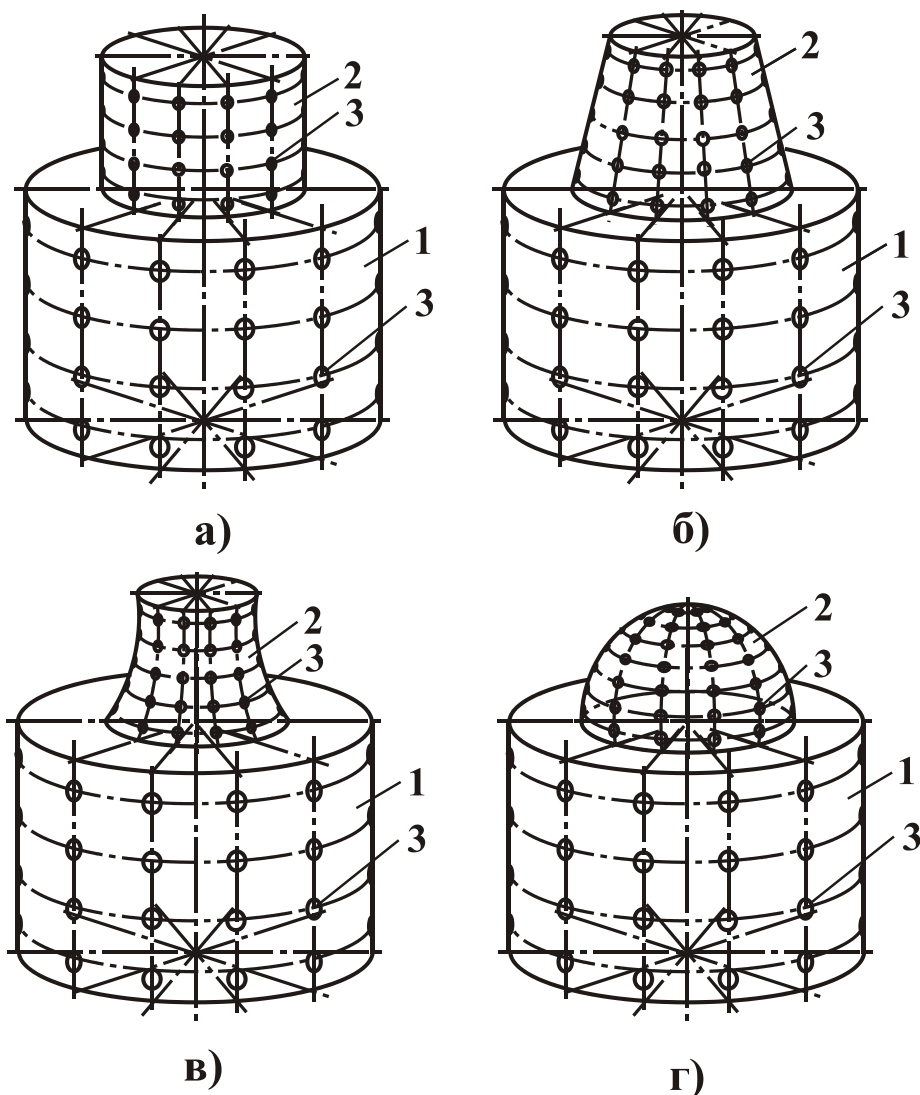


Рисунок 4.20. Варианты комбинированных пространственных моделей технологической оснастки: а – цилиндр-цилиндр, б – цилиндр-усеченный конус, в – цилиндр-сложная форма, г – цилиндр-полусфера

варианты комбинированных пространственных моделей технологической оснастки. Здесь показаны следующие варианты: рис. 4.20,а – цилиндр-цилиндр, рис. 4.20,б – цилиндр-усеченный конус, рис. 4.20,в – цилиндр-сложная форма, рис. 4.20,г – цилиндр-полусфера. Цифрами обозначено следующее: 1 – пространственная форма модели первого уровня, 2 – пространственная форма модели второго уровня, 3 – рабочие позиции технологической оснастки.

Применение подобных моделей возможно для случаев напыления покрытий на лопасти различных видов. А также следует заметить, что возможно целое множество различных комбинированных вариантов пространственных моделей оснастки, которые определяются технологическими условиями процесса напыления покрытий.

На рис. 4.21 представлены другие варианты пространственных моделей технологической оснастки вакуумной камеры, а именно: рис. 4.21,а – многоуров-

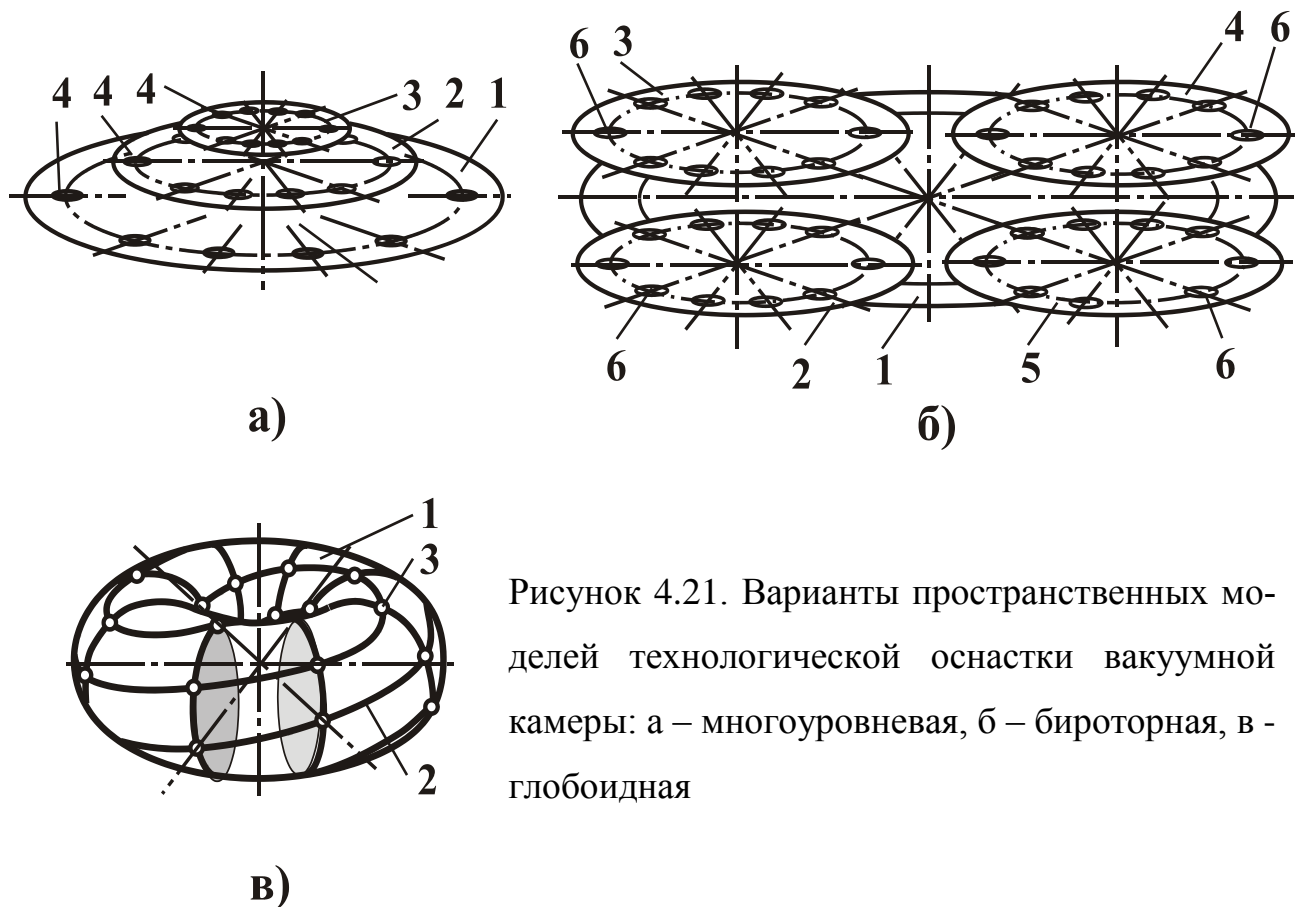


Рисунок 4.21. Варианты пространственных моделей технологической оснастки вакуумной камеры: а – многоуровневая, б – бироторная, в – глобоидная

невая, рис. 4.21,б – бироторная, рис. 4.21,в – глобоидная. На рис. 4.21,а цифрами показано следующее: 1, 2, 3 – уровни расположения рабочих позиций в технологической оснастке; 4 – рабочие позиции оснастки (каждый уровень предназначен для лопаток заданного вида). На рис. 4.21,б показано: 1, 2, 3, 4, 5 – элементы бироторной планшайбы; 6 – рабочие позиции оснастки. На рис. 4.21,в представлена глобоидная модель, здесь показано: 1 – тороидальная поверхность модели, 2 – глобоидная кривая траектории движения рабочей позиции, 3 – рабочие позиции оснастки.

Можно отметить, что построение траекторий движения изделия в вакуумной камере решается на базе композиции преобразований декартовых систем координат и преобразований движений в этих системах координат.

Для определения рационального варианта технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки выполняется генерирование полного

множества различных вариантов моделей и на этом множестве определяется рациональный или доминирующий вариант приспособления.

Рассмотрим кинематические схемы движений элементов технологической оснастки. При схематическом изображении технологической системы или оснастки, принцип ее работы показывается с помощью принципиальной кинематической схемы, на которой представляются элементарные движения в соответствующих системах координат. Принципиальная кинематическая схема это схема, на которой с помощью условных обозначений изображаются элементарные движения, их количество, состав и пространственное расположение. Под элементарными движениями понимаются два вида движений: поступательное (Trans) и вращательное (Rot) движение. При этом кинематика технологической оснастки может иметь

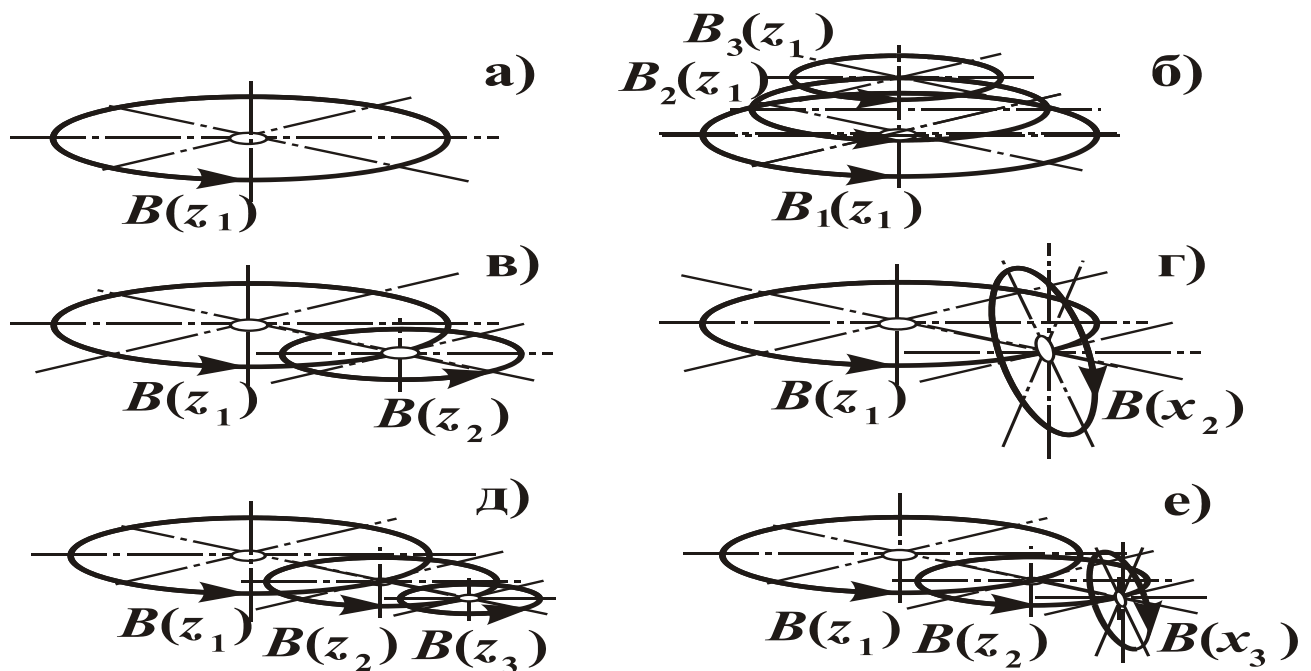


Рисунок 4.22. Принципиальные кинематические схемы движений элементов технологической оснастки: а – одно вращательное движение; б – три вращательных движений вокруг оси z_1 ; в – два вращательных движений вокруг осей z_1 и z_2 ; г - два вращательных движений вокруг осей z_1 и x_2 ; д – три вращательных движений вокруг осей z_1 , z_2 и z_3 ; е - три вращательных движений вокруг осей z_1 , z_2 и x_3

элементарную или сложную структуру и специфические особенности ее реализации [62].

Проектирование технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки базируется на основе принципиальных кинематических схем. В соответствии с принятой принципиальной кинематической схемой, технологические элементы и подсистемы, в процессе работы всей системы технологической оснастки, перемещаются относительно друг друга по траекториям относительного движения. При этом эти перемещения выполняются со скоростями, предопределяемыми режимами и параметрами напыления покрытий на изделия, наличием теневых зон, структурой технологической оснастки и особенностями конструкции лопатки ГТД.

На рис. 4.22 представлены некоторые варианты принципиальных кинематических схем движений элементов технологической оснастки. Эти принципиальные кинематические схемы составлены на базе следующих элементарных движений: рис. 4.22,а – одно вращательное движение; рис. 4.22,б – три вращательных движений вокруг оси z_1 ; рис. 4.22,в – два вращательных движений вокруг осей z_1 и z_2 ; рис. 4.22,г – два вращательных движений вокруг осей z_1 и x_2 ; рис. 4.22,д – три вращательных движений вокруг осей z_1 , z_2 и z_3 ; рис. 4.22,е – три вращательных движений вокруг осей z_1 , z_2 и x_3 .

В общем случае кинематика движений принципиальной кинематической схемы может быть представлена следующим множеством:

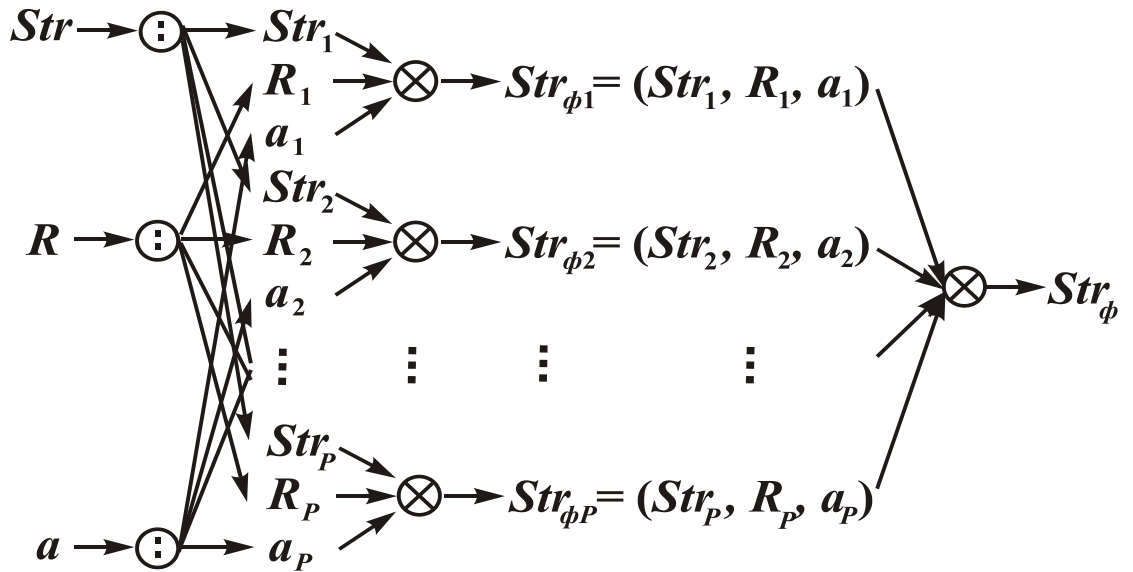
$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_P\},$$

где a_k – элементарное движение подсистемы технологической оснастки k -го класса.

Можно отметить, что на рис. 4.22 представлены только некоторые варианты принципиальных кинематических схем движений элементов технологической оснастки. Здесь возможно целое множество различных их вариантов. Заданная схема определяется особенностями проектирования технологической оснастки, а необходимые варианты могут формироваться на базе методов морфологического анализа.

Рассмотрим общие особенности проектирования технологической оснастки. Процесс проектирования технологических систем, в том числе и технологической оснастки вакуумной камеры, это процесс последовательного наращивания сложности оборудования. Поэтому обычно технологические системы проектируются за несколько этапов, при этом постепенно наращивается уровень сложности проектируемой системы. Важным этапом проектирования технологической системы является процесс, основанный на базе принципиально-структурных моделей. Принципиально-структурная модель формируется на основе композиции структурной модели, пространственной компоновки и принципиальной кинематической схемы движений функциональных элементов планшайбы вакуумной камеры.

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 следующим выражением:



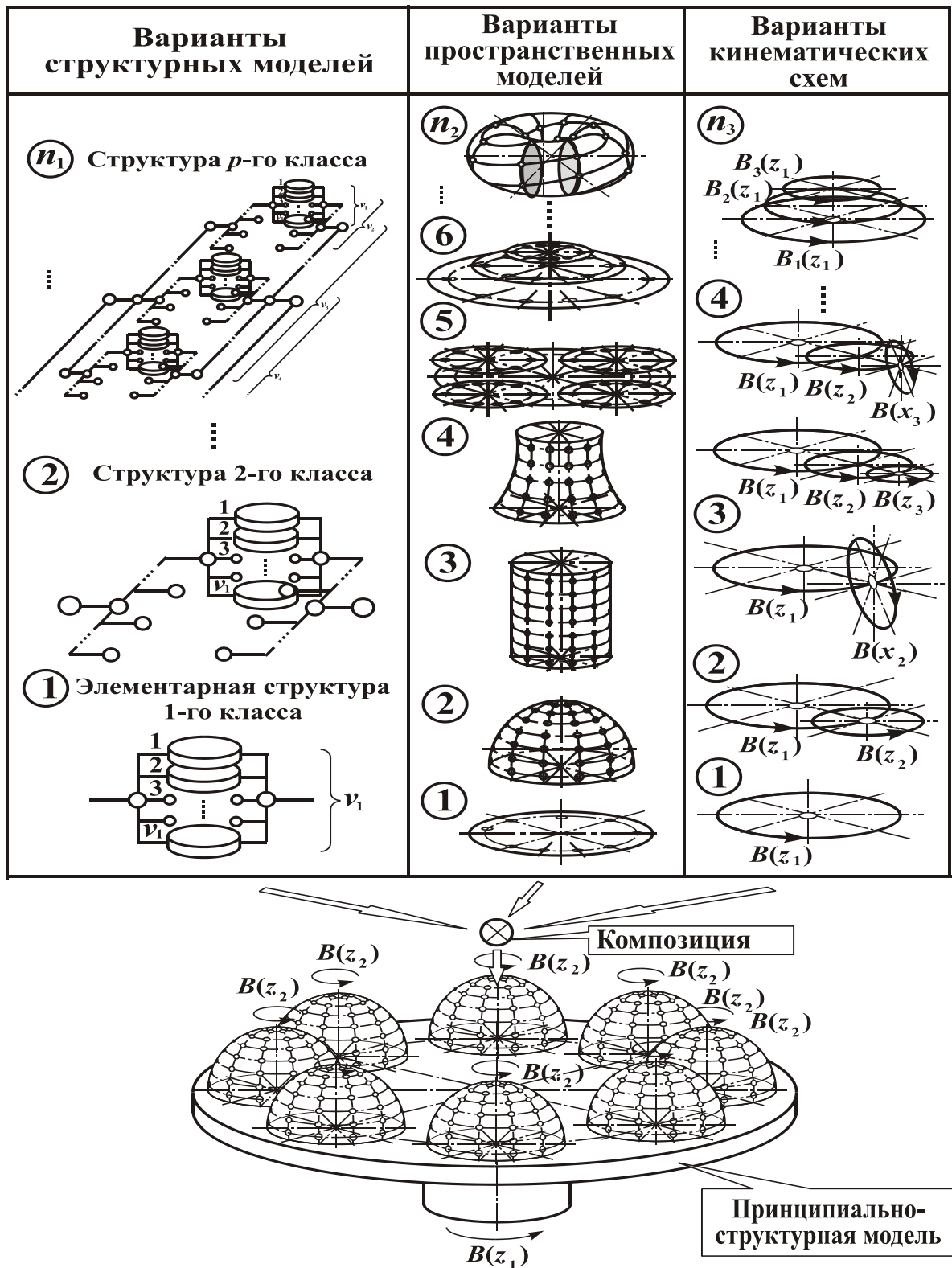


Рисунок 4.23. Морфологическая матрица синтеза принципиально-структурных моделей технологической оснастки вакуумной камеры

где Str , Str_k , $Str_{\phi k}$ и Str_{ϕ} - структуры общей, k -го класса, функциональной k -го класса и функциональной общей, 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. 4.23. 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.

На рис. 4.24 представлен общий вид некоторых вариантов технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки. Здесь показаны следующие варианты: рис. 4.24,а – традиционный, рис. 4.24,б – комбинированный, рис. 4.24,в – сферический, рис. 4.24,г – цилиндрический.

Можно отметить, технологическая оснастка, представленная на рис. 4.24,а и рис. 4.24,в предназначена для лопаток направляющего аппарата ГТД модели ТВ3-117. При этом концентрация рабочих позиций оснастки рис. 4.24,в в 2 раза выше, чем оснастки, представленной на рис. 4.24,а. Технологическая оснастка, представленная на рис. 4.24,б и рис. 4.24,г, предназначена для лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117. Здесь, концентрация рабочих позиций оснастки рис. 4.34,г в 1,6 раза выше, чем оснастки, представленной на рис. 4.24,б. На основании этого, производительность напыления нитрид титановых покрытий на установке ННВ 6.6-И1 на лопатки ГТД увеличивается в соответствии с применяемым оборудова-



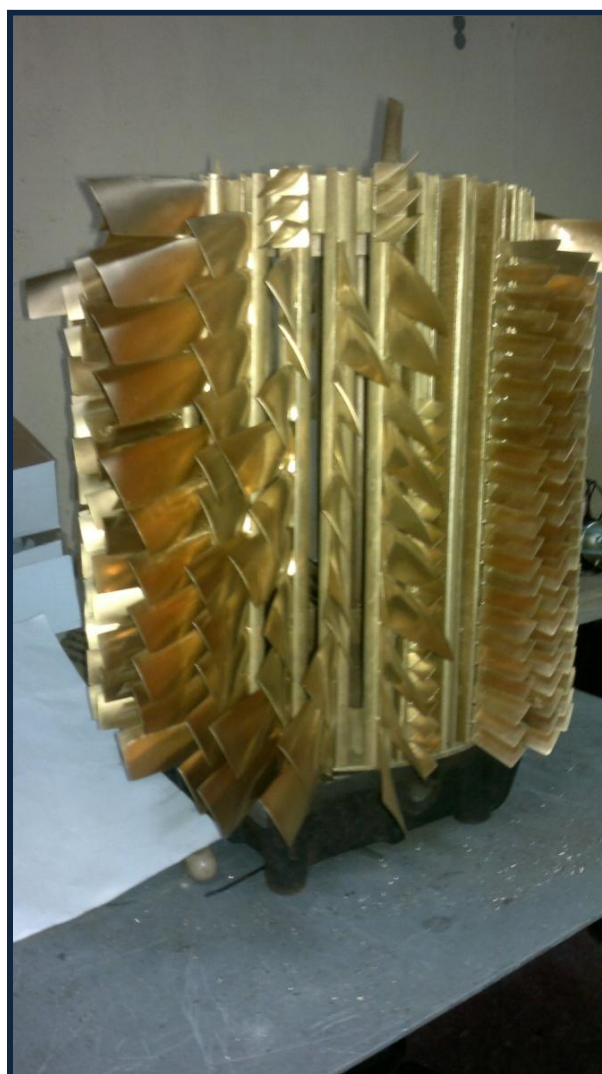
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.24. Общий вид некоторых вариантов технологической оснастки вакуумной камеры ионно-плазменной установки:

а – традиционный,

б – комбинированный,

в – сферический,

г - цилиндрический

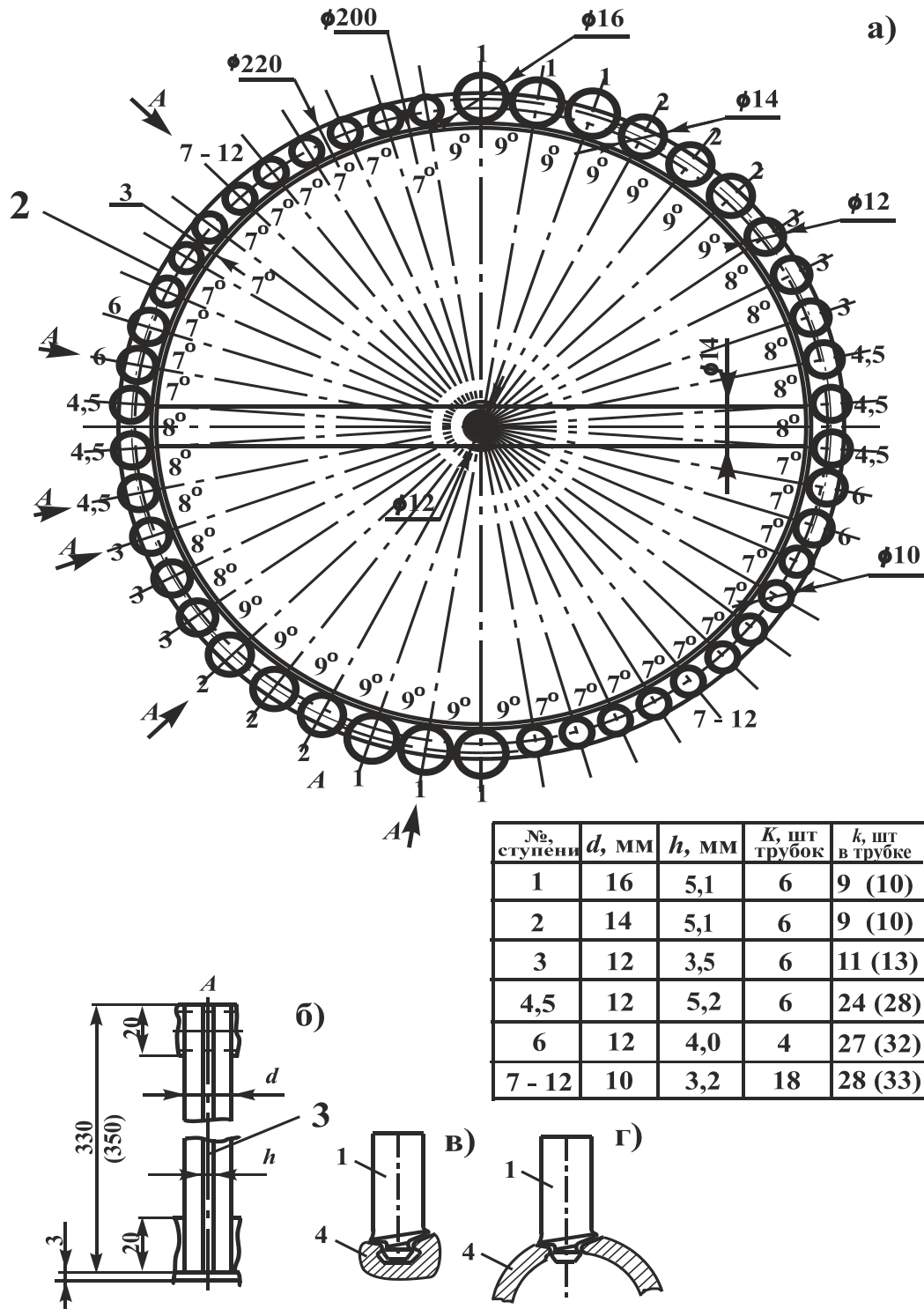


Рисунок 4.25. Универсальное устройство для нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий 12-ти ступеней: а – вид сверху, б – вид А, в – лопатка на направляющей, г – лопатка с направляющей в виде трубки

нием. Также можно отметить, что выполненные исследования процесса напыления покрытий на лопатки позволили установить, что напыляемые покрытия на рабочие поверхности лопаток с применением разработанных приспособлений имеют равномерную толщину в пределах заданного допуска [72].

На рис. 4.25 представлена схема устройства, выполненная в соответствии со схемой рис. 4.24,г. На этом устройстве можно выполнять нанесение покрытий для 12-ти ступеней лопаток компрессора. Здесь, цифрами показаны следующие элементы: 1 – лопатка компрессора, 2 – основание устройства, 3 – паз направляющей, 4 – направляющая.

Таким образом, разработанные основы проектирования технологической оснастки вакуумных ионно-плазменных установок позволяют создавать высокопроизводительное оборудование и снизить себестоимость напыления покрытий на лопатки ГТД за счет концентрации рабочих позиций. Выполненные 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 равномерности толщины покрытия на поверхностях лопаток.

4.6. Выводы

Проведенные исследования, связанные с функционально-структурным синтезом технологического обеспечения процессов нанесения покрытий на лопатки компрессора ГТД позволили установить следующее.

1. Проведенный анализ особенностей напылению 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.

2. Приведенные математические структурно-функциональные символьные модели однослойных и многослойных покрытий, а также варианты ФОП позволяет выполнять синтез заданных или требуемых функциональных элементов пера лопатки компрессора. Это позволяет отыскивать новые нетрадиционные свойства покрытий и вести повышение работоспособности лопаток.

3. Предлагаемые принципы ориентации технологических воздействий и свойств лопатки дают технологам ключ для научно обоснованного обеспечения заданного, требуемого или предельного потенциала возможностей лопатки при эксплуатации ГТД. Они позволяют решать вопросы полной ориентации технологических воздействий и свойств лопатки компрессора при реализации функционально-ориентированных технологий в зависимости от особенностей эксплуатации лопатки. А это позволяет обеспечивать качественно новую совокупность свойств и меру полезности лопаток ГТД.

4. Установлено, что для реализации ФОП может применяться большое множество методов и вариантов установок и технологического обеспечения. Это зависит от особенностей конкретной детали, параметров ФОП, кинематики движений, метода реализации покрытия и множества других условий.

5. Выполненные исследования позволили установить, что ультразвуковая обработка лопаток компрессора является одним из основных высокопроизводительных методов их очистки от загрязнений перед выполнением вакуумного ионно-плазменного напыления покрытий.

6. Разработана универсальная структура технологического процесса напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности изделий. С помощью этой универсальной структуры технологического процесса можно вести синтез конкретных вариантов технологических процессов для изделий с заданными функциональными свойствами, для их эксплуатации в машине или технологической системе.

7. Выполненные исследования позволили разработать высокопроизводительное оборудование 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 лопаток в вакуумной камере; разработать общие принципы проектирования технологической оснастки из условия обеспечения равномерности толщины покрытия на поверхностях лопаток.

РАЗДЕЛ 5**БАЗОВЫЕ ВАРИАНТЫ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.
РЕКОМЕНДАЦИИ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ****5.1. Особенности эрозионно-коррозионных разрушений лопаток
компрессора на поверхностях пера и по ступеням ГТД модели ТВЗ-117**

Можно отметить, что лопатки компрессора ГТД эксплуатируются в сложных условиях работы. При этом их работоспособность определяется эрозионно-коррозионными воздействиями. Эти воздействия определяют разрушения лопаток компрессора, которые переменны по поверхности пера и зависят от номера ступени компрессора.

В этом параграфе будут рассмотрены некоторые вопросы, связанные с особенностями разрушений элементов пера лопаток компрессора ГТД (рис. 5.1) модели ТВЗ-117, и обуславливающие следующее:

1. Изменение топографии разрушения пера лопатки.
2. Изменение величины разрушения поверхностного слоя пера лопатки.
3. Изменение параметров разрушения пера лопатки в зависимости от номе-

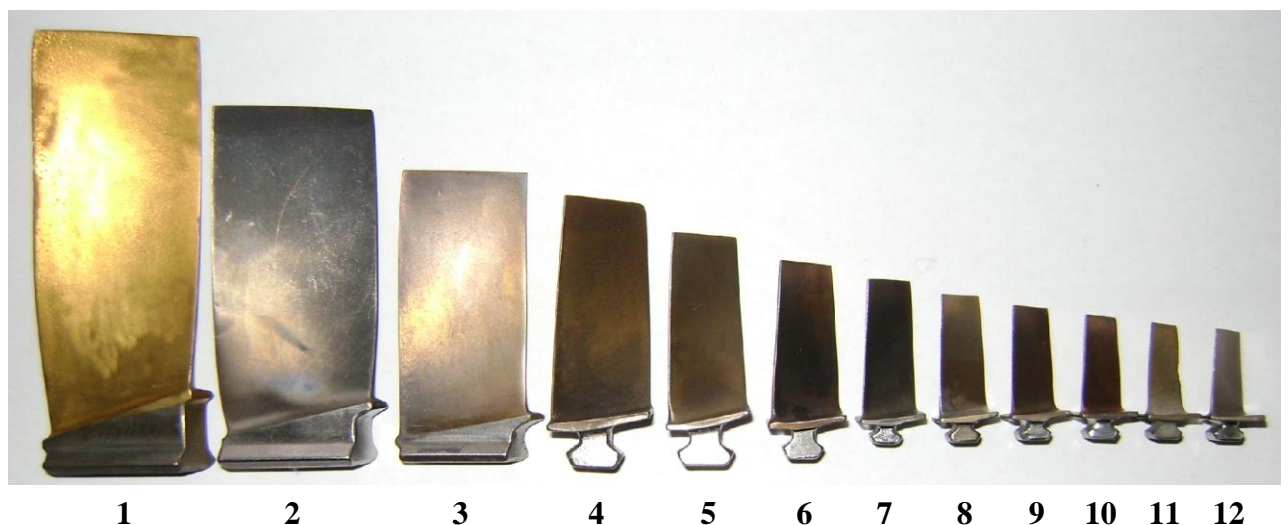


Рисунок 5.1. Общий вид лопаток компрессора ГТД модели ТВЗ-117

ра ступени ГТД.

При выполнении данных исследований использовались лопатки ГТД модели ТВ3-117. Этот двигатель в компрессоре имеет 12 ступеней лопаток (рис. 5.1).

Анализ топографии разрушения пера лопатки

Выполненные исследования особенностей разрушения покрытия пера лопатки компрессора показывают, что в процессе эксплуатации ГТД покрытия разрушаются не равномерно по элементам и поверхностям лопатки (рис. 5.2). Этот процесс обусловлен пространственной формой элементов лопатки и кинематикой её движения, особенностями движения газовых потоков в тракте двигателя и действием частиц пыли и жидкости. Разрушение покрытия на лопатке обычно начинается на входной кромке 1 пера в зоне пересечения входной и периферийной кромок. Далее, разрушение покрытия распространяется от этой зоны по входной кромке вниз к замку лопатки и по периферийной кромке к выходной кромке 2. Затем, от этих зон начинает разрушаться покрытие на поверхности корыта 3 лопатки, и потом покрытие остаётся только в зоне 4 поверхности корыта лопатки. На рис. 5.2 представлена схема разрушения нитрид титанового покрытия поверхности пера лопатки со стороны корыта в зависимости от длительности эксплуатации (штриховые линии показывают границы полного разрушения покрытия, которые изменяются во времени): 1 – разрушения входной кромки пера, 2 – разрушения выходной кромки пера, 3 – поверхность без покрытия, 4 – поверхность с покрытием. Проведенные исследования выполнены на лопатках компрессора с нитрид титановым покрытием толщиной 5-6 мкм, нанесённые вакуумным ионно-плазменным методом при помощи титановых катодов ВТ

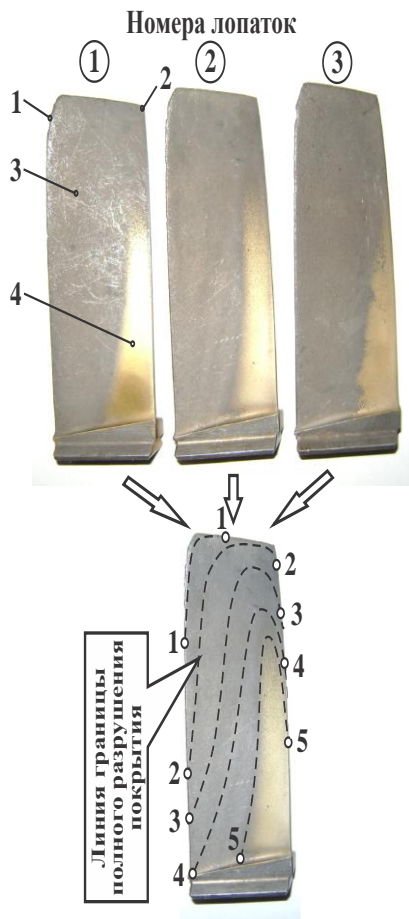


Рисунок 5.2. Схема разрушения поверхности пера лопатки со стороны корыта в зависимости от длительности эксплуатации

1-0. Здесь следует отметить, что покрытие пера лопатки имеет определённые закономерности разрушений в процессе эксплуатации лопаток в ГТД. Можно заметить, что покрытие, нанесённое на поверхность пера со стороны спинки меньше подвержено разрушению.

Выполненные исследования [8, 166] позволили установить, что при эксплуатации ГТД покрытия лопаток компрессора разрушаются не равномерно. Даже при их длительной эксплуатации часть покрытия остается на поверхностях пера лопаток (рис. 5.2). 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 компрессора



Рисунок 5.3. Общий вид толщиномера покрытий К-5 и лопаток ГТД с покрытиями

Анализ особенностей эрозионно-коррозионного разрушения рабочих элементов пера лопатки показывает, что поверхностные слои разрушаются неравномерно. Этот процесс можно рассмотреть на основании рис. 5.2.

Выполненные исследования особенностей разрушения поверхностного слоя ко-

рыта пера лопатки показывает, что неравномерность разрушения происходит более чем в два раза. Эти особенности наблюдаются на всех ступенях лопаток компрессора.

Результаты измерения особенностей износа поверхностного слоя корыта пера лопатки приведены в табл. 5.1. Эти данные приведены для лопатки первой ступени двигателя ТВЗ-117 с нитрид титановым покрытием (катод ВТ 1-0), покрытие выполнено толщиной 6 мкм. Измерения выполнялись толщиномером покрытий К-5 (рис. 5.3). Измерения выполнялись по диагонали пера лопатки, проходящей через точку, лежащую на пересечении входной и периферийной кромок, и точку, лежащую на пересечении выходной кромки и плоскости полки лопатки. Измерения толщины изношенного покрытия производились по шести точкам, выполняемые приблизительно через равные расстояния.

Таблица 5.1. Значения измерений толщины изношенного нитрид титанового покрытия пера лопатки первой ступени, выполняемые по диагонали лопатки

Точки промеров	Номера измерений					Среднее значение толщины	Средний износ, мкм
	1	2	3	4	5		
	Толщина покрытия, мкм						
1	0	1	0	1	0	0,4	5,6
2	1	1	1	1	1	1,0	5,0
3	2	2	2	2	2	2,0	4,0
4	2	3	2	3	2	2,4	3,6
5	3	3	4	3	3	3,2	2,8
6	5	3	4	4	4	4,0	2,0

Анализ результатов, приведенных в табл. 5.1, показал, что величина неравномерности износа покрытия на поверхности корыта пера составляет:

$$k_1 = \frac{S_{\max}}{S_{\min}} = \frac{5,6}{2,0} = 2,8;$$

S_{\max} и S_{\min} - максимальное и минимальное значение среднего износа по поверхности корыта пера лопатки.

Анализ особенностей изменения величины разрушения лопаток по ступеням компрессора

Для анализа эрозионно-коррозионных разрушений покрытий пера лопатки по тракту компрессора ГТД исследованы особенности изменения остаточной толщины покрытия по корыту пера лопатки в зависимости от номера ступени. Данные исследования выполнялись на базе двадцати ГТД модели ТВ3-117. Характерные результаты по 10-ти лопаткам каждой ступени одноименного двигателя представлены в табл. 5.2. Остаточная толщина покрытия корыта пера лопатки измерялась с помощью толщиномера покрытий К-5 (рис. 5.3).

В предпоследней строке табл. 5.2 приведена средняя остаточная толщина покрытия на поверхности корыта пера по десяти лопаткам. В последней строке приведены данные по среднему износу (эрозионно-коррозионному разрушению), покрытия при начальной толщине покрытия лопаток 6 мкм.

Анализ особенностей разрушений покрытий показывает, что эрозионно-коррозионные разрушения покрытий лопаток компрессора зависят от номера ступени и величина их изменяется по ходу перемещения пылегазового потока по тракту двигателя. Обычно, наибольшие разрушения покрытий происходят на лопатках 1-й ступени. Далее, с увеличением номера ступени компрессора, разрушения покрытий лопаток уменьшаются. При этом возможны случаи незначительного увеличения интенсивности разрушения покрытия на предпоследней и последней ступени компрессора. Это обусловлено особенностями конструкции компрессора и характеристиками движения пылегазового потока по тракту компрессора ГТД.

Анализ результатов, приведенных в табл. 5.2, показал, что величина неравномерности износа покрытия на лопатках компрессора в зависимости от номера ступени будет составлять следующую величину:

$$k_2 = \frac{S_1}{S_{10}} = \frac{4,2}{2,0} = 2,1;$$

S_1 и S_{10} - максимальное и минимальное среднее значение разрушения покрытия по поверхности корыта пера лопатки.

Таблица 5.2. Значения максимальной остаточной толщины нитрид титанового покрытия по корыту пера лопатки по ступеням ГТД

Номер лопатки	Номер ступени компрессора ГТД											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Максимальная остаточная толщина покрытия по корыту пера, мкм											
1	1	2	2	3	2	3	3	3	4	5	4	4
2	1	2	2	2	3	4	3	3	4	4	4	4
3	2	2	2	2	3	2	4	3	4	3	4	4
4	2	1	2	2	3	3	4	4	3	4	4	3
5	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	3	4
6	2	2	2	2	2	3	3	4	4	3	3	3
7	2	2	2	3	3	2	4	4	4	4	5	4
8	2	2	3	2	3	3	3	4	4	5	4	4
9	2	2	2	3	2	4	4	4	4	4	4	3
10	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4
Средняя толщина	1,8	1,9	2,1	2,4	2,6	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0	3,9	3,7
Средний износ	4,2	4,1	3,9	3,6	3,4	3,0	2,6	2,3	2,1	2,0	2,1	2,3

Таким образом, выполненные исследования позволили 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.

5.2. Обеспечение ФОС по покрытию пера лопатки каждой ступени и по лопаткам в зависимости от номера ступени компрессора ГТД

Выполненные ранее исследования позволили установить, что процесс эрозионно-коррозионных разрушений функциональных элементов лопатки компрессора имеет определенные особенности:

- неравномерное разрушение поверхности и функциональных элементов пера лопатки на каждой ступени компрессора;
- неравномерное разрушение лопаток в зависимости от номера ступени компрессора ГТД.

В данной работе предлагается обеспечить специальные свойства лопаток на базе ФОП [86, 87], а именно:

1. Изменяющиеся свойства покрытия на поверхностях пера лопатки.
2. Изменяющиеся свойства лопаток в зависимости от номера ступени компрессора ГТД.

Эти покрытия предполагается реализовывать базе выполнения принципа полного единовременного разрушения покрытия по всей поверхности лопатки и по всем ступеням компрессора ГТД. Это позволит следующее:

1. Исключить разрушения основного материала лопатки в условиях неравномерного действия эрозионно-коррозионного износа, как по поверхности пера лопатки, так и по лопаткам ступеней компрессора. Это выполняется за счет применения ФОП со сверхпрочными свойствами (вакуумные ионно-плазменные покрытия).
2. Повысить ресурс работы ГТД до капитального ремонта за счет повышения эксплуатационного потенциала ФОП 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.

Процесс напыления ФОП [86, 87] выполняется в данном случае на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и обеспечения изменяющихся свойств покрытия в зависимости от особенности эксплуатации лопатки (рис. 5.2). Составление структуры ФОП лопатки выполняется на базе схемы разрушения поверхности пера лопатки со стороны корыта в зависимости от длительности эксплуатации, представленной на рис. 5.2.

В табл. 5.3 представлена матрица структуры ФОП пера лопатки в зависимости от номера ступени компрессора. В матрице показано необходимое количество покрытий и их толщина для каждого слоя в зависимости от номера ступени компрессора ГТД. При этом топография покрытия на поверхности пера лопатки определяется особенностями эрозионно-коррозионных разрушений (рис. 5.2), которые определяются на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и реализации свойств лопаток в зависимости от особенностей их эксплуатации в ГТД.

Можно отметить, что необходимое количество покрытий последовательно наносятся на поверхности пера лопатки в соответствии с табл. 5.3, с помощью специальных темплетов-экранов, обеспечивающих необходимую топографию каждого слоя на поверхности лопатки. Для формирования ФОП необходима специальная технология, обеспечивающая последовательную реализацию специальных покрытий и обеспечения адаптации лопаток при изготовлении к особенностям их эксплуатации в ГТД.

На базе матрицы структуры ФОП пера лопатки в зависимости от номера ступени компрессора, приведенной в табл. 5.3, определяется количество покрытий формируемых на пера лопатки и их толщина в зависимости от номера ступени. При этом топография и структура покрытий корыта пера лопатки определяют заданные параметры толщины покрытия на поверхности лопатки в зависимости от особенностей разрушения покрытия в процессе эксплуатации ГТД. Это дает возможность повысить ресурс ГТД при действии неравномерных функций на поверхности пера лопатки и в зависимости от номера ступени компрессора.

Таблица 5.3. Матрица структуры ФОП пера лопатки в зависимости от номера ступени компрессора.

Номер ступени	Количество зональных слоев покрытий	Толщина покрытия в зависимости от номера, мкм				Максим. суммарная толщина покрытий	Миним. толщина покрытия	Коэф. k_1	Коэф. k_{2i}
		1	2	3	4				
1	4	3,0	3,0	3,0	5,0	14,0	5,0	2,8	-
2	4	3,5	2,5	2,6	4,8	13,4	4,8	2,8	1,024
3	4	3,5	2,5	2,5	4,7	13,2	4,7	2,8	1,051
4	3	4,0	4,1	4,5	-	12,6	4,5	2,8	1,083
5	3	4,0	3,6	4,2	-	11,8	4,2	2,8	1,059
6	3	4,0	3,4	4,1	-	11,5	4,1	2,8	1,133
7	2	6,5	3,6	-	-	10,1	3,6	2,8	1,153
8	2	5,6	3,1	-	-	8,7	3,1	2,8	1,130
9	2	4,9	2,7	-	-	7,6	2,7	2,8	1,095
10	2	4,3	2,4	-	-	6,7	2,4	2,8	1,050
11	2	4,5	2,5	-	-	7,0	2,5	2,8	1,050
12	2	4,9	2,7	-	-	7,6	2,7	2,8	1,095

В табл. 5.3 обозначено следующее: k_1 - коэффициент неравномерности износа корыта пера лопатки, k_{2i} - коэффициент неравномерности износа данной лопатки относительно предыдущей в зависимости от номера ступени i компрессора.

5.3. Алгоритм синтеза структуры технологического процесса обеспечения ФОП лопаток компрессора

Комплексный технологический процесс реализации функционально-ориентированных покрытий лопаток компрессора состоит из трех этапов (рис. 5.4). При этом II этап технологического процесса реализуется в соответствии с матрицей табл. 5.3. Здесь можно отметить, что количество наносимых ФОП на лопатки определяется номером ступени компрессора.

На рис. 5.4 приведен граф комплексного технологического процесса реализации ФОП на лопатки компрессора. На II этапе технологического процесса вы-

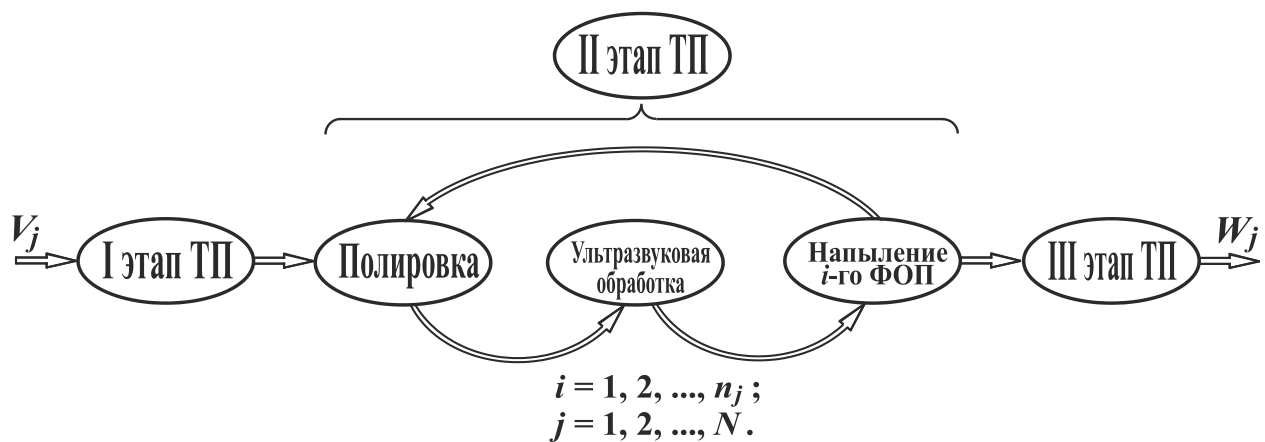


Рисунок 5.4. Граф комплексного технологического процесса реализации ФОП на лопатки компрессора

полняются 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 возвратная 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.

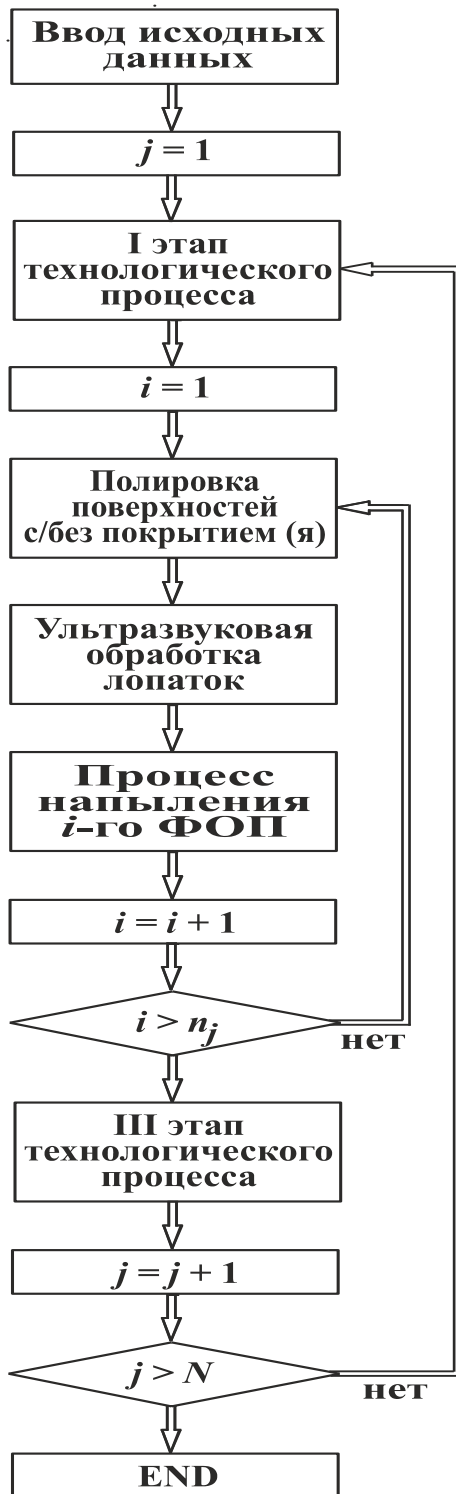


Рисунок 5.5. Алгоритм реализации комплексного технологического процесса выполнения ФОП

На рис. 5.5 представлен алгоритм реализации комплексного технологического процесса выполнения ФОП на лопатки компрессора ГТД. Здесь, технологический процесс имеет два возвратных цикла для нанесения n_j покрытий на лопатки каждой ступени и для выполнения нанесения покрытий на N ступеней лопаток компрессора. Для выполнения комплексного технологического процесса для каждой лопатки компрессора выполняется три этапа.

I этап технологического процесса включает все необходимые технологические операции ОУО, которые необходимы как для новых лопаток, так и для их восстановления при ремонте ГТД [43, 73, 75, 77].

На II этапе комплексного технологического процесса выполняется напыление n_j покрытий на лопатки. При этом для выполнения адгезии покрытия с основным материалом лопатки и когезии между собой покрытий выполняются полировка поверхностей перед каждым напылением покрытия и ультразвуковая обработка лопаток.

III этап комплексного технологического процесса включает заключительную отделочную обработку лопаток компрессора с ФОП после нанесения покрытий. Это может быть процесс гляцевания покрытия пера лопатки компрессора, насыщение газами (например, азотирование) покрытия и другие заключительные финишные методы

обработки [44, 48, 53, 54, 66, 70, 74, 80].

5.4. Структурный синтез универсального комплексного технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора

Можно отметить, что в ГТД лопатки компрессора могут использоваться без покрытий и с вакуумными ионно-плазменными покрытиями, нанесенными на основе нитрид титана. При эксплуатации ГТД возможны следующие случаи износа ионно-плазменных покрытий на лопатках компрессора:

- покрытие не имеет зон полного износа и разрушений,
- покрытие имеет зоны полного износа и разрушений на кромках пера лопатки,
- покрытие имеет зоны полного износа и разрушений на кромках и поверхностях пера лопатки.

Можно отметить, что в последнем случае разрушения покрытия, начинается процесс интенсивного коррозионно-эрозионного разрушения материала тела лопатки, которые приводят к потере ремонтпригодности лопаток компрессора в целом. Поэтому в этом случае необходимо выполнять тщательный осмотр и дефектацию лопаток с учетом их ремонтпригодности (рис. 5.6).

В зависимости от особенностей разрушения вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхностях пера лопатки составляется своя структура технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД. Поэтому структура этого технологического процесса многовариантна, она строится с учетом наличия или отсутствия старых покрытий, степени разрушения покрытия и особенностей нанесения нового вакуумного ионно-плазменного покрытия. Также следует отметить, что структура технологического процесса может включать азотирование лопаток, которое является эффективным средством дополнительного повышения стойкости лопаток компрессора.

На рис. 5.6 представлена универсальная структура технологического процесса восстановления лопаток из титановых сплавов ГТД ТВ3-117 с нанесением ионно-плазменных покрытий. Здесь показано: *V* – вход технологического процес-



са; W – выход технологического процесса; v_{11} – вход 11-й операции; w_{10} – выход 10-й операции.

Универсальная структура технологического процесса восстановления лопаток (рис. 5.6) содержит следующие операции:

1. Осмотр и дефектация лопаток. На этом этапе определяется ремонтпригодность лопаток в целом.

2. Предварительная очистка лопаток от коррозии и нагара. Очистка элементов и поверхностей лопаток может выполняться:

2.1. Посредством легкой обдувки мелким электрокорундом или карбидом кремния черным или зеленым на основе пневмо абразивно-струйной обработки.

2.2. За счет очистки в ультразвуковой ванне.

3. Окончательная зачистка и заполировка мелких забоин, вмятин, коррозионно-эрозионных повреждений.

4. Сортировка лопаток по наличию покрытия:

4.1. Лопатки без покрытия. Если лопатки без покрытия, то они направляются на контроль геометрии лопаток.

4.2. Лопатки с вакуумными ионно-плазменными покрытиями.

5. Сортировка лопаток по степени износа и разрушения покрытия.

5.1. Покрытие не имеет зон полного износа и разрушений,

5.2. Покрытие имеет зоны полного износа и разрушений на кромках пера лопатки,

5.3. Покрытие имеет зоны полного износа и разрушений на кромках и поверхностях пера лопатки.

6. Синтез структуры технологического процесса (III). Здесь структура определяется в зависимости от необходимости удаления покрытия:

6.1. С полным удалением покрытий для лопаток по пунктам 5.1, 5.2, 5.3. Здесь возможно два варианта удаления покрытия.

6.2. С частичным удалением покрытий для лопаток по пунктам 5.1, 5.2, 5.3. Здесь возможно два варианта удаления покрытия.

6.3. Без удаления покрытия для лопаток по пунктам 5.1, 5.2, 5.3. Если лопатки без покрытия, то они направляются на контроль геометрии лопаток.

7. Химическое травление, разрыхление и растворение старых покрытий.

8. Съем покрытия опорным полированием.

В этом случае полирование имеет определенные особенности, связанные с тем, что обработка выполняется одновременно двух разнородных по свойствам материалов, а именно, особо твердого нитрид титанового покрытия с микротвердостью $H_\mu = 21 \dots 25$ ГПа и более мягкого титанового сплава ВТ 8М с микротвердостью $H_\mu = 1,2 \dots 1,5$ ГПа. При одновременной обработке двух различных по твердости материалов их обработка должна выполняться с опорой инструмента (полировального круга) на более твердый материал (на покрытие). Это обусловлено тем, что при обработке покрытия необходимо в 2-3 раза большее усилие прижима полировального круга, чем при обработке титанового сплава. В момент полного удаления покрытия возможно продавливание титанового сплава, так как усилие прижима полировального круга для титанового сплава должно быть значительно меньшим. Поэтому обрабатываемая поверхность пера лопатки получает значительную бугристость (бугристая волнистость). При опорном полировании должно преобладать абразивное резание. В целом полирование характеризуется абразивными, химическими, пластическими и термическими процессами.

9. Предварительное размерное полирование поверхностей лопатки. На этой операции выполняется восстановление геометрии лопатки, нарушенной на этапах эксплуатации или обработке поверхностей. В этом случае должно преобладать абразивное резание. Эта операция выполняется после контроля геометрии лопаток. Параметры шероховатости $R_a = 0,4 \dots 0,16$ мкм.

10. Контроль геометрии лопаток.

11. Окончательное сглаживающее полирование элементов пера лопатки. Для нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, элементы и поверхности пера лопатки необходимо подготовить к нанесению покрытия и обеспечить заданные параметры шероховатости $R_a = 0,100 \dots 0,063$ мкм. На этой операции возможны три характерных случая обработки. При обработке только основного

материала лопатки, а именно титанового сплава ВТ 8М, преобладает пластическая деформация материала. При обработке только покрытия, а именно нитрид титанового покрытия, преобладает комбинация химических и микропластических процессов. При совместной обработке двух материалов (основного и покрытия) выполняется опорное полирование.

12. Предварительное глянцеование (зеркальное сглаживающее полирование) покрытий и/или основного материала пера лопатки. На этой операции преобладает комбинация химических, термических и микропластических процессов. Параметры шероховатости на этой операции составляют следующие величины $R_a = 0,050 \dots 0,032$ мкм.

13. Мойка лопаток в ультразвуковой ванне. На поверхности пера лопатки остаются загрязнения и окислы, которые необходимо удалить и очистить поверхности от их наличия. Этот процесс выполняется с помощью ультразвуковой обработки в специальных ваннах. В качестве источника колебаний применяется установка ультразвуковых колебаний УЗГ 3-4 и магнитострикционные преобразователи ПМС 2,5-18. В качестве обрабатывающей жидкости в ванне используется раствор следующего состава: тринатрийфосфат технический – 30-40 г/л; сода кальцинированная техническая 20-30 г/л; поверхностно активное вещество ОП-7 или ОП-10 – 3,5 г/л. Температура раствора 50-60 °С. Далее выполняется промывка лопаток под проточной водой.

14. Протирка пера лопатки бензином, ацетоном и спиртом. Сначала лопатка обрабатывается бензином «Галоша» (БР-1) ГОСТ 443-76, затем эфиром и потом выполняется их промывка в спирте этиловом ректификационном.

15. Азотирование рабочих поверхностей лопаток. Азотирование поверхностей необходимо для упрочнения материала лопатки, обеспечения необходимых структурных и фазовых свойств материала лопаток после их эксплуатации. В этом случае азотирование лопаток компрессора целесообразно выполнять следующими методами:

15.1. Ионное азотирование в тлеющем разряде.

15.2. Азотирование в вакуумно-дуговом разряде.

Эти процессы реализуются с помощью вакуумных ионно-плазменных установок, например ННВ 6.6-И1. Использование этих установок позволяет сразу реализовать после азотирования нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Операция азотирования в данном технологическом процессе не обязательна и может не выполняться.

16. Нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхности пера лопатки. Нанесение покрытий выполняется на базе вакуумных ионно-плазменных установок, например ННВ 6.6-И1. Основные этапы нанесения покрытий следующие:

16.1. Очистка поверхностей лопатки ионным травлением в газовом разряде.

16.2. Очистка поверхностей ионной бомбардировкой и нагрев лопаток.

16.3. Нанесение покрытий на поверхности лопатки. Процесс нанесения покрытий может быть многовариантным, число различных вариантов может быть 1, 2, 3, ..., R . Это могут быть однослойные покрытия и многослойные покрытия, одноэлементные (типа TiN , TiC) и многоэлементные (типа $(Ti,Al)N$, $(Ti,Zr)N$) покрытия, многокомпонентные (типа $TiCN$, $ZrCN$) покрытия, а также композиционные покрытия (типа $(Ti,Al)CN$, $(Ti,Zr)CN$). Кроме того, для повышения стойкости покрытий к коррозионно-эрозионным процессам при эксплуатации лопаток рекомендуется нанесение ФОП [86].

17. Разгрузка лопаток.

18. Окончательное глянцеование (зеркальное сглаживающее полирование) покрытий. На этой операции преобладает комбинация химических, пластических и микропластических процессов. Параметры шероховатости на этой операции составляют следующие величины $R_a = 0,040 \dots 0,020$ мкм.

19. Полный контроль лопаток.

Представленная структура технологического процесса для восстановления лопаток компрессора ГТД является универсальной. На базе этой структуры выполняется выбор конкретных вариантов процессов для восстановления лопаток компрессора с нанесением новых вакуумных ионно-плазменных покрытий для различных случаев наличия на лопатках старых покрытий.

Универсальная структура технологического процесса нанесения новых покрытий включает возможность их нанесения с ФОС [86], обеспечивающими предельный эксплуатационный потенциал использования лопаток в ГТД. Однако для реализации ФОП на лопатки необходимы дополнительные исследования, которые будут представлены далее.

5.5. Экспериментальная реализация ФОП лопаток компрессора

В данном параграфе выполнены исследования по реализации II этапа технологического процесса выполняемого в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 5.5. Параметры покрытий формировались в соответствии с данными, приведенными в табл. 5.3. Для II этапа технологического процесса выполнялись следующие операции:

- полировка поверхностей лопатки (без покрытий, с новыми покрытиями, со старыми покрытиями) на специальном полировальном станке (рис. 3.19) с применением специального полирующего инструмента (полировальников);
- ультразвуковая обработка (очистка) лопаток компрессора с применением ультразвуковой установки и ванны (рис. 4.18), а также специальных кассет (рис. 4.19);
- нанесение многослойного ФОП на вакуумной ионно-плазменной установке ННВ 6.6-И1 (рис. 4.15) с применением специальных темплетов-экранов и напылением нитрид титановых покрытий

Для полировки использован специальный полировальник и полирующая паста, параметр шероховатости поверхностей лопаток составил $R_a = 0,06...0,08$ мкм.

Перед нанесением нитрид титанового покрытия на поверхность пера лопатки выполнялась ультразвуковая очистка поверхностей с применением ультразвуковой установки и специальной ванны, кассет и технологической среды. При этом процесс обработка лопаток компрессора составляет в течении 10 мин.

Вакуумное ионно-плазменное напыление нитрид титановых покрытий лопаток компрессора выполнялось на установке ННВ 6.6-И1 (рис. 4.15). В качестве материала катодов использовался титановый сплав ВТ 1-0, имеющий состав,



Рисунок 5.7. Общий вид катодов из титанового сплава ВТ 1-0 для установки ННВ 6.6-И1 для напыления лопаток компрессора



Рисунок 5.8. Общий вид катода установки ННВ 6.6-И1, отработавшего 7 часов

представленный в табл. 5.4. Общее количество катодов на установке равно трем (рис. 5.7) [109, 110, 111, 112].

Напыление вакуумных ионно-плазменных ФОП на лопатки компрессора проводились в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 5.6, со следующими технологическими параметрами:

- загрузка специальной кассеты с лопатками, прогрев и откачка вакуумной камеры;

- очистка поверхностей лопаток ионным травлением в газовом разряде (откачка до давления $2,6 \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$ Па);

- очистка поверхности лопаток ионной бомбардировкой металла и нагрев до рабочих температур (напряжение смещения находится в пределах $1000 \dots 1400$ В, длительность не менее 120 с);

- металлизация пера лопатки (60 с);

- нанесение покрытия на поверхности пера лопатки (ток дуги на всех испарителях (катодах) находится в пределах $90 \dots 100$ А; напряжение на подложке находится в пределах $150 \dots 300$ В (работают все ка-

тоды); атмосфера азотирующая разряженная до $1,1 \cdot 10^{-1}$ Па; количество покрытий, толщина каждого покрытия и время нанесения покрытия определяется в соответ-

ствии с табл. 5.5);

- охлаждение и выгрузка кассеты с лопатками;
- контроль качества лопаток с покрытиями.

Таблица 5.4. Химический состав катодов установки ННВ 6.6-И1

Сплав катода	Химический состав, % масс.								
	Ti	Al	C	Fe	Si	O ₂	N	H	Ост.
BT 1-0	Осн.	0,41	0,06	0,18	0,03	0,18	0,04	0,005	0,30

Таблица 5.5. Матрица структуры функционально-ориентированного покрытия пера лопатки в зависимости от номера ступени компрессора.

Номер ступени	Количество зональных слоев покрытий	Длитель- ность ме- таллизации, с	Толщина и длительность напыления нитрид титано- вых покрытий в зависимости от номера покрытия на лопатке (1 мкм за 90 с)							
			1		2		3		4	
			мкм	с	мкм	с	мкм	с	мкм	с
1	4	60	3,0	270	3,0	270	3,0	270	5,0	450
2	4	60	3,5	315	2,5	225	2,6	234	4,8	432
3	4	60	3,5	315	2,5	225	2,5	225	4,7	423
4	3	60	4,0	360	4,1	369	4,5	405	-	
5	3	60	4,0	360	3,6	324	4,2	378	-	
6	3	60	4,0	360	3,4	306	4,1	369	-	
7	2	60	6,5	585	3,6	324	-		-	
8	2	60	5,6	504	3,1	279	-		-	
9	2	60	4,9	441	2,7	243	-		-	
10	2	60	4,3	387	2,4	216	-		-	
11	2	60	4,5	405	2,5	225	-		-	
12	2	60	4,9	441	2,7	243	-		-	

На рис. 5.8 представлен общий вид катода установки ННВ 6.6-И1, отработавшего 7 часов рабочего времени по нанесению покрытий на лопатки компрессора ГТД модели ТВ3-117 (покрытия наносились для 20 авиационных двигателей).

В качестве примера на рис. 5.9 показан общий вид лопатки 1-й ступени компрессора с последовательно напыленным четырехслойным ФОП (нитрид титановое). Здесь представлено: на рис. 5.9,а показана лопатка с одним слоем по-

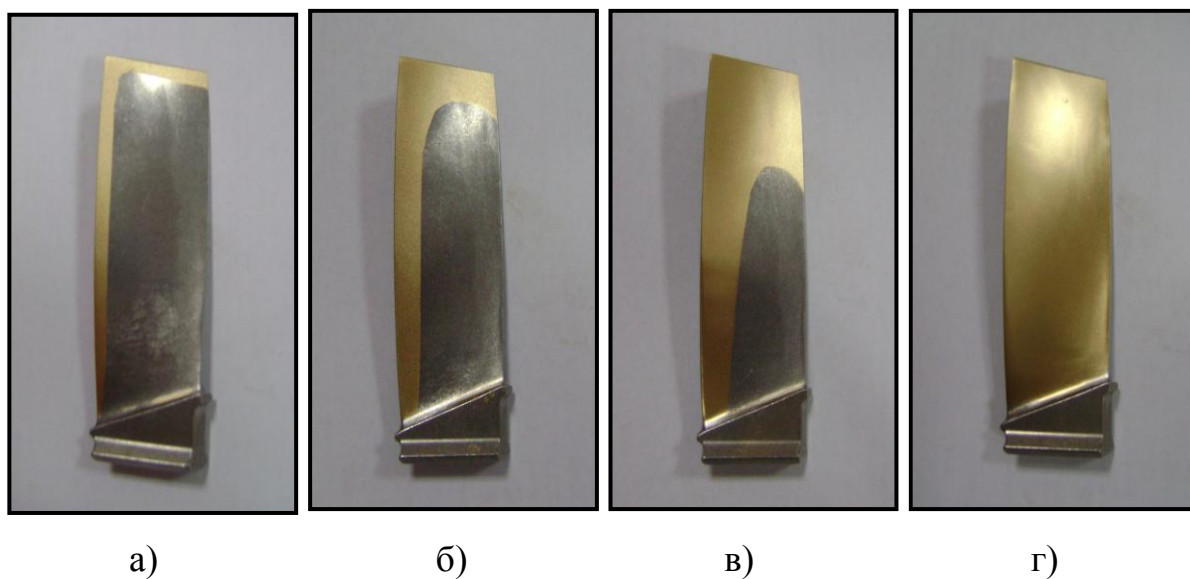


Рисунок 5.9. Общий вид лопатки 1-й ступени компрессора с последовательно напыленным четырехслойным ФОП (нитрид титановое): а – с одним слоем, б – с двумя слоями, в – с тремя слоями, г – с четырьмя слоями

покрытия; на рис. 5.9,б – с двумя слоями покрытия; на рис. 5.9,в – с тремя слоями покрытия; на рис. 5.9,г – с четырьмя слоями покрытий.

При напылении четырехслойного ФОП параметры покрытий определялись в соответствии с табл. 5.5. При этом каждый раз перед напылением покрытия выполнялись операции полирования и ультразвуковой очистки поверхностей лопаток компрессора. Используя предлагаемый подход в работе реализованы ФОП для лопаток компрессора ГТД.

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.

5.6. Сравнительная экспериментальная оценка эрозионных разрушений покрытий лопаток компрессора

Для определения особенностей эрозионно-коррозионных разрушений нитрид титанового покрытия пера лопатки и толщины покрытия на поверхности пера лопатки выполнен ряд исследований. Эти исследования направлены на следующее:

1. Определение зависимости абразивного изнашивания нитрид титанового покрытия от его толщины на поверхности пера лопатки компрессора.
2. Определение зависимости пневмоабразивного эрозионного разрушения нитрид титанового покрытия от его толщины на поверхности пера лопатки компрессора.
3. Установление закономерности эрозионно-коррозионных разрушениях покрытия пера лопатки при эксплуатации ГТД и определение необходимой толщины ФОП в зависимости от особенностей его разрушения по поверхности лопатки из условия единовременного полного разрушения покрытия.

Для определения зависимости абразивного изнашивания нитрид титанового покрытия от его толщины на поверхности пера лопатки компрессора выполнены

исследования по определению этих параметров. Исследования выполнялись с помощью специальных образцов свидетелей (рис. 5.10), на которые наносилось нитрид титановое покрытие, следующей толщины: 2,5 мкм; 5,0 мкм; 7,5 мкм. Для каждой толщины покрытия изнашивалось 3 образца-свидетеля. В качестве инструмента применялся специальный абразивный полировальник с абразивом зернистостью M40/28 (ГОСТ 3547-80) (F280 по ИСО 8486-86) с прорезиненной основой (рис. 5.11). Прикладываемое усилие 3 кг (30 Н), исследования проводились до полного износа покрытия с протиром пятна износа диаметром 2,0 мм. Результаты исследований по определению зависимости длительности износа нитрид титанового покрытия в зависимости от его толщины представлены на графике 1



Рисунок 5.10. Общий вид образцов-свидетелей с покрытием



Рисунок 5.11. Абразивный полировальник с прорезиновой основой

специальных образцов свидетелей (рис. 5.10), на которые наносилось нитрид титановое покрытие, следующей толщины: 2,5 мкм; 5,0 мкм; 7,5 мкм; 10,0 мкм; 12,5 мкм. Для каждой толщины покрытия эрозионным разрушениям подвергались 3

образца-свидетеля. Прикладываемое усилие 3 кг (30 Н), исследования проводились до полного износа покрытия с протиром пятна износа диаметром 2,0 мм. Результаты исследований по определению зависимости длительности износа нитрид титанового покрытия в зависимости от его толщины представлены на графике 1 рис. 5.12. Анализ полученных результатов позволил установить, что величина износа покрытия по его толщине находится в прямой пропорциональной зависимости от времени износа.

Для определения зависимости абразивно-струйного разрушения нитрид титанового покрытия от его толщины на поверхности пера лопатки компрессора выполнены исследования по определению этих параметров. Данные исследования также выполнялись с помощью

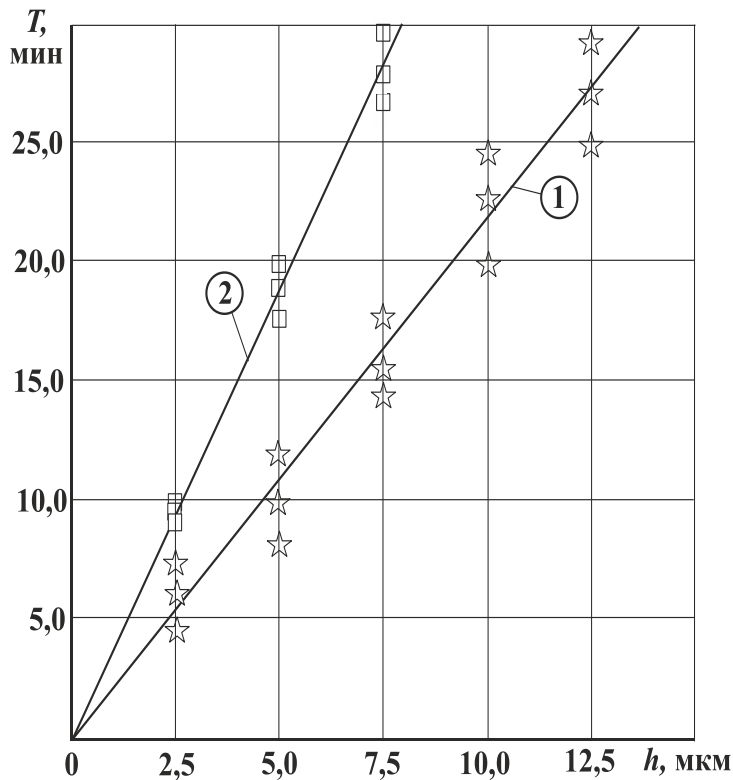


Рисунок. 5.12. Зависимость длительности износа нитрид титанового покрытия от его толщины: 1 – абразивный полировальник, 2 – абразивно-струйная обработка

образца-свидетеля. Испытания образцов проводились с использованием пневмо абразивно-струйного аппарата (рис. 5.13). В качестве абразивного материала использован черный карбид кремния, зернистостью M40. Давление воздуха в пневмо абразивно-струйном аппарате составляло не менее 0,4 МПа, диаметр сопла 3,4 мм, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности образца-свидетеля. Результаты исследований по определению зависимости длительности эрозионного разрушения нитрид титанового покрытия в зависимости от его толщины представлены на графике 2 рис.



Рисунок 5.13. Установка для пневмо абразивно-струйной обработки лопаток компрессора

5.12. Анализ полученных результатов позволил также установить, что величина эрозионного разрушения покрытия по его толщине находится также в прямой пропорциональной зависимости от времени износа.

При этом учитывая тот факт, что процесс эрозионно-коррозионных разрушений ФОП пера лопатки компрессора

ра в процессе эксплуатации ГТД также подчиняется закону прямой пропорциональной зависимости можно записать следующее выражение:

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

где A_x - наработка лопатки до ее восстановления (час);

h_x - толщина покрытия в заданной зоне лопатки компрессора ($h_{x \max} = 14$ мкм для первой ступени).

5.7. Перспективные варианты лопаток компрессора с ФОС

В работе предложены перспективные варианты лопаток компрессора (патент Украины № 94961, В23Р 15/00, 2010 г.) [108] с ФОС, основные особенности создания которых, можно распространить и на лопатки турбины ГТД. Рассмотрим эти варианты более подробно (рис. 5.14).

Вариант 1. На рис. 5.14, а представлена лопатка компрессора с ФОС в направлении C . Здесь скелет выполнен с параллельными стержнями. Причем свойства скелета и/или основы могут иметь изменяющиеся свойства в зависимости от действия эксплуатационных функций.

На рис. 5.14,а представлена лопатка компрессора, которая состоит из пера 1 и соединенного буртиком 2 хвостовика. При этом перо лопатки выполнено в виде соединенного между собой гребенчатого скелета 4 и основы лопатки 5. При этом скелет и/или основа может выполняться с постоянными или ФОС, изменяющимися в зависимости от действия на лопатку эксплуатационных функций. Причем скелет лопатки может выполняться из комплексно легированных сталей, а основа лопатки из металлокерамики с функционально ориентированными свойствами.

Применение данного варианта лопатки позволяет решить вопросы повышения жаропрочности и жаростойкости лопаток при обеспечении ФОС лопаток позволяющих обеспечить качественно новые их свойства.

Вариант 2. На рис. 5.14, б представлена лопатка компрессора с ФОС в на-

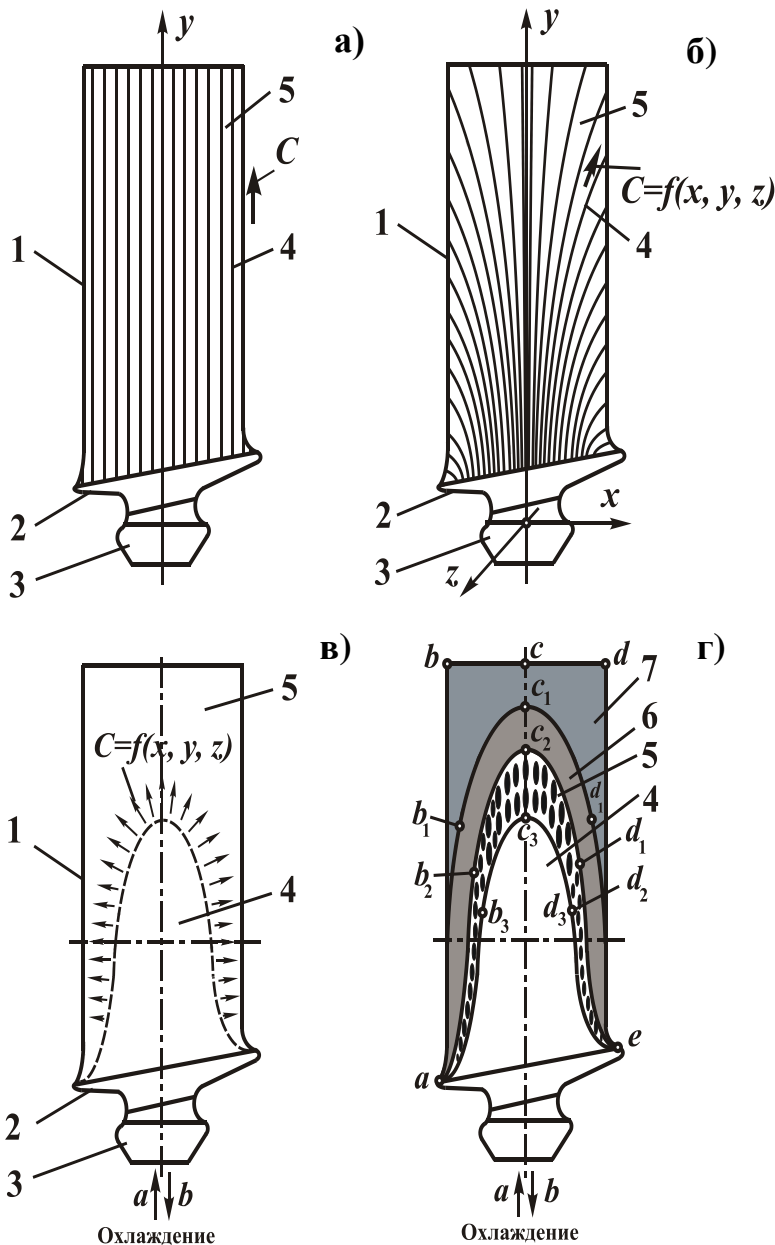


Рисунок 5.14. Варианты лопаток с ФОС: а – скелет с параллельными стержнями, б – скелет в виде опахала пера, в – основа имеет изменяющиеся свойства по координатам, г – основа имеет ступенчатые свойства

правлении $C = f(x, y, z)$. Здесь, скелет пера лопатки выполнен в виде опахала пера птицы. Можно отметить, что этот вариант лопатки может иметь предельные свойства по сравнению с предыдущим вариантом. В данном варианте лопатки, позиции рис. 5.14,б соответствуют позициям рис. 5.14,а. При этом свойства скелета пера лопатки могут функционально-ориентированно изменяться в соответствии с направлением $C = f(x, y, z)$ Ю а именно также, как они изменяются в опахале пера птицы. Причем основа пера лопатки может иметь различные свойства.

Вариант 3. На рис. 5.14,в представлена лопатка компрессора с ФОС основы, которые изменяются по координатам $C = f(x, y, z)$. В данном варианте лопатки, позиции рис. 5.14,в соответствуют позициям рис. 5.14,а. Комбинируя свойства

лопатки варианта 2 и варианта 3 обеспечиваются ФОС, как скелета, так и основы. Следует также заметить, что предлагаемая лопатка отличается также тем, что ос-

нова пера лопатки выполнена из двух зон, охлаждаемой и неохлаждаемой, причем неохлаждаемая зона изготавливается с постоянно изменяющимися свойствами, пропорциональными действию градиента температуры и напряжений в объеме пространства пера лопатки. При этом за счет основы, выполненной из металлокерамики можно обеспечить необходимую жаростойкость и жаропрочность лопаток компрессора двигателей следующих за уже применяемыми поколениями лопаток.

Вариант 4. На рис. 5.14,г представлена лопатка компрессора со ступенчатыми свойствами. Здесь позиции 1, 2 и 3 рис. 5.14,г соответствуют позициям рис. 5.14,а, позиции 4, 5, 6 и 7 обозначают зоны основы лопатки со ступенчатыми свойствами. При этом линии с буквами (рис. 5.14,г) ограничивают зоны пера лопатки со ступенчатыми физико-механическими свойствами.

Предлагаемая лопатка отличается также тем, что основа пера лопатки выполнено из двух зон, охлаждаемой и неохлаждаемой, причем неохлаждаемая зона изготавливается из множества участков со ступенчато изменяющимися свойствами, ступенчато пропорциональными действию градиента температуры и напряжений в объеме пространства пера лопатки.

Таким образом, представленные на рис. 5.14 варианты лопаток компрессора ГТД являются перспективными вариантами лопаток с ФОС, формируемыми в зависимости от особенностей эксплуатации их в ГТД, обеспечивающими качественно новые свойства и возможности. Однако эти решения требуют дальнейших исследований и проработок.

5.8. Основные рекомендации работы

Выполненные в данной работе исследования позволили сформулировать следующие общие рекомендации:

1. При технологической проработке структуры процессов необходимо учитывать то, что при эксплуатации лопаток компрессора ГТД на них действуют неравномерные эксплуатационные функции. При этом происходят неравномерные эрозионно-коррозионные разрушения поверхностей и функциональных элементов

лопаток. Эти неравномерные разрушения лопаток обусловлены особенностями их эксплуатации, структурой их расположения по ступеням компрессора, параметрами тракта компрессора, особенностью пылегазовых потоков по тракту двигателя и другими параметрами воздействий на них при эксплуатации. С помощью ФОП лопаток компрессора обеспечивается возможность компенсации действия неравномерных эксплуатационных функций.

2. Разработка технологического обеспечения для ОУО лопаток компрессора следует вести из условия того, что как по каждой поверхности пера лопатки действуют переменные эрозионно-коррозионные разрушения, так и по группам лопаткам ступеней компрессора по ходу тракта авиационного двигателя.

3. На базе ФОП обеспечивается возможность компенсации двойной неравномерности коррозионно-эрозионных разрушений лопаток, как по поверхности пера каждой лопатки, так и по группам лопаткам, расположенных по номерам ступеней компрессора.

4. Для обеспечения полного потенциала использования покрытий и многократного восстановления лопаток компрессора при ремонте ФОП необходимо реализовывать (как по поверхности пера каждой лопатки, так и по группам лопаткам, расположенных по номерам ступеней компрессора) их создание на базе принципа ЕПИП.

5. ФОП лопаток компрессора ГТД следует реализовывать на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств покрытий в зависимости от действия эксплуатационных функций, а именно эрозионно-коррозионных разрушений поверхностного слоя пера лопатки. В работе предлагается ФОП выполнять многослойно-ступенчатыми - на базе группы особых принципов, формируемых из условия единовременного полного их разрушения в ГТД при эксплуатации из-за эрозионно-коррозионных воздействий.

6. Укрупненная структура комплексного технологического процесса изготовления лопаток должна формироваться из трех этапов ОУО лопаток компрессора.

7. 1-й этап технологического процесса обработки лопатки компрессора до напыления покрытия имеет структуру, которая приведена на рис. 3.2. Здесь можно отметить, что на рис. 3.2 представлена структура отделочной обработки элементов пера лопатки для восстановления лопаток после эксплуатации. Процесс восстановления лопаток компрессора выполняется за счет реализации целого комплекса операций. Этот процесс имеет многовариантную структуру и начинается с определения ремонтпригодности лопатки компрессора. При этом заканчивается 1-й этап технологического процесса восстановления лопаток предварительным глянцеваанием пера.

Для новых лопаток, процесс механической отделочной обработки пера лопатки (1-й этап) имеет структуру, представленную на рис. 3.3:

- предварительное размерное полирование поверхностей пера лопатки,
- контроль геометрии пера лопатки компрессора,
- окончательное сглаживающее полирование элементов пера лопатки компрессора.

Далее, реализуется 2-й этап технологического процесса восстановления лопаток компрессора, связанный с нанесением функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Структура 3-го этапа технологического процесса обработки пера при восстановлении лопаток компрессора представлена на рис. 3.4. Здесь выполняются следующие операции:

- окончательное глянцеваание покрытия,
- полный контроль лопаток.

8. В работе исследованы особенности подготовки поверхностей пера лопатки имеющих разнородные материалы к напылению нового покрытия посредством полирования. Разработаны схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки – титанового сплава. Для нанесения нового нитрид титанового покрытия на оставшееся старое покрытие и основной материал поверхности - с одинаковыми свойствами, разработаны рекомендации по опорному одновремен-

ному полированию двух материалов и обеспечению близких параметров шероховатости на покрытии и на основном материале пера лопатки.

9. На базе матрицы структуры ФОП пера лопатки в зависимости от номера ступени компрессора, приведенной в табл. 5.3, определяется количество покрытий формируемых на пера лопатки и их толщина в зависимости от номера ступени. При этом топография и структура покрытий корыта пера лопатки определяют заданные параметры толщины покрытия на поверхности лопатки в зависимости от особенностей разрушения покрытия в процессе эксплуатации ГТД. Это дает возможность повысить ресурс ГТД при действии неравномерных функций на поверхности пера лопатки и в зависимости от номера ступени компрессора.

10. 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.

11. Применение ФОП позволяют полностью адаптировать лопатки к эрозионно-коррозионным разрушениям. При этом значительно повысить заданный эксплуатационный потенциал лопаток компрессора в ГТД.

5.9. Внедрение результатов работы в производство

Представленная работа направлена на повышение ресурса и ремонтпригодности лопаток компрессора ГТД при их изготовлении и/или восстановлении, а также увеличение числа восстановлений в период их общего срока службы, за счет применения ФОП, формируемых на пере лопатки на базе принципа ЕПИП и реализуемых посредством специального технологического обеспечения, структурируемого посредством закономерностей, действующих между операциями технологического процесса. Для решения этих задач и внедрения результатов работы в производство в данной работе выполнено следующее:

- разработана общая методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением ФОП;
- выполнена разработка универсальных технологических процессов восстановления лопаток компрессора ГТД с применением ФОП;
- проведены сравнительные экспериментальные исследования по определению особенностей эксплуатации лопаток компрессора с ФОП, которые показали возможность реализации для лопаток компрессора с помощью покрытий принципа ЕПИП по поверхности лопатки и по всем лопаткам всех ступеней компрессора ГТД;
- в условиях лаборатории кафедры «Технология машиностроения» выполнена промышленная реализация разработанной технологии для лопаток компрессора ГТД для Луганского авиаремонтного завода.

В ходе выполнения диссертационной работы разработана «Общая методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением ФОП». Данная методика внедрена на следующих организациях:

- Снежнянский машиностроительный завод (Донецкая Народная Республика);
- Частное предприятие «Депла» (Луганская Народная Республика);

- ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (Донецкая Народная Республика).

На Снежнянском машиностроительном заводе ведутся работы связанные с разработкой структур технологических процессов восстановления лопаток компрессора ГТД с применением ФОП. На основании совместных работ проводимых Снежнянским машиностроительным заводом с кафедрой «Технология машиностроения» ДонНТУ разработана технология и методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий. Данная технология позволяет обеспечивать следующие параметры лопаток компрессора ГТД: единовременный полный износ ФОП при действии неравномерных эрозионно-коррозионных воздействиях среды; многократное восстановление лопаток при эксплуатации лопаток; получать полный потенциал использования лопаток компрессора; повысить стойкость лопаток при эксплуатации. Разработанную методику «Общая методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением ФОП», предполагается использовать на предприятии для повышения стойкости и времени наработки лопаток компрессора. Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 9800,00 грн. (девять тысяч восемьсот грн. 00 коп.).

Кафедрой технологии машиностроения Донецкого национального технического университета совместно с ЧП «Депла» (Луганск) выполняются научно-исследовательские работы по разработке технологии ремонта и восстановления лопаток газотурбинных двигателей ТВ3-117 для Луганского авиаремонтного завода. Одним из направлений этой работы является разработка комплексной технологии ремонта и восстановления лопаток газотурбинных двигателей ТВ3-117. А также проектирование технологической оснастки ее изготовление с обеспечением высокого качества и эффективности нанесения ионно-плазменных композиционных покрытий на установке ННВ 6.6-И.

Разработанная технология ремонта и восстановления лопаток авиационных двигателей ТВ3-117, представленная в данной диссертационной работе принята к

использованию на Частном предприятии «ДЕПЛА» для выполнения работ по ремонту и восстановлению лопаток авиационных двигателей ТВЗ-117. Ремонтные работы лопаток газотурбинных двигателей выполняются совместно с кафедрой «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 36000,00 грн. (тридцать шесть тысяч грн. 00 коп.) из расчета на один двигатель ТВЗ-117. Для десяти двигателей ТВЗ-117 ожидаемый экономический эффект составит 360000,00 грн. (триста шестьдесят тысяч грн. 00 коп.)

В настоящее время Кафедрой технологии машиностроения Донецкого национального технического университета выполняются научно-исследовательские работы по созданию функционально-ориентированных технологий машиностроения. Одним из направлений этой работы является разработка технологий по нанесению функционально-ориентированных покрытий для лопаток компрессора ГТД. ФОП лопаток компрессора выполняются на базе вакуумных ионно-плазменных технологий, которые позволяют обеспечивать качественно новые свойства лопаток авиационных двигателей. Особенно эффективны эти технологии для восстановления лопаток в процесс эксплуатации ГТД.

В ходе выполнения этих исследований на кафедре технологии машиностроения Донецкого национального технического университета разработана «Общая методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением ФОП», основные положения которых представлены в данной диссертационной работе.

Разработанная методика «Общая методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением ФОП» внедрена в учебный процесс кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета для чтения курсов лекций технологического профиля кафедры.

Представленная на кафедру «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета методика и рекомендации дают возмож-

ность повысить качество подготовки, инженерную компетенцию и навыки студентов и магистрантов, обучающихся на кафедре.

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 технологиче-

ское 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 ТВ3-117 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 вос-

становления 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 эрозивно-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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраимов, Н.В. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов / Н.В. Абраимов, Ю.С. Елисеев – М.: Интер. Инженеринг, 2001. – 622 с.
2. Авиадвигателестроение: Энциклопедия / Общ. ред В.М. Чуйко. – М.: Изд. дом «Авиамир», 1999. – 300 с.
3. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. - Вып. №4. - М.: Академия наук Aviации и Воздухоплавания, 2014. – 187 с.
4. Авиационно-космические материалы. / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, Н.Е. Калинина и др. – Запорожье: ОАО «Митор Сич», 2007. - 383 с.
5. Авіаційні матеріали та їх обробка: Підручник / За ред. Ю.М. Терещенка. – К.: Вища освіта, 2003. – 303 с.
6. Аль-Судани, Т.Т. Технологическое обеспечение повышения стойкости фрез с переменными скоростями резания по длине режущих кромок зубьев / Т.Т. Аль-Судани, Д.А. Михайлов, Е.А. Михайлова // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. - Вип. 1, 2 (43). - С. 24 - 36.
7. Анділахай, О.О. Наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. - Одеса, 2013. - 47 с.
8. Асатурян, В.И. Теория планирования эксперимента. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.
9. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии. / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/д: ДГТУ, 2008. - 694 с.
10. Базров, Б.М. Модульные технологии. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с.
11. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
12. Базров, Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. - М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.

13. Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения. - М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.
14. Бартенев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров - Л.: Машиностроение, 1982. – 215 с.
15. Безъязычный, В.Ф. Назначение режимов резания по заданным параметрам качества поверхностного слоя: учебн. пособие. – Ярославль: РГАТА, 1978. – 86 с.
16. Белоцерковский, М.А. Технология активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 200 с.
17. Берж, К. Теория графов и ее приложения. - М.: ИЛ, 1982. – 319 с.
18. Биркгоф, Г. Теория структур. - М.: ИЛ, 1952. – 407 с.
19. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов. - М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
20. Богуслаев, В.А. Основы технологии машиностроения: Учебн. пособие для студентов машиностр. спец. вузов / В.А. Богуслаев, В.И. Цыпак, В.К. Яценко – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 336 с.
21. Богуслаев, В.А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. – 335 с.
22. Богуцкий, В.Б. Анализ процесса шлифования стружечных канавок протяжек / В.Б. Богуцкий, С.М. Братан // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 3 (49). - С. 15 - 22.
23. Боровский, Г.В. Справочник инструментальщика / Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов; Под общ. ред. А.Р. Маслова. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с.
24. Братан, С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08: защищена 24.03.2006: утв. 01.07.2006. – Одесса, 2006. - 321 с.

25. Бутенко, В.И. Структурная самоорганизация материала поверхностного слоя обрабатываемой детали. – Таганрог: ТРТУ, 2000. - 168 с.
26. Буч, Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: Пер. с англ. - М.: Конкорд, 1992. – 519 с.
27. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
28. Верищак, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
29. Виленский, М.А. Зарубежные вертолеты / М.А. Виленский, Ю.А. Струков // Итоги науки и техники. Авиационное. ВИНТИ, 1982. – 116 с.
30. Витренко, В.А. Нарезание зубьев цилиндрических зубчатых колес при помощи гиперболического инструмента / В.А. Витренко, О.С. О.С. Витренко, Б.С. Воронцов // Сборник трудов XXI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-20 сентября 2014 г. – Донецк: МСМ, 2014. - С. 29-31.
31. Витязь, П.А. Упрочнение газотермических покрытий / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский – Мн.: Беспринт, 2004. – 192 с.
32. Вологин, М.Ф. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин, В.В. Калашников, М.С. Нерубай – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
33. Волчкевич, Л.И. Автоматизация производственных процессов: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2005. – 380 с.
34. Венцель, Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
35. Гавриш, А.П. Фінішна алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів / А.П. Гавриш, П.П. Мельничук – Житомир: ЖДТУ. 2004. - 551 с.
36. Ганзен, М.А. Конструкторско-технологическое обеспечение минимальных радиальных зазоров в лопаточных машинах на основных стадиях жизненного цикла ГТД: Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 - Рыбинск, 2012. - 16 с.
37. Гейчук, В.М. Синтез кінематики процесу магніто-абразивної обробки в кільцевій ванні: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. - Київ, 2012. - 40 с.

38. Горленко, А.О. Технологическое повышение износостойкости деталей с криволинейными поверхностями трения. Автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 - Брянск, 2003. - 31 с.

39. Горленко, О.А. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных показателей деталей маш. // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 3. С. 361-368.

40. Грабченко, А.И. 3D методология исследования процессов алмазно-абразивной обработки / А.И. Грабченко, В.А. Федорович, В.И. Аносов // Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей. - Том 1. – Харків: НТУ «ХП», 2006. - С. 64-84.

41. Грановский, Г.И. Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 200 с.

42. Григорьев, С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.

43. Гусакова, Л.В. Повышение эффективности шлифования поверхностей деталей из высоколегированных и жаропрочных материалов изменением конструкции и состава абразивного инструмента. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Ростов н/д, 2012. - 18 с.

44. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.

45. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. - 223 с.

46. Демин, Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.

47. Дятчин, Н.И. История развития техники: Учеб. пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 320 с.

48. Дубовий, О.М. Технологія напилення покриттів: Підручник. / О.М. Дубовий, А.М. Степанчук – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.

49. Железнов, Г.С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов. / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 456 с.

50. Журавлев, А.Н. Допуски и технические измерения. - М.: Высшая шк., 1981. - 256 с.
51. Егоров, М.Е. Технология машиностроения. / М.Е. Егоров, В.И. Дементьев, С.Д. Тишин – М.: Высшая школа, 1965. – 590 с.
52. Елизаветин, М.А. Технологические способы повышения долговечности машин. / М.А. Елизаветин, Э.А. Сатель – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
53. Емельянов, В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. / В.А. Емельянов, Ж.А. Мрочек, И.А. Иванов - Минск: Интеграл, 1998. – 286 с.
54. Ивашко, В.С. Электрохимическая технология нанесения защитных покрытий. / В.С. Ивашко, И.Л. Куприянов, А.И. Шевцов – Минск: Навука і техника, 1996. – 375 с.
55. Ивлев, Ю.В. Логика: Учебник. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. - 270 с.
56. Иностранные авиационные двигатели. – М.: ЦИАМ, 1992. – 286 с.
57. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова. - М.: Машиностроение, 2005. - 555 с.
58. История конструкторской службы АО «Мотор Сич», - К.: Златограф, 2014. – 112 с.
59. Карпинос, Д.М. Новые композиционные материалы. / Д.М. Карпинос, Л.И. Тучинский, Л.Р. Вишняков – К.: Вища школа, 1977. – 312 с.
60. Качество машин: Справочник. В 2-х т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. - М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.; Т.2 / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. - М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.
61. Каширин, А.И. Технология машиностроения: Учебник для машиностроит. вузов. – М.: ГНТИМЛ, 1949. – 629 с.
62. Кинематика, динамика и точность механизмов: Справочник. / Под ред. Г.В. Крейнина. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
63. Кирсанов, С.В.. Инструменты для обработки точных отверстий. / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе – М.: Машиностроение, 2005. – 335 с.

64. Колесов, И.М. Основы технологии машиностроения: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 591 с.
65. Комплексная автоматизация производства в радиоэлектронной промышленности / В.Н. Тилипалов, Л.Н. Алексеев, А.И. Лобановский и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 248 с.
66. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф. Ильющенко и др. – Мн.: Бестпринт, 1998. – 212 с.
67. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин / В.П. Пономарев, А.С. Батов, А.В. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.
68. Копыл, Г.Ф. Основы технологии и оборудование производства микроэлектронных устройств: Учеб. пособие. – К.: Вища шк., 1992. – 415 с.
69. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. / Г. Корн, Т. Корн - М.: Наука, 1977. - 832 с.
70. Костржицкий, А.И. Многокомпонентные вакуумные покрытия. / А.И. Костржицкий, О.В. Лебединский – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
71. Левитова, О.Н. Повышение эффективности очистки внутренних полостей систем ГТД путем интенсификации движения промывочных сред: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Рыбинск, 2013. - 16 с.
72. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
73. Макаров, В.Ф. Влияние режимов глубинного шлифования на устойчивость процесса и предел выносливости деталей из жаропрочных сплавов /В.Ф. Макаров, С.П. Никитин //Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 3(49). С. 108-113.
74. Мак-Даниель, И. Процессы столкновений в ионизированных газах. – М.: Мир, 1967. - 832 с.
75. Маляренко, А.Д. Современные направления совершенствования технологии обработки высокоточных деталей // Сборник трудов XX международной

научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 2. - С. 115-123.

76. Маслов, А.Р. Приспособления для металлорежущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008, – 320 с.

77. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.; Машиностроение, 1974. – 320 с.

78. Маталин, А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов. - Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

79. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. - 847 с.

80. Машиностроение. Энциклопедия. / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. // Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III – 8. / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 744 с.

81. Машиностроительные материалы: Краткий справочник. / В.М. Раскатов, В.С. Чуенков, Н.Ф. Бессонова, Д.А. Вейс. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.

82. Методы поиска новых технических решений / Под ред. А.И. Половинкина. - Йошкар-Ола: Мар. кн. изд-во, 1976. - 192 с.

83. Мирдель, Г. Электрофизика. – М.: Мир, 1972. – 608 с.

84. Митрофанов, С.П. Групповая технология машиностроительного производства. – Л.: Машиностроение, 1983. - Т. 1, - 404 с.; - Т. 2, - 376 с.

85. Митрофанов, С.П. Автоматизация технологической подготовки серийного производства / С.П. Митрофанов, Ю.А. Гульнов, Д.Д. Куликов. – М.: Машиностроение, 1974. – 360 с.

86. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

87. Михайлов, А.Н. Разработка универсальной структуры технологического процесса напыления покрытий. Синтез структурных вариантов / А.Н. Михайлов, Е.А. Михайлова, Д.А. Михайлов // Прогресивні технології і системи машинобу-

дування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. - Вип. 39. - С. 136 – 144.

88. Михайлов, А.Н. Особенности полировки тонких покрытий изделий и назначения припусков / А.Н. Михайлов, Л. Слэтиняну, Е.А. Михайлова, Д.А. Михайлов // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. - Вип. 39. - С. 145 – 152.

89. Михайлов А.Н. Функционально-ориентированная обработка лопаток газотурбинных двигателей / А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов // Інженер. Студентський науково-технічний журнал. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. - № 11. - С. 68 – 76.

90. 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.

91. 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.

92. 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: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. - Вип. 1 (47). - С. 213 - 224.

93. 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.

94. 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 08 - 17 octobre 2013. – Donetsk: UNTD, 2013. - P. 169-172.

95. 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.

96. Михайлова, Е.А. Повышение эффективности обработки изделий машиностроения на основе принципа последовательной минимизации параметров предшествующих операций / Е.А. Михайлова, А.Н. Михайлов, Т. Аль Судани, Д.А. Михайлов // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. - Вип. 40. - С. 164 – 169.

97. Михайлова, Е.А. Некоторые особенности нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние цилиндрические поверхности изделий. / Е.А. Михайлова, Д.А. Михайлов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник докладов VII международной научно-технической конференции. Екатеринбург: УрГГУ, 2009. - С. 340 – 345.

98. Мосталыгин, Г.П. Технология машиностроения / Г.П. Мосталыгин, Н.Н. Толмачевский – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

99. Мрочек, Ж.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных, электродуговых покрытий. / Ж.А. Мрочек, Б.А. Эйзнер, Г.В. Марков – Минск: Наука и техника, 1991. – 96 с.

100. Мухин, В.С. Формирование специальных свойств поверхности деталей летательных аппаратов. - Уфа: УАИ, 1986. – 83 с.

101. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков, А.А. Марков, Л.В. Лаврова, Н.Ю. Бердышев. – К.: Тэхніка, 1992. – 143 с.

102. Никифоров, А.Д. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Высш. шк., 2000. – 510 с.

103. Новоселов, Ю.Н. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с.

104. Обладнання та прогресивні методи формоутворення деталей: Навч. посібник. / Ступницький В.В., Грицай І.Є., Сліпчук А.М. – Львів: Львівська політехніка, 2012. – 340 с.

105. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общ. Ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.

106. Орлов, П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.

107. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / Богуслаев В.А., Яценко В.К., Жеманюк П.Д. и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.

108. Пат. 94961 Україна на винахід. 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.

109. Пат. на корисну модель 67455 Україна. В23В 51/02. Інструмент для різання заготовок /Михайлов О.М., Абдул Джаліл Хамад, Петряєва І.О., Михайлов Д.О. Бюл. №4 від 27.02.2012. -4 с.

110. Пат. на корисну модель 67528. В23D 5/00. Інструмент для різання заготовок /Михайлов О.М., Довгих Г.С., Михайлов Д.О. Бюл. №4 від 27.02.2012. -4 с.

111. Патент на корисну модель 81412 Україна, Кл. В24D 5/00. Інструмент для різання заготовок / Михайлов О.М., Довгих Г.С., Аль-Судани Т.Я., Михайлов Д.О. - №67528; заявл. 04.02.2013; опубл. 25.06.2013, БИ №12. – 4 с.

112. Пат. 102873 Україна, Кл. В23D 45/00. Інструмент для резания заготовок/ А.Н. Михайлов, А.С. Долгих, Т.Я., Д.А. Михайлов; заявл. 04.07.2013; опубл. 27.08.2013, Бюл. №16. – 4 с.

113. Петраков, Ю.В. Моделирование процессов обработки резанием // Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей. - Том 2. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. - С. 221-232.

114. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В.К. Яценко, Г.З. Зайцев, В.Ф. Притченко, Л.И. Ивченко. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

115. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
116. Полетаев, В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
117. Политехнический словарь / Редкол.: А.Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с.
118. Прилуцкий, В.А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностного слоя деталей машин путем управления периодическими погрешностями обработки: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. - Брянск, 2004. - 36 с.
119. Проблемы развития технологии машиностроения / Под общей ред. Э.А. Сатя. – М.: Машиностроение, 1967. – 592 с.
120. Проектирование технологических процессов в машиностроении: Учебное пособие для вузов / И.П. Филонов, Г.Я. Беляев, Л.М. Кожуро и др.. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 910 с.
121. Проников, А.С. Параметрическая надежность – М.: МГТУ, 2002. – 560 с.
122. Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Г.Н. Андреев, В.Ю. Новиков, А.Г. Схиртладзе; Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высш. шк., 2001. – 415 с.
123. Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпози́тов». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 360 с.
124. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике: В 2-х кн. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. - Кн. 1. – 349 с.; 1986. - Кн. 2. – 320 с.
125. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – Киев: Наукова думка, 1984. – 272 с.
126. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко – Киев: Наукова думка, 1994. – 180 с.

127. Санін, Ф.П. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології. Підручник. / Ф.П. Санін, Л.Д. Кучма, Э.О. Джур – Дніпропетровськ: Дніпропетровський університет, 1999. – 320 с.
128. Ситникова, М.Н. Исследование процесса подготовки поверхностей деталей турбины авиационных двигателей под газотермическое напыление. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Рыбинск, 2013. - 16 с.
129. Скворцов, А.В. Система автоматизации проектирования интегрированных технологических процессов в машиностроении // Вестник машиностроения. - 2004, - № 12. - С. 34-39.
130. Скубачевский, Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели: Учебник для студентов авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.
131. Словарь по кибернетике / Под ред. В.С. Михалевича. - Киев: Гл. ред. УСЭ им. М.П.Бажана, 1989. - 751 с.
132. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др. / Под общ. ред. Л.В. Худобина – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
133. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
134. Советов, Б.Я. Моделирование систем. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев - М.: Высш. шк., 1985. - 271 с.
135. Соколовский, А.П. Научные основы технологии машиностроения. - М.: Машгиз, 1955. – 345 с.
136. Соколовский, А.П. Основы технологии машиностроения – М.-Л.: НКМ СССР ГНТИМЛ, 1938. – 680 с.
137. Сомов, Ю.С. Композиция в технике. - М.: Машиностроение, 1987. - 288 с.
138. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.

139. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М.Барон и др. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с.
140. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1986. - Т.1 - 656 с.; 1985. - Т.2. - 496 с.
141. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
142. Суслов, А.Г. Энциклопедия. Технологи России (машиностроение). Т. 1. Технология машиностроения, станки и инструменты / А.Г. Суслов, В.В. Бушуев, В.А. Гречишников; Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение – 1, 2006. – 412 с.
143. Сучасні технології машинобудування: Збірник наукових статей / За заг. ред. А.І. Грабченка. В 2-х т. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. - Т. 1. - 440 с.; - Т. 2. – 488 с.
144. Тамарин, Ю.А. Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток ГТД. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.
145. Термическая обработка в машиностроении: Справочник. / Под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.
146. Технологические основы обеспечения качества / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др.; Под общ. ред. К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
147. Технический контроль в машиностроении: Справочник проектировщика / Под общ. ред. В.Н. Чупырина, А.Д. Никифорова. – М.: Машиностроение, 1987. – 512 с.
148. Технологическая наследственность в машиностроении / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. / Под ред. А.М. Дальского. - М.: МАИ, 2000. - 364 с.
149. Технологія виробництва деталей літальних апаратів. Підручник: У 2-х кн. Книга 1. / За ред. Ю.М. Терещенка. – К.: Вища освіта, 2004. – 448 с.

150. Технологія виробництва деталей літальних апаратів. Підручник: У 2-х кн. Книга 2. Технологія складання літальних апаратів / За ред. Ю.М. Терещенка. – К.: НАУ, 2006. – 492 с.

151. Технология машиностроения: В 2 т. - Т.1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. - 564 с.

152. Технология машиностроения (специальная часть) / Б.Л. Беспалов, Л.А. Глейзер, И.М. Колесов и др. – М.: Машиностроение, 1973. - 447 с.

153. Технология послойного синтеза – новый метод формообразования порошковых изделий / Н.К. Толочко, Н.В. Соболенко, С.Е. Мозжаров и др. // Вестник машиностроения. - 1995. - №4. -С. 22-25.

154. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. I. Основы технологии. / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, А.И. Долматов и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 518 с.

155. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. II. Основы проектирования технологических процессов изготовления деталей авиационных двигателей и технологическая подготовка производства. / Богуслаев В.А., Качан А.Я., Долматов А.И. и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 557 с.

156. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. III. Методы обработки деталей авиационных двигателей. / Богуслаев В.А., Качан А.Я., Яценко В.К. и др.– Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2008. – 638 с.

157. Увеличение ресурса машин технологическими методами. / В.А. Долецкий, В.Н. Бунтов, Ю.А. Легенкин и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.

158. Управление качеством продукции машиностроения: Учеб. пособие / Под общ ред. М.М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.

159. Федонин, О.Н. Устройство сопряжения для автоматизированной системы сбора и анализа производственных данных с металлорежущих станков с ЧПУ / О.Н. Федонин, Д.И. Петрешин, В.А. Карпушкин // Сборник трудов XXI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-20 сентября 2014 г. – Донецк: МСМ, 2014. С. 274-277.

160. Физико-технологические основы методов обработки / Под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с.
161. Хандожко, А.В. Проблемы алмазно-абразивной обработки заготовок из лейкосапфира / А.В. Хандожко, А.Е. Стешков, Н.А. Бизюкина // Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2013. - Т. 3. - С. 97-99.
162. Хасуи, А. О. Наплавка и напыление. / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
163. Харари, Ф. Теория графов. - М.: Мир, 1973. - 300 с.
164. Хейфец, М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. – Новополюк: ПГУ, 2001. – 156 с.
165. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
166. Хикс, Ч. Основные принципы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1967. – 406 с.
167. Хубка, В. Теория технических систем: Пер. с нем. - М.: Мир, 1987. - 208 с.
168. Цветков, В.Д. Система автоматизированного проектирования технологических процессов. - М.: Машиностроение, 1972. - 240 с.
169. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. - Минск: Наука и техника, 1979. - 264 с.
170. Ющенко, К.А. Інженерія поверхні. Підручник. / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов – К.: Наукова думка, 2007. – 558 с.
171. Ящерицын, П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев, А.И. Борботько – Минск: Наука и техника, 1976. – 328 с.
172. Ящерицын, П.И. Проектирование технологических процессов прямого выращивания изделий / П.И. Ящерицын, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец // Про-

грессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонГТУ, 2000. - Вып. 14. - С. 147-152.

173. Black, R. Design and manufacture. – Portsmouth: University of Portsmouth, 1996. – 328 p.

174. DeGarmo, E.P. Materials and Processes in Manufacturing. / E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Kohser - New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 1259 p.

175. Groover Mikell, P. Fundamentals of modern manufacturing. – New York: JOHN WILEY & SONS, INC, 2002. - 1008 p.

176. Ivchenko, T. Estimation of Possibilities of the Productivity Rise at Turning of Hard / T. Ivchenko, I. Petryaeva, D. Mihaylov // Advanced Materials Research. Vol. 1036, 2014. Trans Tech Publications, - Switzeland. – P. 355-359.

177. Jean-Pierre , C. Fabrication par usinage. 2-e edition. – Paris: Dunod, 2008. – 583 p.

178. Mikhaylov A. General approach to development of machine building composition technologies/A. Mikhaylov, A. Nedashkovskiy, D. Mikhaylov //ModTech International Conference 24-26 May 2012. - Sinaia: Romania, 2012.-Vol. II. - P. 577-580.

179. Mikhaylov, A. Designing peculiarities and classification of composite technologies in mechanical engineering / A. Mikhaylov, D. Mikhaylov, I. Petryaeva //Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications. – Switzerland. - Vol. 371 – 2013. P. 8-12.

180. Mikhaylov, A. Peculiarities of Parameter Definition of Products Routing in Branching Flow-Spatial Technological Systems on the Basis of Multidimensional Algebra of Groups. / A. Mikhaylov, D. Mikhaylov, I. Petryaeva // Advanced Materials Research. – 2014. - Vol. 1036. - P. 869-874.

181. Mikhaylova, E. Improving the efficiency of processing machine products based on the principle of consequent minimization. /E. Mikhaylova, T. Al-Sudani, D. Mikhaylov // ModTech International Conference 25-27th May 2011 - Vadul lui Voda: Chisinau, 2011. - P. 665-668.

182. Non-traditional manufacturing processes. / L. Slatineanu, G. Nagit., O. Dodun. and other. – Chisinau: TEHNICA INFO, 2004. – 300 p.

183. Vitiaz, P. Laser-plasma techniques in computer-controlled manufacturing. / P. Vitiaz, M. Kheifetz, S. Koukhta - Minsk: Belarusskaya nauka, 2011. – 164 p.
184. Pruteanu, O.V. Tehnologia constructiei de masini. Partea 1. Iasi: Junimea, 2005. – 436 p.
185. Radovanovic, M. Tehnologija masinogradnje. – Nis: Masinski fakultet Univerziteta u Nisu, 2002. - 328 p.
186. Rolt, L.T.C. A Story of machine tool. - Cambridge (Mas.), 1966. - 163 p.
187. Schey John, A. Introduction to manufacturing processes. International Edition, 2000. – 962 p.
188. Taranenko, W. Technologia kształtowania części maszyn o małej sztywności./ W. Taranenko, A. Swic. – Lublin:Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2005. – 282 p.
189. Kiyoshi Suenaga, Sunao Aoki, Kazuo Uematsu Gas turbine blade US 6079946 A // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. 2000. - <http://www.google.com/patents/US6079946>.
190. Vernon M. Wride, Alan Taylor, John Foster Binding coat on tip of body of chromium, aluminum, yttrium and either iron, nickel and or cobalt US 5076897 A// Baj Limited, 1991. - <http://www.google.com/patents/US5076897>.
191. Henry E Lynch Gas turbine blade. US 3164367 A // Gen Electric, 1965. - <http://www.google.com/patents/US3164367>.
192. Dimitrie Negulescu Aircraft gas turbine engine. US 8720208 B2 // Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co Kg., 2014. - <http://www.google.com/patents/US8720208>.
193. Lane Cowers, Coplin John Frederick, Wilde Geoffrey Light Turbojet engine with compressor bypass and aft fan. US 3348379 A // Rolls Royce, 1967. - <http://www.google.com/patents/US3348379>.
194. James Widenhoefer, Paolo Graziosi, Kevin Kirtley. Multi-slot inter-turbine duct assembly for use in a turbine engine US 20070089422 A1 // Widenhoefer James F., Paolo Graziosi, Kirtley Kevin R., 2007. - <http://www.google.com/patents/US20070089422>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Группа особых принципов ориентации технологических воздействий
и обеспечения свойств поверхностей пера лопатки при реализации ФОП**

Заданные, требуемые и предельные свойства лопаток обеспечиваются за счет ориентации свойств покрытий на базе технологических воздействий потоков материи, энергии и информации посредством следующих восьми особых принципов, которые приведены в работе [86]:

1. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе пера лопатки, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств на этом функциональном элементе пера лопатки на каждом уровне глубины технологии.

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

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах пера лопатки на каждом уровне глубины технологии.

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента пера лопатки на каждом уровне глубины технологии.

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе пера лопатки на каждом уровне глубины технологии.

6. Структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах пера лопатки из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всего пера лопатки на каждом уровне глубины технологии.

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

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

Рассмотрим более детально приведенные принципы ориентации [26] технологических воздействий и свойств пера лопатки.

Можно отметить, что на основании *первого принципа* обеспечивается функ-

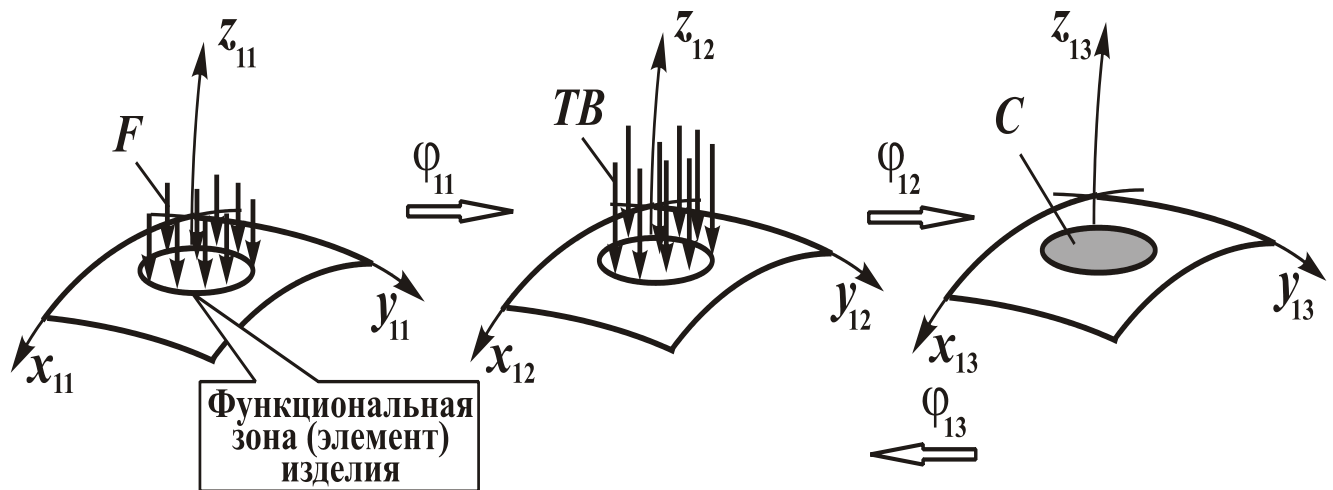


Рисунок П1.1. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию первого принципа ориентации технологических воздействий TB и свойств C функционального элемента пера лопатки в зависимости от действия эксплуатационной функции F

циональное соответствие особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе пера лопатки характеристик реализации технологиче-

ских воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств в этом функциональном элементе пера лопатки (рис. П1.1) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип отвечает на вопрос: какое технологическое воздействие или свойство пера лопатки нужно выполнить или обеспечить в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции? То есть он обеспечивает заданное свойство функционального элемента в микро, макро зоне и участке пера лопатки. Поэтому первый принцип ориентации технологических воздействий и свойств изделия в соответствии с действующей функцией можно математически представить следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} : F &\rightarrow TB; \\ \varphi_{12} : TB &\rightarrow C; \\ \varphi_{13} : C &\rightarrow F, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.1})$$

где φ_{11} - отображение (преобразование) эксплуатационной функции F пера лопатки в технологические воздействия TB ;

φ_{12} - отображение (преобразование) технологических воздействий TB в свойства C пера лопатки;

φ_{13} - отображение (преобразование) свойств C в технологические воздействия TB .

Следует иметь в виду, что представленная система отображений (П1.1) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

Также можно отметить, что соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, первый принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

На базе *второго принципа* реализуется выполнение топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента пера лопатки, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам элемента реализации технологических воздействий потоков материи,

энергии и информации на перо лопатки и геометрических параметров элемента обеспечения необходимых свойств (рис. П1.2) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип, в полной мере, дает ответы на вопросы: куда нужно реализовывать технологические воздействия и где обеспечивать необходимые свойства

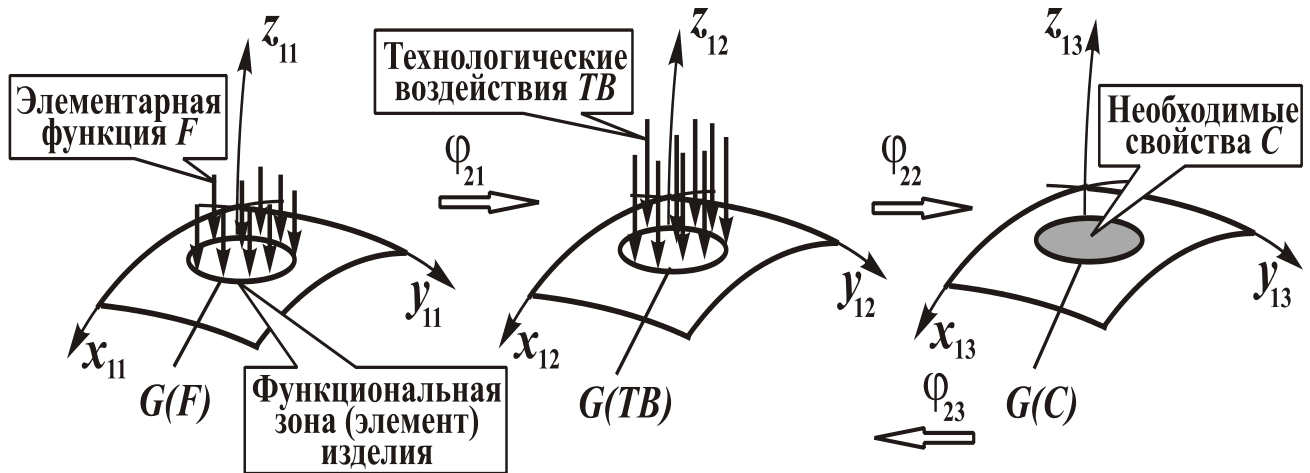


Рисунок П1.2. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию второго принципа ориентации технологических воздействий TB и свойств C функционального элемента пера лопатки в зависимости от действия эксплуатационной функции

пера лопатки? Он отвечает за пространственную точность реализации технологических воздействий в заданные функциональные микро, макро зоны и участки пера лопатки, а также за пространственное расположение в них необходимых свойств пера лопатки пера лопатки. При этом второй принцип ориентации можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} : G(F) &\rightarrow G(TB); \\ \varphi_{22} : G(TB) &\rightarrow G(C); \\ \varphi_{23} : G(C) &\rightarrow G(F), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.2})$$

где φ_{21} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ пера лопатки в геометрические параметры зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$;

φ_{22} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$ в геометрические параметры зоны обеспечения свойств $G(C)$ пера лопатки;

φ_{23} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны обеспечения свойств $G(C)$ в геометрические параметры зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ пера лопатки.

Здесь также следует иметь в виду, что представленная система отображений (П1.2) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

А также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, второй принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие геометрических параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

Третий принцип ориентации обеспечивает количественное соответствие множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах пера лопатки (рис. П1.3) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип дает ответ на вопрос: сколько видов, типов или вариантов технологических воздействий нужно реализовать на изделие в процессе его изготовления и при этом обеспечить множество свойств? Третий принцип ориентации технологических воздействий и свойств пера лопатки в зависимости от действующих эксплуатационных функций можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{31} : M(F) &\rightarrow M(TB); \\ \varphi_{32} : M(TB) &\rightarrow M(C); \\ \varphi_{33} : M(C) &\rightarrow M(F), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.3})$$

где φ_{31} - отображение (преобразование) множества зон действия эксплуатационной функции $M(F)$ пера лопатки в множество зон реализации технологических

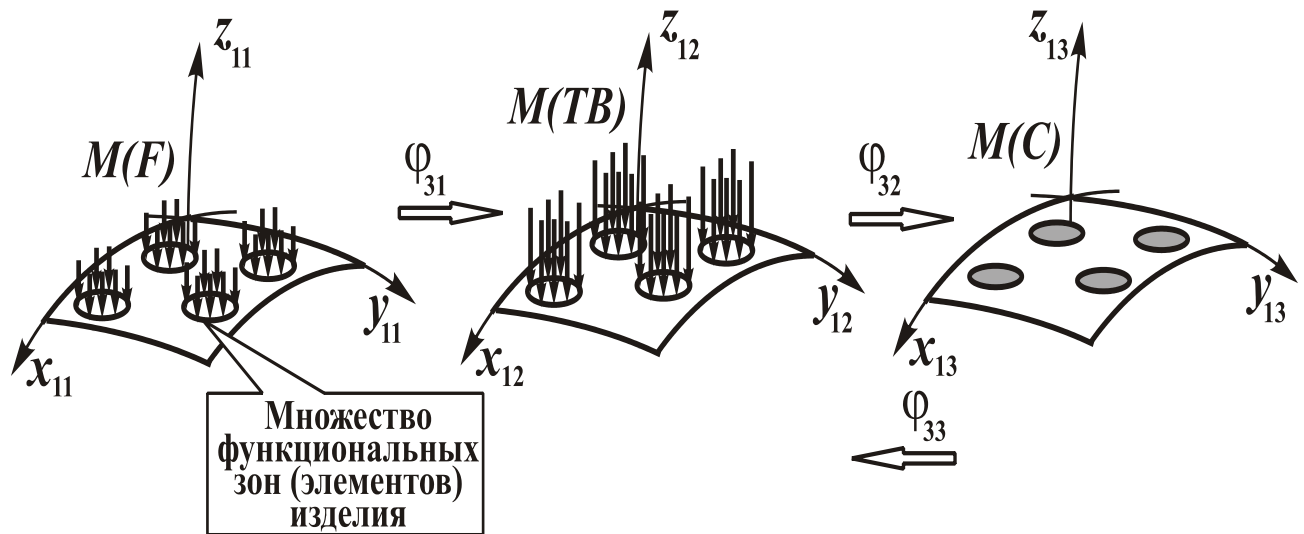


Рисунок П1.3. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию третьего принципа ориентации множества технологических воздействий TB и множества свойств C в функциональные элементы пера лопатки в зависимости от действия множества эксплуатационной функции воздействий $M(TB)$;

φ_{32} - отображение (преобразование) множества зон реализации технологических воздействий $M(TB)$ в множество зон обеспечения свойств $M(C)$ пера лопатки;

φ_{33} - отображение (преобразование) множества зон обеспечения свойств $M(C)$ в множество зон действия эксплуатационной функции $M(F)$ пера лопатки.

В этом случае также следует иметь в виду, что представленная система отображений (П1.4) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

При этом также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, третий принцип может обеспечивать полное или частичное количественное соответствие множеств параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

Для четвертого принципа ориентации характерно обеспечение адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента пера лопатки (рис. П1.4) на ка-

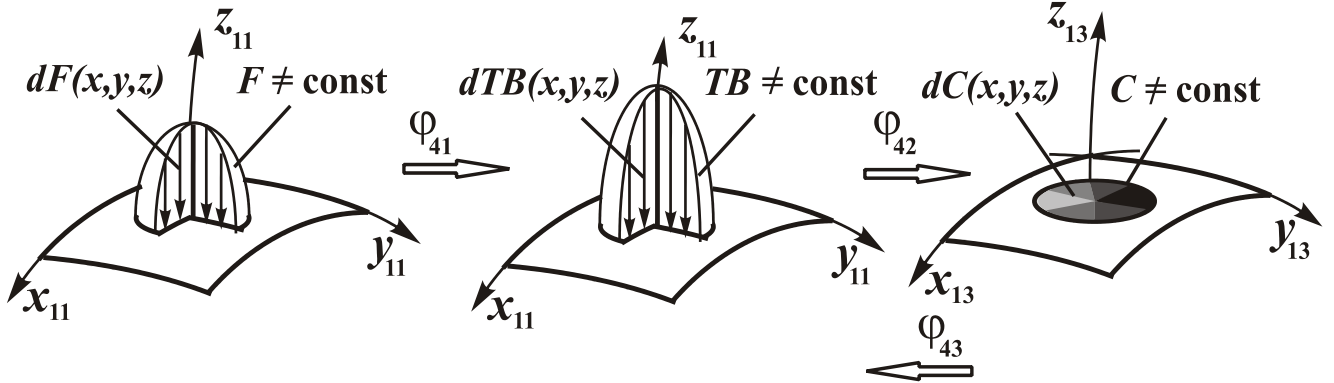


Рисунок П1.4. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию четвертого принципа ориентации переменных технологических воздействий $TB \neq \text{const}$ и переменных свойств $C \neq \text{const}$ в функциональный элемент пера лопатки в зависимости от действия переменной эксплуатационной функции $F \neq \text{const}$ ждом уровне глубины технологии. Этот принцип отвечает на вопрос: как изменяются свойства в пространстве каждого функционального элемента изделия, и как нужно реализовать технологическое воздействие (постоянное или переменное) на функциональный элемент пера лопатки? Это качественный принцип, но действующий на микро уровне функционального элемента пера лопатки и обеспечивающий возможность изменения функциональных свойств изделия за счет переменных технологических воздействий по заданному закону. Этот принцип ориентации технологических воздействий и свойств пера лопатки в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции в элементарном объеме материала изделия можно представить следующими отображениями (П1.4):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{41} : dF(x, y, z) &\rightarrow dTB(x, y, z); \\ \varphi_{42} : dTB(x, y, z) &\rightarrow dC(x, y, z); \\ \varphi_{43} : dC(x, y, z) &\rightarrow dF(x, y, z), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.4})$$

где φ_{41} - отображение (преобразование) элемента эксплуатационной функции $dF(x, y, z)$ пера лопатки в элемент технологических воздействий $dTB(x, y, z)$;

φ_{42} - отображение (преобразование) элемента технологических воздействий $dTB(x, y, z)$ в элемент свойств $dC(x, y, z)$ пера лопатки;

φ_{43} - отображение (преобразование) элемента свойств $dC(x, y, z)$ в элемент эксплуатационной функции $dF(x, y, z)$ пера лопатки.

При этом четвертый принцип ориентации на уровне всего функционального элемента или зоны может быть описан следующей системой отображений:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{41} : \int_V dF(x, y, z) &\rightarrow \int_V dTB(x, y, z); \\ \varphi_{41} : \int_V dTB(x, y, z) &\rightarrow \int_V dC(x, y, z); \\ \varphi_{41} : \int_V dC(x, y, z) &\rightarrow \int_V dF(x, y, z), \end{aligned} \right\}$$

где V - объем функционального элемента или зоны пера лопатки.

Можно отметить, что на основании четвертого принципа возможно изменение функциональных свойств микро- или макроэлемента пера лопатки по следующим видам законов (рис. П1.5):

- линейное изменение свойств (рис. П1.5,а);
- поверхностное изменение свойств (рис. П1.5,б);
- объемное изменение свойств (рис. П1.5,в).

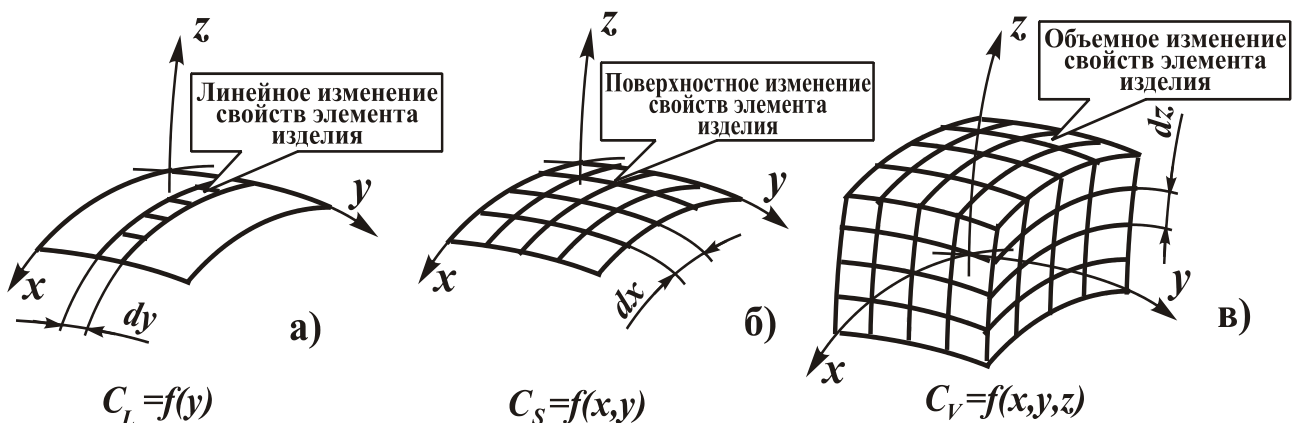


Рисунок П1.5. Гипотетическая схема с вариантами свойств функциональных элементов пера лопатки: **а** – линейное изменение свойств, **б** – поверхностное изменение свойств, **в** – объемное изменение свойств

Пятый принцип ориентации базируется на адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и

временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе изделия (рис. П1.6.) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип дает ответ

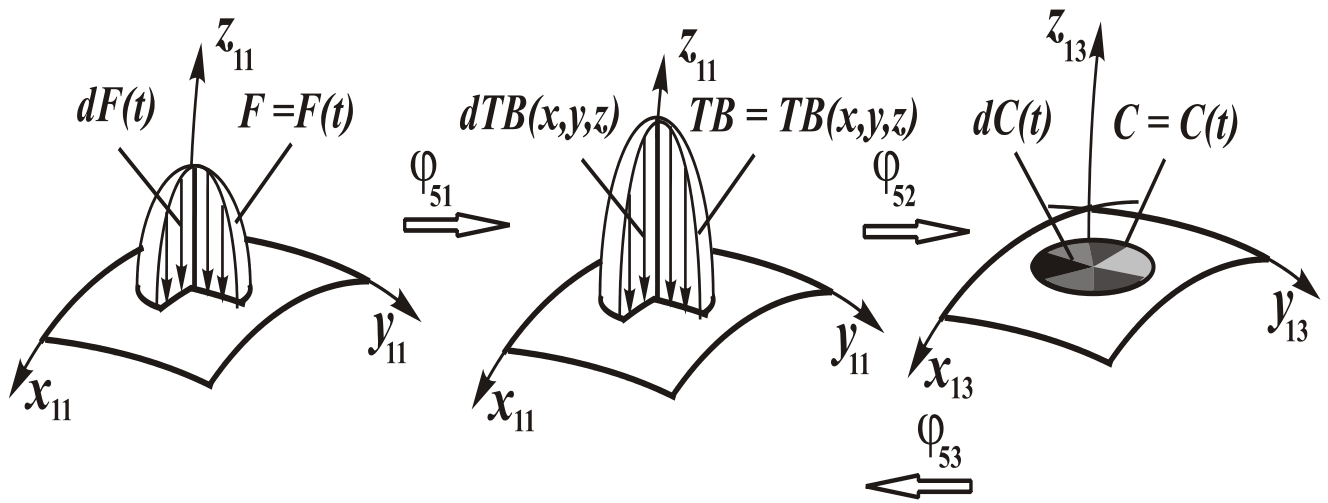


Рисунок П1.6. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию **пятого принципа ориентации** переменных технологических воздействий $TB = TB(x, y, z)$ в пространстве и переменных свойств $C = C(t)$ во времени в функциональный элемент изделия в зависимости от действия переменной эксплуатационной функции $F = F(t)$ во времени

на вопрос: как изменяются свойства функционального элемента в пространстве и во времени, и какие технологические воздействия (постоянное или переменное) нужно обеспечить функциональному элементу изделия? Это также качественный принцип, но действующий на микро уровне функционального элемента изделия и обеспечивающий возможность изменения функциональных свойств изделия во времени и в пространстве за счет переменных технологических воздействий по заданному закону. Пятый принцип ориентации технологических воздействий и свойств пера лопатки в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции в элементарном объеме материала пера лопатки можно представить следующими отображениями (П1.5):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{511} : dF(t) &\rightarrow dTB(x, y, z); \\ \varphi_{521} : dTB(x, y, z) &\rightarrow dC(t); \\ \varphi_{531} : dC(t) &\rightarrow dF(t), \end{aligned} \right\} \text{ или } \left. \begin{aligned} \varphi_{512} : dF(t) &\rightarrow dTB(t); \\ \varphi_{522} : dTB(t) &\rightarrow dC(t); \\ \varphi_{532} : dC(t) &\rightarrow dF(t), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.5})$$

где φ_{511} - отображение (преобразование) элемента эксплуатационной функции $dF(t)$ пера лопатки в элемент технологических воздействий $dTB(x, y, z)$;

φ_{521} - отображение (преобразование) элемента технологических воздействий $dTB(x, y, z)$ в элемент свойств $dC(t)$ пера лопатки;

φ_{531} - отображение (преобразование) элемента свойств $dC(t)$ в элемент эксплуатационной функции $dF(t)$ пера лопатки;

φ_{512} - отображение (преобразование) элемента эксплуатационной функции $dF(t)$ пера лопатки в элемент технологических воздействий $dTB(t)$;

φ_{522} - отображение (преобразование) элемента технологических воздействий $dTB(t)$ в элемент свойств $dC(t)$ пера лопатки;

φ_{532} - отображение (преобразование) элемента свойств $dC(t)$ в элемент эксплуатационной функции $dF(t)$ пера лопатки.

При этом пятый принцип ориентации на уровне всего функционального элемента или зоны может быть описан следующей системой отображений:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{511} &: \int_T dF(t) \rightarrow \int_V dTB(x, y, z); \\ \varphi_{511} &: \int_V dTB(x, y, z) \rightarrow \int_T dC(t); \\ \varphi_{511} &: \int_T dC(t) \rightarrow \int_T dF(t), \end{aligned} \right\} \text{ или } \left. \begin{aligned} \varphi_{512} &: \int_T dF(t) \rightarrow \int_T dTB(t); \\ \varphi_{512} &: \int_T dTB(t) \rightarrow \int_T dC(t); \\ \varphi_{512} &: \int_T dC(t) \rightarrow \int_T dF(t), \end{aligned} \right\}$$

где T - длительность изменения параметров в функциональном элементе.

Шестой принцип ориентации обеспечивает структурное соответствие действия множества элементарных функций, реализацию множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах изделия из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всего пера лопатки (рис. П1.7) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип математически можно представить следующей системой отображений:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{61} &: Str\{F, A\} \rightarrow Str\{TB, B\}; \\ \varphi_{62} &: Str\{TB, B\} \rightarrow Str\{C, D\}; \\ \varphi_{63} &: Str\{C, D\} \rightarrow Str\{F, A\}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.6})$$

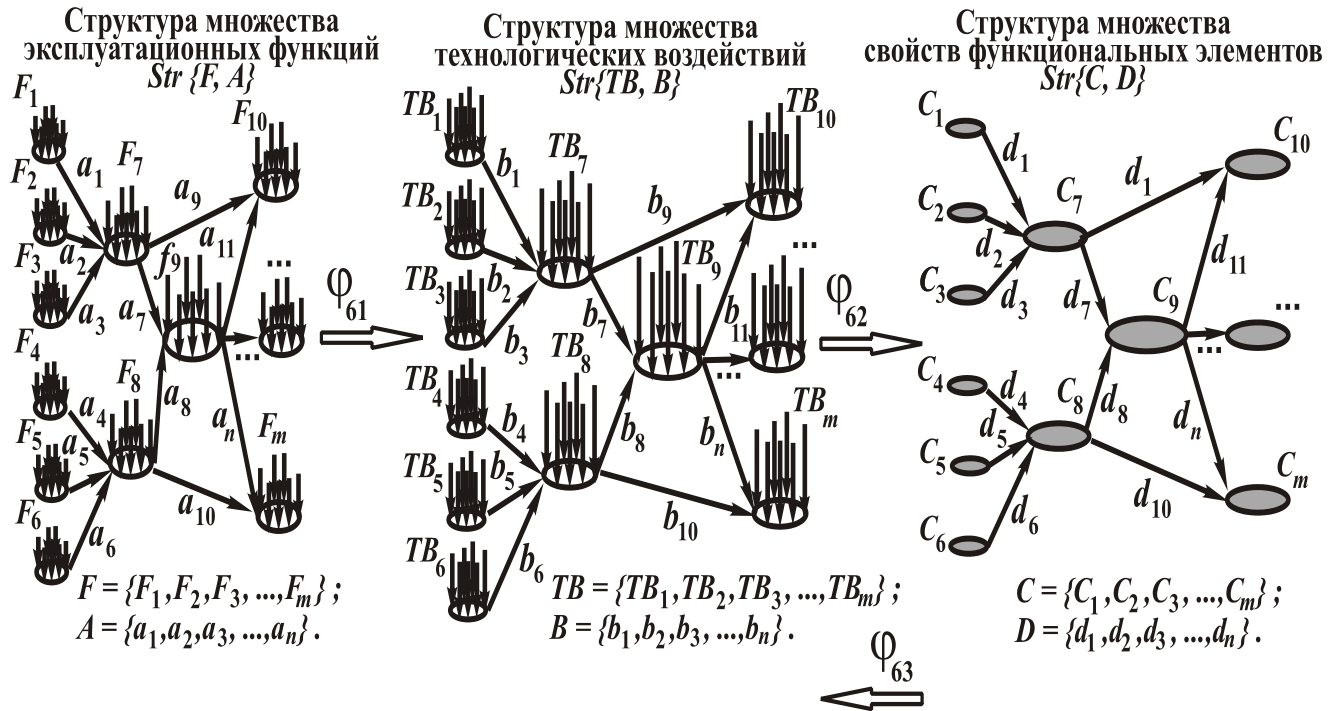


Рисунок П1.7. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию **шестого принципа ориентации** - структурного соответствия действия множества элементарных функций, множества технологических воздействий и множества свойств в функциональных элементах пера лопатки из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств пера лопатки

где ϕ_{61} - отображение (преобразование) структуры множества эксплуатационной функции $F = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_m\}$ и множества отношений $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ изделия в структуру множества технологических воздействий $TB = \{TB_1, TB_2, TB_3, \dots, TB_m\}$ и множества отношений $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$;

ϕ_{62} - отображение (преобразование) структуры множества технологических воздействий $TB = \{TB_1, TB_2, TB_3, \dots, TB_m\}$ и множества отношений $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$ в структуру множества свойств $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_m\}$ и множества отношений $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$ пера лопатки;

ϕ_{63} - отображение (преобразование) структуры множества свойств $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_m\}$ и множества отношений $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$ в структуру множества эксплуатационной функции $F = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_m\}$ и множества отношений $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ пера лопатки.

Также отметим, что представленная система отображений (2.6) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

При этом можно отметить, что для шестого принципа ориентации также соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, шестой принцип может обеспечивать полное или частичное структурное соответствие множеств параметров ориентации элементарных функций, технологических воздействий и свойств, а также отношений между ними.

Седьмой принцип ориентации дает возможность реализовать процесс адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего пера лопатки в целом на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип можно представить следующим отображением (преобразованием) (П1.7):

$$\varphi_{7\xi} : C_{\xi} \rightarrow C, \quad (\text{П1.7})$$

где $\varphi_{7\xi}$ - функция отображения свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента в предельные или заданные свойства всего изделия в целом;

C_{ξ} - свойство любого ξ -го элемента пера лопатки;

C - общие свойства всего пера лопатки в целом.

Можно отметить, что на базе этого принципа ориентации реализуется процесс обеспечения необходимой совокупности свойств изделия в функциональных зонах и элементах, его полной адаптации при изготовлении к особенностям эксплуатации и обеспечения максимального потенциала свойств изделия.

Последний *восьмой принцип* ориентации дает возможность реализовать процесс адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств пера лопатки в

целом на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип можно представить следующим отображением (преобразованием) (П1.8):

$$\varphi_{8\xi} : C_{\xi}^{+} \rightarrow C, \quad (\text{П1.8})$$

где $\varphi_{8\xi}$ - функция отображения свойств в пространстве и во времени в окрестностях каждого функционального элемента в предельные или заданные свойства всего пера лопатки в целом;

C_{ξ}^{+} - свойство в окрестности любого ξ -го элемента пера лопатки.

Таким образом, приведенные принципы дают возможность решать вопросы полной ориентации технологических воздействий и свойств покрытия пера лопатки компрессора при реализации функционально-ориентированных свойств покрытия в зависимости от особенностей ее эксплуатации. А это позволяет обеспечивать качественно новую совокупность свойств и меру полезности лопаток компрессора.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**Модель преобразования систем координат в процессе реального
формообразования функциональных элементов пера лопатки компрессора
при отделочной обработке**

В процессе формообразования функциональных элементов пера лопатки при отделочной обработке возникает целый комплекс задач связанных с определением относительного положения полировального круга и функциональных элементов пера лопатки, решением вопросов формообразования поверхностей [21, 79], размещением элементов и подсистем в технологической системе и решением

других проблем. Эти вопросы могут быть решены на основе разработанной модели отображения кинематических функций и ее использования в процессе кинематических исследований. Поэтому далее приведем такие исследования в данном направлении.

Аналитическую зависимость, связывающую преобразования систем координат и перемещения элементов представим с помощью математической модели отображения кинематических функций.

Пусть имеется трехмерное аффинное пространство и соответствующее ему линейное евклидово пространство радиус-векторов. В аффинном пространстве имеется $p+1$ систем координат (рис. П2.1). Положение каждой предыдущей системы координат относительно последующей задано радиус-вектором \vec{c} начала координат и линейным преобразованием

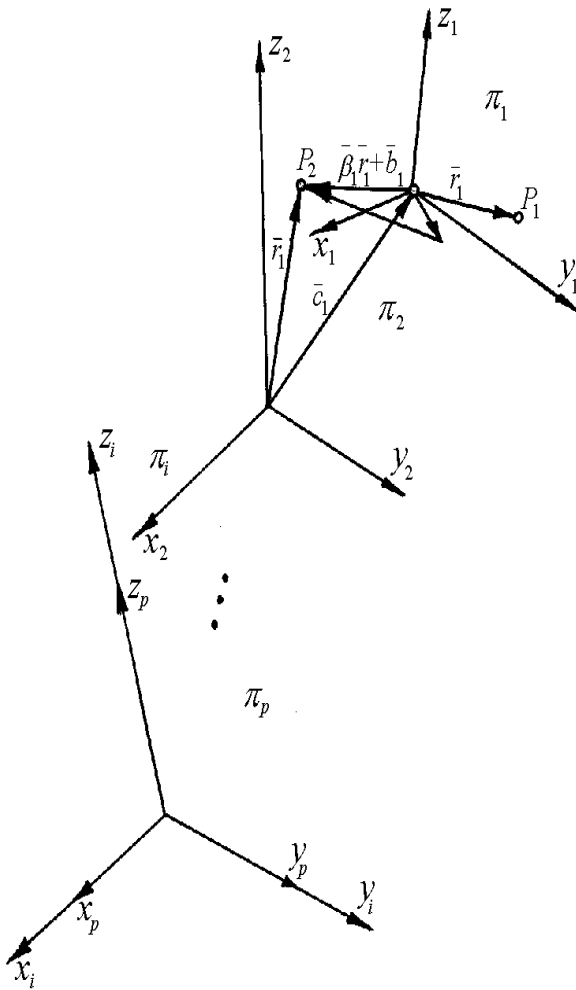


Рисунок П2.1. К выводу уравнений отображений кинематических функций в универсальной системе координат

нанием V координатных базисов. Относительно системы координат π_1 задана точка P_1 с радиусом-вектором \vec{r}_1 и преобразование этой точки в точку P'_1 с радиусом-

вектором \vec{r}_1' . В этом случае преобразование выполняется с помощью оператора $\vec{\beta}_1$ и вектора \vec{b}_1 [69]:

$$\vec{r}_1' = \vec{\beta}_1 \vec{r}_1 + \vec{b}_1. \quad (\text{П2.1})$$

Осуществив переход от системы координат π_1 к системе координат π_2 с помощью ν_1 и \vec{c}_1 , получаем точку P_2 , совпадающую с P_2' , но рассмотренную относительно системы координат

$$\vec{r}_2 = \nu_1 \vec{\beta}_1 \vec{r}_1 + \nu_1 \vec{b}_1 + \vec{c}_1. \quad (\text{П2.2})$$

Отображение (П2.2) представляет собой композицию – состоящую из преобразований аффинного пространства и аффинных координат π_1 и π_2 .

Рассматривая выражение (П2.2) как произведение отображений $\vec{r}_1 \rightarrow \vec{r}_2$ и $\vec{r}_2 \rightarrow \vec{r}_3$ будем иметь [79]:

$$r = \nu_2 \vec{\beta}_2 \nu_1 \vec{\beta}_1 \vec{r}_1 + \nu_2 \vec{\beta}_2 (\nu_1 \vec{\beta}_1 + \vec{c}_1) + \nu_2 \vec{b}_2 + \vec{c}_2. \quad (\text{П2.3})$$

Если выполнить аналогичные действия для последующих векторов, то получим произведение из p преобразований аффинного пространства и p преобразований аффинных координат.

Введем однородные системы координат [79], тогда общее выражение в матричной форме, с учетом того, что между системами координат π_p и π_i осуществляется только преобразование аффинных систем координат, будет следующее:

$$\vec{r}_i = m_{ip}^{A1} \prod_{k=p}^2 (m_{k(k-1)}^{A1} m_{k(k-1)}^{A2}) \cdot \vec{r}_1, \quad (\text{П2.4})$$

где m_{ip}^{A1} – матрица преобразований аффинных систем координат при переходе от системы π_p к системе координат π_i ;

$m_{k(k-1)}^{A1}$ – матрица преобразований аффинных систем координат при переходе от системы $\pi_{(k-1)}$ к системе координат π_k ;

$m_{k(k-1)}^{A2}$ – матрица преобразований аффинного пространства при переходе от системы координат $\pi_{(k-1)}$ к системе π_k .

Основная особенность выражения (П2.4) состоит в том, что любые преобразования могут быть выражены с помощью одной математической операции - умножения матриц четвертого порядка.

Радиус-векторы \vec{r}_i и \vec{r}_1 записываются в виде вектора столбца четвертого порядка:

$$\vec{r}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{r}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{П2.5})$$

В выражении (П2.5), матрица m_{ip}^{A1} соответствует одной из шести различных матриц преобразований аффинных систем координат $\{M_{i1}^{A1}, M_{i2}^{A1}, M_{i3}^{A1}, M_{i4}^{A1}, M_{i5}^{A1}, M_{i6}^{A1}\}$. Эти матрицы могут быть представлены следующим образом.

Матрицы $M_{i1}^{A1}, M_{i2}^{A1}, M_{i3}^{A1}$, моделирующие прямолинейный перенос относительно трех осей координат при аффинном преобразовании систем координат, имеют следующий вид:

$$M_{i1}^{A1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (\text{П2.6})$$

$$M_{i2}^{A1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (\text{П2.7})$$

$$M_{i3}^{A1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (\text{П2.8})$$

где x_i, y_i, z_i - величины прямолинейных перемещений относительно соответствующих осей i -й системы координат.

Матрицы $M_{i4}^{A1}, M_{i5}^{A1}, M_{i6}^{A1}$, моделирующие поворот вокруг трех осей систем координат при аффинном преобразовании систем координат следующие:

$$M_{i4}^{A1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 \\ 0 & \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (\text{П2.9})$$

$$M_{i5}^{A1} = \begin{vmatrix} \cos \psi_i & 0 & \sin \psi_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi_i & 0 & \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.10})$$

$$M_{i6}^{A1} = \begin{vmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (\text{П2.11})$$

где $\varphi_i, \psi_i, \theta_i$ - три угла Эйлера, поворотов вокруг соответствующих осей i -й системы координат.

Матрица $m_{k(k-1)}^{A1}$ соответствует одной из шести различных матриц преобразований аффинных систем координат $\{M_{k1}^{A1}, M_{k2}^{A1}, M_{k3}^{A1}, M_{k4}^{A1}, M_{k5}^{A1}, M_{k6}^{A1}\}$. Эти матрицы могут быть представлены следующим образом.

Матрицы $M_{k1}^{A1}, M_{k2}^{A1}, M_{k3}^{A1}$, моделирующие прямолинейный перенос относительно трех осей координат при аффинном преобразовании систем координат, имеют следующий вид:

$$M_{k1}^{A1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x_k \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.12})$$

$$M_{k2}^{A1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_k \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.13})$$

$$M_{k3}^{A1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (\text{П2.14})$$

где x_k, y_k, z_k - величины прямолинейных перемещений относительно соответствующих осей k -й системы координат.

Матрицы $M_{k4}^{A1}, M_{k5}^{A1}, M_{k6}^{A1}$, моделирующие поворот вокруг трех осей систем координат при аффинном преобразовании систем координат следующие:

$$M_{k4}^{A1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_k & -\sin \varphi_k & 0 \\ 0 & \sin \varphi_k & \cos \varphi_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.15})$$

$$M_{k5}^{A1} = \begin{vmatrix} \cos \psi_k & 0 & \sin \psi_k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi_k & 0 & \cos \psi_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.16})$$

$$M_{k6}^{A1} = \begin{vmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k & 0 & 0 \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (\text{П2.17})$$

где $\varphi_k, \psi_k, \theta_k$ - три угла Эйлера, поворотов вокруг соответствующих осей k -й системы координат.

Матрица $m_{k(k-1)}^{A2}$ соответствует одной из шести различных матриц преобразований аффинного пространства $\{M_{k1}^{A2}, M_{k2}^{A2}, M_{k3}^{A2}, M_{k4}^{A2}, M_{k5}^{A2}, M_{k6}^{A2}\}$. Эти матрицы также могут быть представлены следующим образом.

Матрицы обобщенных перемещений аффинного пространства $M_{k1}^{A2}, M_{k2}^{A2}, M_{k3}^{A2}$ составляются аналогично выражения (П2.15)...(П2.17) и имеют следующий вид:

$$M_{k1}^{A2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & f_{14}(b_k) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.18})$$

$$M_{k2}^{A2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & f_{24}(b_k) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.19})$$

$$M_{k3}^{A2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & f_{34}(b_k) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (\text{П2.20})$$

$f_{14}(b_k), f_{24}(b_k), f_{34}(b_k)$ - величины прямолинейных преобразований аффинного пространства относительно соответствующих осей k -й системы координат.

Матрицы, моделирующие поворот вокруг трех осей систем координат при аффинном преобразовании пространства следующие:

$$M_{k4}^{A2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{22}(\beta_k) & f_{23}(\beta_k) & 0 \\ 0 & f_{32}(\beta_k) & f_{33}(\beta_k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.21})$$

$$M_{k5}^{A2} = \begin{vmatrix} f_{11}(\beta_k) & 0 & f_{13}(\beta_k) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ f_{31}(\beta_k) & 0 & f_{33}(\beta_k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (\text{П2.22})$$

$$M_{k6}^{A2} = \begin{vmatrix} f_{11}(\beta_k) & f_{12}(\beta_k) & 0 & 0 \\ f_{21}(\beta_k) & f_{22}(\beta_k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (\text{П2.23})$$

где $M_{k4}^{A2}, M_{k5}^{A2}, M_{k6}^{A2}$ - матрицы, координирующие повороты вокруг соответствующих осей k -й системы координат аффинного пространства.

В случаях, когда параметры движения в принципиальных кинематических схемах стационарные, то аффинные параметры \vec{b}_k и $\vec{\beta}_k$ постоянные и являются однопараметрическими функциями одного и того же параметра. При этом функциональная зависимость движений аффинного пространства может быть определена на основании выражений представленных далее в следующем подразделе.

Введем обозначение

$$m_{i1} = m_{ip}^{A1} \prod_{k=p}^2 (m_{k(k-1)}^{A1} m_{k(k-1)}^{A2}). \quad (\text{П2.24})$$

Тогда выражение (3.22) будет следующее

$$\vec{r}_i = m_{i1} \vec{r}_1. \quad (\text{П2.25})$$

Продифференцировав это выражение, получим формулу для нахождения скорости перемещения точки системы координат π_1 в системе π_i

$$v_i = \dot{r}_i = \frac{dm_{i1}}{dt} r_1 + m_{i1} \dot{r}_1. \quad (\text{П2.26})$$

Проделав еще одно дифференцирование, найдем ускорение точки системы координат π_1 в системе π_i

$$a_i = \ddot{r}_i = \frac{d^2 m_{i1}}{dt^2} r_1 + 2 \frac{dm_{i1}}{dt} \dot{r}_1 + m_{i1} \ddot{r}_1. \quad (\text{П2.27})$$

Таким образом, выражение (3.25) представляет собой математическую модель композиции преобразования аффинных систем координат и аффинного пространства при формообразовании функциональных элементов пера лопатки компрессора, которая является универсальной и может быть использована при реше-

нии вопросов связанных с кинематической структурой процесса формообразования. С помощью этой модели строятся траектории относительного движения полировального круга и поверхностей пера лопатки, выполняется изучение их относительного положения и производится изучение вопросов процесса формообразования.

Рассмотрим процесс образования геометрических погрешностей при формообразовании функциональных элементов пера лопатки компрессора.

Правильное функционирование технологической системы и выполнение своих целевых функций, в первую очередь обеспечивается за счет соответствующего относительного движения или пространственного положения функциональных элементов пера лопатки относительно обрабатывающего полировального круга.

Однако в процессе обработки функциональных элементов пера лопатки действует большое число разнообразных факторов, которые вызывают отклонения фактических значений геометрических параметров ее элементов и подсистем от номинальных значений. В результате, в процессе реального формообразования функциональных элементов пера лопатки они отличаются от номинальных.

Отличием реального формообразования от номинального (идеального) является наличие отклонений геометрии реальных функциональных элементов пера лопатки от номинальных.

В связи с этим, основными задачами, которые должны быть решены при исследовании закономерностей реального формообразования, являются задачи прогнозирования с заданной достоверностью возникающих погрешностей, а также задачи их стабилизации и управления точностью процесса формообразования функциональных элементов пера лопатки.

Качественная разработка процессов формообразования функциональных элементов пера лопатки требует знания закономерностей образования их погрешностей. Это дает возможность анализировать конкретные проектные решения, выбирать наилучшие характеристики, параметры технологического процесса, управлять точностью.

В задачи исследований процесса образования геометрических погрешностей входят следующие: установление объективно существующих закономерностей механизма возникновения погрешностей и их изучение, установление количественных закономерностей между погрешностями и их причинами, построение математических моделей этого механизма, оценка точности технологического процесса и другие.

Процесс исследования образования геометрических погрешностей при формообразовании функциональных элементов пера лопатки должен вестись из предположения о том, что все элементы технологической системы оказывают влияние на точность обработки.

Очевидно, что возникновение погрешностей происходит на различных этапах жизненного цикла синтеза технологии, а проявляется на этапе ее эксплуатации. Причем, ряд первичных ошибок изготовления функциональных элементов пера лопатки материализуются на этапе изготовления (восстановления) и наладки. Поэтому можно утверждать, что на процесс реального формообразования влияют все элементы системы технологических преобразований.

Из перечисленных выше факторов выберем такие, которые наиболее существенно влияют на геометрические отклонения функциональных элементов пера лопатки.

На основании анализа физических процессов, протекающих в процессе формообразования, выполненного в работах [138, 140, 141], можно считать существенно влияющими на геометрические отклонения функциональных элементов пера лопатки следующие факторы:

- исходные геометрические характеристики элементов и подсистем структуры,
- тепловые явления,
- силовые факторы,
- кинематические параметры,
- изнашивание элементов.

Исходные геометрические характеристики элементов и подсистем структуры технологической системы имеют отклонения от номинальных геометрических параметров, приводящие к возникновению геометрических погрешностей [140]. Эти погрешности можно отнести к первичным факторам. Кроме того, на возникновение геометрических погрешностей влияют погрешности монтажа элементов и подсистем технологической системы.

В результате нагрева элементов и подсистем технологической системы они претерпевают тепловые деформации, что порождает их перемещения и повороты. Тепловые перемещения являются функцией выделяемого тепла и теплостойкости машин [140]. Основными источниками тепла являются рабочий процесс, работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, возникающих при соприкосновении движущихся элементов в подсистемах технологической системы.

На возникновение погрешностей значительное влияние оказывают факторы в технологической системе, которые вызывают вибрации, упругие перемещения и остаточные деформации элементов технологической системы.

Нарушение заданного относительного движения элементов технологической системы может также возникать из-за отклонения кинематических параметров. Эти кинематические отклонения элементов вызывают отклонения движения конечных звеньев обрабатывающего инструмента и функциональных элементов пера лопатки, что в свою очередь вызывает отклонения реальной поверхности функциональных элементов пера лопатки от номинальных геометрических параметров.

Изнашивание деталей сопровождается постепенным изнашиванием их размеров и формы, что нарушает размерные связи в технологической системе и порождает погрешности относительного положения элементов и движения рабочих органов.

Все перечисленные виды первичных ошибок, в конечном счете, материализуются в виде геометрических отклонений элементов технологической системы, а затем - в виде геометрических отклонений функциональных элементов пера лопатки.

Геометрические отклонения элементов технологической системы могут быть выделены с различной степенью детализации.

На стадии проектирования технологической системы целесообразно рассмотрение следующих ошибок:

- обобщенные ошибки - как ошибки движения конечных звеньев; таких ошибок может быть шесть - по числу возможных степеней свободы конечных звеньев в относительном движении;

- ошибки установки инструмента и функциональных элементов пера лопатки - как смещения последних по отношению к конечным звеньям технологической системы; каждая из ошибок в общем случае содержит шесть линейно независимых компонент, которые зависят от числа возможных степеней свободы;

- ошибки собственно инструмента - как отклонения реальных (фактических) координат по отношению к номинальным значениям; таких линейно независимых ошибок, в соответствии с числом координат, может быть три;

- ошибки собственно функциональных элементов пера лопатки - как восстанавливаемые деформации (упругие и тепловые), которые всегда имеют место при обработке; их, как и ошибок инструмента, в соответствии с числом координат, может быть три.

Таким образом, геометрические ошибки любой технологической системы могут быть приведены к полному множеству ошибок. В связи с этим, к ним можно привести все множество любых ошибок технологической системы, которые будем именовать приведенными первичными ошибками. Зная приведенные первичные ошибки можно перейти к составлению математической модели их учета и разработке общих уравнений реальных поверхностей обрабатываемых функциональных элементов пера лопатки.

Рассмотрим особенности разработки системной модели реального формообразования функциональных элементов пера лопатки компрессора.

В процессе изготовления и эксплуатации пера лопатки действует большое число разнообразных факторов, которые вызывают отклонения фактических значений геометрических параметров ее элементов и подсистем от номинальных значений. В результате, в процессе реального формообразования, функциональные элементы пера лопатки отличаются от номинальных.

Отличием реального формообразования от номинального (идеального) является наличие отклонений геометрии

реальных функциональных элементов пера лопатки от номинальных.

При технологическом воздействии инструмента на функциональные элементы пера лопатки, их поверхности должны находиться в непрерывном взаимном касании. В относительном движении такие поверхности являются взаимно огибаемыми.

В зависимости от того, как определяется относительное движение элементов - одним или двумя независимыми параметрами движения, нужно вести исследования огибающей как однопараметрического или двухпараметрического семейства поверхностей.

Для получения общих уравнений реальных поверхностей функциональных элементов пера лопатки, свяжем с номинальной системой координат π_i универсальной принципиальной кинематической схемы (рис. П2.2) номинальные системы координат инструмента π_{01} и пера лопатки π_{02} . В этом случае, в общем виде системы координат инструмента будут располагаться в следующей последовательности $\pi_i, \pi_p^A, \pi_{(p-1)}^A, \dots, \pi_1^A, \pi_0^A, \pi_{01}$, а системы координат обрабатываемого пера лопатки будут располагаться следующим образом $\pi_i, \pi_p^B, \pi_{(p-1)}^B, \dots, \pi_1^B, \pi_0^B, \pi_{02}$. Вывод

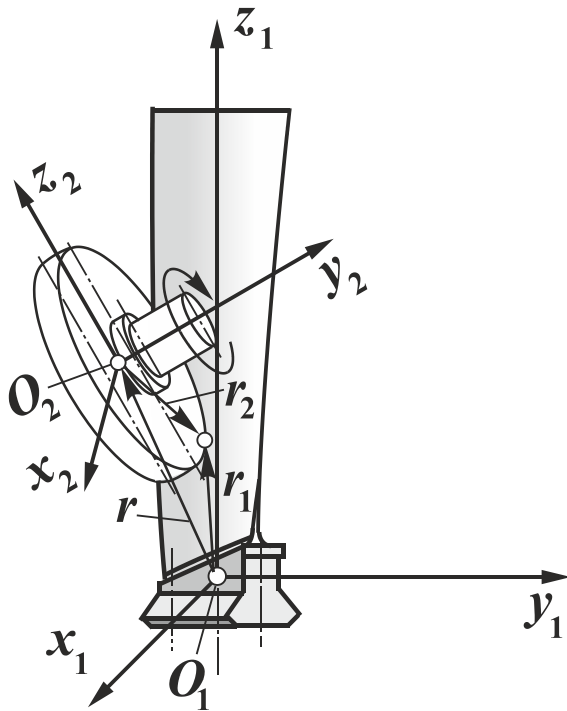


Рисунок П2.2. Расчетная схема процесса формообразования

формул преобразований координат, с учетом того, что переход совершается от системы координат π_{01} к π_i и π_{02} к π_i , основывается на такой записи:

$$m_{i,01}^{HA} = m_{ip}^A \left[\prod_{k=p}^{k=1} \left(\prod_{s=1}^2 m_{k(k-1)}^{AS} \right) \right] \prod_{s=1}^2 m_{0,01}^{AS}; \quad (\text{П2.28})$$

$$m_{i,02}^{HB} = m_{ip}^B \left[\prod_{k=p}^{k=1} \left(\prod_{s=1}^2 m_{k(k-1)}^{BS} \right) \right] \prod_{s=1}^2 m_{0,02}^{BS}, \quad (\text{П2.29})$$

где $m_{i,01}^{HA}$ и $m_{i,02}^{HB}$ - матрицы композиции преобразований аффинных систем координат и аффинного пространства в номинальном состоянии соответственно при переходе от π_{01} к π_i и от π_{02} к π_i ;

m_{ip}^A и m_{ip}^B - матрицы преобразований аффинных систем координат в номинальном состоянии соответственно при переходе от π_p^A к π_i и от π_p^B к π_i ;

$m_{k(k-1)}^{A1}$ и $m_{k(k-1)}^{B1}$ - матрица преобразований аффинных систем координат в номинальном состоянии соответственно при переходе от $\pi_{(k-1)}^A$ к π_k^A и от $\pi_{(k-1)}^B$ к π_k^B ;

$m_{k(k-1)}^{A2}$ и $m_{k(k-1)}^{B2}$ - матрица преобразований аффинного пространства в номинальном состоянии соответственно при переходе от $\pi_{(k-1)}^A$ к π_k^A и от $\pi_{(k-1)}^B$ к π_k^B ;

$m_{0,01}^{A1}$ и $m_{0,02}^{B1}$ - матрица преобразования аффинных систем координат в номинальном состоянии соответственно при переходе от π_{01} к π_0^A и от π_{02} к π_0^B ;

$m_{0,01}^{A2}$ и $m_{0,02}^{B2}$ - матрица преобразования аффинного пространства в номинальном состоянии соответственно при переходе от π_{01} к π_0^A и от π_{02} к π_0^B ;

p - количество классов систем координат технологической системы.

В матричных уравнениях (П2.28) и (П2.29) выражение в квадратных скобках отражает композицию преобразований аффинных систем координат и аффинного пространства для структуры сложного движения технологической системы, а выражение за квадратными скобками отражает композицию преобразований аффинных систем координат и аффинного пространства для структуры технологического движения конечных звеньев. Матрица связывает композиции преобразований аффинных систем координат и аффинного пространства структур техноло-

гического и транспортного движений с π_i номинальной неподвижной системой координат.

Элементы матричных выражений определяются в соответствии с матрицами (П2.12) ... (П2.17) и все они находятся в функциональной зависимости от двух независимых параметров движения φ и ψ при двухпараметрическом огибании.

Общая номинальная матрица перехода от системы координат π_{01} к π_{02} будет иметь вид:

$$m_{02,01}^H = \left(m_{i,02}^{HB}\right)^{-1} m_{i,01}^{HA}, \quad (\text{П2.30})$$

$m_{02,01}^H$ - номинальная матрица перехода от системы координат π_{01} к π_{02} .

Погрешности обрабатываемой поверхности пера лопатки могут быть представлены как результат нарушения размеров структурных элементов технологической системы, а также нарушения движений этих структурных элементов. Кроме того, погрешности обработки также возникают из-за переноса первичных ошибок инструмента на обрабатываемую деталь и проявления восстанавливаемых деформаций детали.

В соответствии с этим, матрицы (П2.28) и (П2.29), учитывающие отклонения размеров и расположения структурных элементов, а также отклонений их движений, будут следующие:

$$m_{i,01}^{PA} = m_{ip}^A m_{Ap}^A \left[\prod_{k=p}^{k=1} \left(\prod_{s=1}^2 m_{k(k-1)}^{AS} m_{A(k-1)}^{AS} \right) \right] \prod_{s=1}^2 m_{0,01}^{AS} m_{A,01}^{AS}; \quad (\text{П2.31})$$

$$m_{i,02}^{PB} = m_{ip}^B m_{Ap}^B \left[\prod_{k=p}^{k=1} \left(\prod_{s=1}^2 m_{k(k-1)}^{BS} m_{A(k-1)}^{BS} \right) \right] \prod_{s=1}^2 m_{0,02}^{BS} m_{A,02}^{BS}, \quad (\text{П2.32})$$

где $m_{i,01}^{PA}$ и $m_{i,02}^{PB}$ - матрицы композиции преобразования аффинных систем координат и аффинного пространства с учетом отклонений от номинального значения параметров соответственно при переходе от π_{01} к π_i и от π_{02} к π_i ;

m_{Av}^A и m_{Av}^B - матрицы, учитывающие отклонения значений параметров от номинальных соответственно при переходе в системе инструмента и пера лопатки.

Заметим, что матрицы $m_{\Delta,01}^{A1}$ и $m_{\Delta,02}^{B1}$ учитывают погрешности установки инструмента и фрезы относительно базовых поверхностей.

Основываясь на работе [79], запишем:

$$m_{\Delta v} = m_{\Delta v x} m_{\Delta v y} m_{\Delta v z}; \quad (\text{П2.33})$$

$$v = p; \dots; 0; 0,1,$$

где

$$m_{\Delta v z} = \begin{vmatrix} \cos \Delta \varphi_{zv} & -\sin \Delta \varphi_{zv} & 0 & 0 \\ \sin \Delta \varphi_{zv} & \cos \Delta \varphi_{zv} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$m_{\Delta v y} = \begin{vmatrix} \cos \Delta \varphi_{yv} & 0 & \sin \Delta \varphi_{yv} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_v \\ -\sin \Delta \varphi_{yv} & 0 & \cos \Delta \varphi_{yv} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$m_{\Delta v x} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_v \\ 0 & \cos \Delta \varphi_{xv} & -\sin \Delta \varphi_{xv} & 0 \\ 0 & \sin \Delta \varphi_{xv} & \cos \Delta \varphi_{xv} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

В уравнении (П2.33) соответственно добавляются для инструмента индекс А или для обрабатываемого пера лопатки индекс В. В случае, когда применяется А1 или В1, то это значит, что выполняется преобразование аффинной системы координат в системе инструмента или обрабатываемого пера лопатки, а когда применяется индекс А2 или В2 выполняется преобразование аффинного пространства в системе инструмента или обрабатываемого пера лопатки.

Общая матрица перехода от системы координат π_{01} к π_{02} , с учетом отклонений размеров расположения структурных элементов и отклонений их движений, определится уравнением:

$$m_{02,01}^{\Pi} = \left(m_{i,02}^{\Pi B}\right)^{-1} m_{i,01}^{\Pi A}, \quad (\text{П2.34})$$

где $m_{02,01}^{\Pi}$ - матрица перехода от системы координат π_{01} к π_{02} с учетом всех возможных отклонений.

Вышеизложенное позволяет перейти к выводу общих уравнений реальных функциональных элементов пера лопатки.

Пусть в системе координат π_{01} задана номинальная инструментальная поверхность

$$\vec{r}_{01,H} = \vec{r}_{01,H}(u, v). \quad (\text{П2.35})$$

Тогда координаты реальной инструментальной поверхности, с учетом погрешностей, описываемых приращением радиус-вектора $\Delta \vec{r}_{01}$, будет следующее

$$\vec{r}_{01,p} = \vec{r}_{01,H} + \Delta \vec{r}_{01}. \quad (\text{П2.36})$$

Используя матричное уравнение (П2.34), семейство поверхностей определим уравнением такого вида:

$$\vec{r}_{02,p} = \vec{r}_{02,p}(u, v, \Delta \vec{r}_{01}, \varphi, \psi), \quad (\text{П2.37})$$

где φ и ψ - независимые параметры движения.

При последовательном фиксированном значении параметров φ и ψ , уравнения (П2.37) определяют реальную поверхность инструмента в системе π_{02} . Линия контакта обрабатываемого инструмента с поверхностью пера лопатки будет найдена, если определить зависимость между параметрами такого вида:

$$u = u(\varphi, \psi); \quad (\text{П2.38})$$

$$v = v(\varphi, \psi). \quad (\text{П2.39})$$

Уравнения (П2.37) и (П2.38), (П2.39) рассмотренные совместно при последовательном фиксированном значении φ или ψ , определяют в системе π_{02} семейство линий контакта взаимооггибаемых поверхностей.

Для определения уравнений (П2.38) и (П2.39), воспользуемся тем, что взаимооггибаемые поверхности имеют общую касательную плоскость. Касательная плоскость к огибающей поверхности определяется векторами [69]:

$$\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \varphi}, \quad (\text{П2.40})$$

$$\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \psi} + \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial \psi} + \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \psi}. \quad (\text{П2.41})$$

Касательная плоскость к поверхности пера лопатки, параметрами которой являются u и v , определяется векторами $\partial \vec{r}_{02,p} / \partial u$ и $\partial \vec{r}_{02,p} / \partial v$. Для того, чтобы векторы находились в касательной плоскости, необходимо, чтобы они были компланарны и смешанное произведение всех векторов было бы равно нулю. Отсюда следует:

$$\left[\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v}, \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \varphi} \right] = 0, \quad (\text{П2.42})$$

$$\left[\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v}, \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \psi} \right] = 0. \quad (\text{П2.43})$$

Из уравнений (П2.42) и (П2.43) находятся искомые зависимости (П2.38) и (П2.39).

Уравнения (П2.42) и (П2.43) можно истолковать следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v} \right) = v_{02}^{(01,02,\varphi)} n_{02} = v_{02}^{(02,01,\varphi)} n_{02} = 0, \quad (\text{П2.44})$$

$$\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \psi} \left(\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v} \right) = v_{02}^{(01,02,\psi)} n_{02} = v_{02}^{(02,01,\psi)} n_{02} = 0. \quad (\text{П2.45})$$

В этих выражениях $v_{02}^{(01,02,\varphi)}$ и $v_{02}^{(02,01,\varphi)}$ - скорость движения соответственно инструмента относительно фрезы и фрезы относительно инструмента при фиксированном значении параметра движения ψ . Аналогично $v_{02}^{(01,02,\psi)}$ и $v_{02}^{(02,01,\psi)}$ - соответствующие скорости относительного движения звеньев при фиксированном значении параметра движения φ . Вектор нормали к поверхности пера лопатки в системе π_{02} будет следующий

$$n_{02} = \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v}. \quad (\text{П2.46})$$

Уравнения (П2.44) и (П2.45) остаются справедливыми, если векторы нормали и векторы скоростей относительного движения будем рассматривать не в системе π_{02} , а в системе π_{01} , связанной с инструментом, или в системе π_i , связанной с номинальной системой координат технологической системы. В этом случае можно записать [69]:

$$n_r v_r^{(01,02,\varphi)} = n_r v_r^{(02,01,\varphi)} = 0; \quad (\text{П2.47})$$

$$n_r v_r^{(01,02,\psi)} = n_r v_r^{(02,01,\psi)} = 0, \quad (\text{П2.48})$$

где $r = 01; i; 02$.

В ряде случаев, выражения (П2.47) и (П2.48) облегчают определение геометрических параметров реальной поверхности пера лопатки.

В координатной записи уравнение реальной поверхности пера лопатки при $r = 01$ выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} x_{02,p} &= x_{02,p}(u, v, \Delta \vec{r}_{01}, \varphi, \psi); \\ y_{02,p} &= y_{02,p}(u, v, \Delta \vec{r}_{01}, \varphi, \psi); \\ z_{02,p} &= z_{02,p}(u, v, \Delta \vec{r}_{01}, \varphi, \psi); \\ n_{x01} v_{x01}^{(01,02,\varphi)} + n_{y01} v_{y01}^{(01,02,\varphi)} + n_{z01} v_{z01}^{(01,01,\varphi)} &= 0; \\ n_{x01} v_{x01}^{(01,02,\psi)} + n_{y01} v_{y01}^{(01,02,\psi)} + n_{z01} v_{z01}^{(01,01,\psi)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П2.49})$$

Выражения $n_{x01}, n_{y01}, n_{z01}$ проекции вектора нормали определяются аналогично выражениям (П2.34) ... (П2.36) и зависят лишь от вида заданной поверхности инструмента.

Проекции вектора скорости относительного движения звеньев определяются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} v_{x01}^{(01,02,\varphi)} &= \frac{\partial x_{01,p}}{\partial \varphi}, \\ v_{y01}^{(01,02,\varphi)} &= \frac{\partial y_{01,p}}{\partial \varphi}, \\ v_{z01}^{(01,02,\varphi)} &= \frac{\partial z_{01,p}}{\partial \varphi}, \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} v_{x01}^{(01,02,\psi)} &= \frac{\partial x_{01,p}}{\partial \psi}, \\ v_{y01}^{(01,02,\psi)} &= \frac{\partial y_{01,p}}{\partial \psi}, \\ v_{z01}^{(01,02,\psi)} &= \frac{\partial z_{01,p}}{\partial \psi}. \end{aligned} \right\}. \quad (\text{П2.50})$$

Здесь векторы относительной скорости $v_{01}^{(01,02,\varphi)}$ и $v_{01}^{(01,02,\psi)}$ определяются расположением систем координат и параметрами движения и, само собой разумеется, от вида боковой поверхности не зависит.

Из полученных общих уравнений (П2.49) реальных поверхностей пера лопатки вытекают частные случаи уравнений реальных поверхностей всех существующих схем обработки.

Выражение (П23.49) можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} x_{02,p} &= x_{02,p}(\varphi, \psi, \vec{\Delta}_{II}, \vec{\Pi}); \\ y_{02,p} &= y_{02,p}(\varphi, \psi, \vec{\Delta}_{II}, \vec{\Pi}); \\ z_{02,p} &= z_{02,p}(\varphi, \psi, \vec{\Delta}_{II}, \vec{\Pi}), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П2.51})$$

где $\vec{\Delta}_{II}$ - вектор приведенных первичных ошибок;

$\vec{\Pi}$ - вектор номинальных геометрических параметров структурных элементов и движений технологической системы.

Используя выражение (П2.51), положив $\vec{\Delta}_{II} = 0$, можно получить уравнения номинальных поверхностей пера лопатки:

$$\left. \begin{aligned} x_{02,H} &= x_{02,H}(\varphi, \psi, \vec{\Pi}); \\ y_{02,H} &= y_{02,H}(\varphi, \psi, \vec{\Pi}); \\ z_{02,H} &= z_{02,H}(\varphi, \psi, \vec{\Pi}), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П2.52})$$

где $x_{02,H}$, $y_{02,H}$, $z_{02,H}$ - координаты номинальной поверхности пера лопатки.

На основе уравнений (П2.52) и (П2.53) вычисляются приращения координат реальных поверхностей пера лопатки по отношению к номинальным:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{02,H} &= x_{02,p} - x_{02,H}; \\ \Delta y_{02,H} &= y_{02,p} - y_{02,H}; \\ \Delta z_{02,H} &= z_{02,p} - z_{02,H}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П2.53})$$

где $\Delta x_{02,p}$, $\Delta y_{02,p}$, $\Delta z_{02,p}$ - приращения координат реальных поверхностей по отношению к номинальным.

Определив значения параметров приращения координат реальных поверхностей пера лопатки по отношению к номинальным значениям, можно перейти к определению взаимосвязей между этими приращениями и нормируемыми погрешностями процесса формообразования поверхностей пера лопатки, а также к разработке методов снижения погрешностей их изготовления.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

**Особенности полировки криволинейных поверхностей
лопаток компрессора из титановых сплавов**

Эксплуатационные свойства авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) определяются параметрами качества лопаток компрессора, которые испытывают значительные знакопеременные и циклические нагрузки, эрозионно-коррозионные воздействия в процессе работы [1, 5, 20, 21]. Для обеспечения заданных параметров качества лопаток компрессоров ГТД применяется множество различных технологических методов [89, 91]. При этом на отделочных операциях технологического процесса применяется полирование поверхностей лопатки. Вместе с тем, полирование поверхностей лопатки имеет определенные технологические особенности. Это обусловлено, прежде всего, тем, что материалом лопатки являются титановые сплавы, которые относятся к труднообрабатываемым материалам. А также тем что, обрабатываемые поверхности имеют сложную криволинейную форму, определяемую поверхностями корыта и спинки лопатки, имеющую переменный радиус кривизны. Поэтому вопросы полировки криволинейных поверхностей лопатки из титановых сплавов ГТД требуют дальнейших исследований для создания методов повышения качества обработки и соответственно увеличения ресурса и надежности ГТД в целом.

Целью данного раздела является повышение качества криволинейных поверхностей ГТД из титановых сплавов на основе установления механизма полировки и определения схем взаимодействия инструмента и поверхности лопатки.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: исследовать физическую сущность и механизм процесса полирования криволинейных поверхностей лопатки; установить особенности обработки и схемы взаимодействия инструмента и криволинейных поверхностей лопатки; разработать математические модели взаимодействия инструмента и поверхности лопатки; представить основные рекомендации процесса полирования криволинейных поверхностей лопатки. Эти задачи решаются в данной работе.

При полировании рабочих поверхностей лопатки из титановых сплавов высокая точность процесса формообразования и параметры шероховатости достигаются посредством применения соответствующего инструмента, полировальных паст, режимов обработки, кинематической структуры и жесткости оборудования,

а также прогрессивных методов обработки. Для повышения точности и параметров шероховатости поверхностей лопатки при полировании выполняют дифференциацию процесса на следующие переходы: предварительное полирование, окончательное полирование и глянцеование (зеркальное полирование). Физическая сущность процесса полирования поверхностей различных изделий рассмотрены в ряде работ [1, 5, 20, 21]. Вместе с тем, полирование поверхностей лопатки из титановых сплавов требует дальнейших исследований.

Процесс полирования поверхностей лопатки из титановых сплавов реализуется за счет следующих типов технологических воздействий.

1. Резания материала поверхности абразивными зернами, приводящего к образованию диспергированного (размельченного) рельефа поверхностного слоя.
2. Пластической деформации микрорельефа полируемой поверхности.
3. Химического воздействия поверхностно-активных полирующих веществ (углеводородов, кислот, солей кислот и их соединений и тому подобных веществ).
4. Термического воздействия на макро- и микроуровнях.

Можно отметить, что приведенные выше технологические воздействия при полировании реализуются в едином комплексе. При этом отдельные типы технологических воздействий могут преобладать или действовать незначительно. Например, при предварительном полировании действуют все типы технологических воздействий, причем преобладает резание материала. При окончательном и зеркальном полировании, влияние процесса резания снижается соответственно, и относительно возрастает действие пластических и химических воздействий.

На рис. ПЗ.1 представлена системная модель процесса технологических преобразований свойств поверхностного слоя лопатки при полировании [93]. Здесь показано, что преобразование начальных свойств V полируемой поверхности лопатки в конечные свойства W реализуются посредством процесса технологических преобразований свойств поверхностного слоя лопатки при обработке на базе действия потоков материи M , энергии E и информации I , формируемых технологическими воздействиями четырех типов. Процесс полирования лопаток может выполняться за счет нескольких переходов: 1 – предварительное полиро-

вание, 2 – окончательное полирование, 3 – глянецвание (зеркальное полирование).

Параметры качества обработки поверхностей лопатки на каждом переходе опре-



Рисунок ПЗ.1. Системная модель процесса технологических преобразований свойств поверхностного слоя лопатки при полировании

деляются припусками, режимами обработки, параметрами полирующего круга и полирующего материала, а также особенностями обработки. Именно эти особенности обработки лопаток ГТД оказывают существенное влияние на параметры качества их поверхностей. Поэтому далее рассмотрим более детально основные особенности обработки поверхностей лопатки.

Одной из главных особенностей полирования лопатки ГТД является то, что перо лопатки состоит из криволинейной внутренней и внешней поверхности, а именно корыта и спинки, которые имеют переменные радиусы кривизны. При этом полирующий круг имеет постоянные радиусы кривизны, как в продольном, так и поперечном сечении. Поэтому при взаимодействии инструмента, имеющего постоянные радиусы кривизны режущей поверхности, и поверхности лопатки с переменным радиусом кривизны обрабатываемой поверхности, происходит переменный процесс резания. Кроме того, процесс резания ухудшается тем, что лопатка имеет внутренние и внешние поверхности, которые также приводят к возникновению переменных параметров процесса резания на поверхности корыта и спинке. Все это снижает параметры качества рабочих поверхностей пера лопатки [93].

На рис. ПЗ.2 представлены схемы обработки поверхностей лопатки ГТД (вид сбоку) [93]. На рис. ПЗ.2,а – обработка корыта лопатки при $r_{11} < r_{21}$; на рис. ПЗ.2,б – обработка корыта лопатки при $r_{11} < r_{21}$ в случае, когда радиусы кривизны инструмента и лопатки почти равны; на рис. ПЗ.2,в – обработка спинки лопатки.

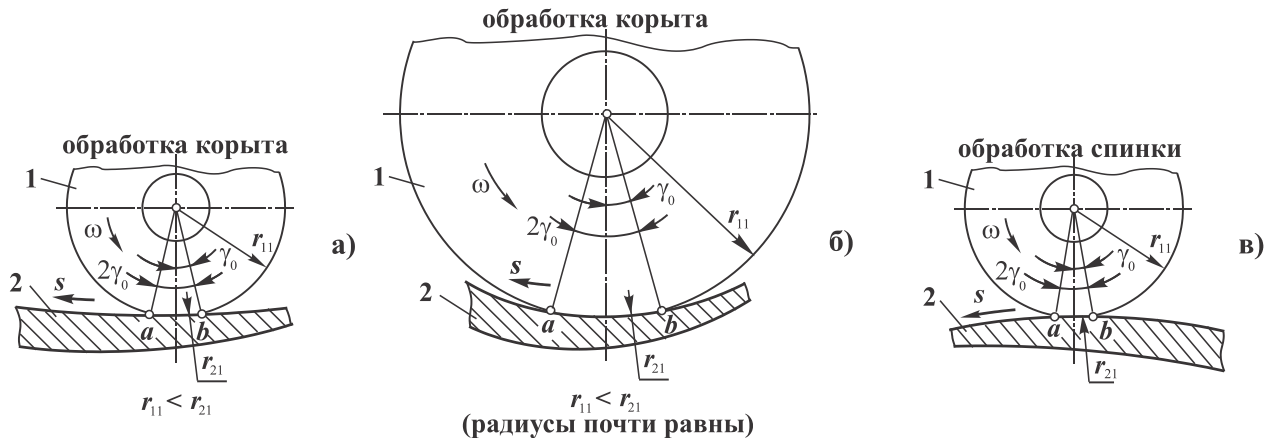


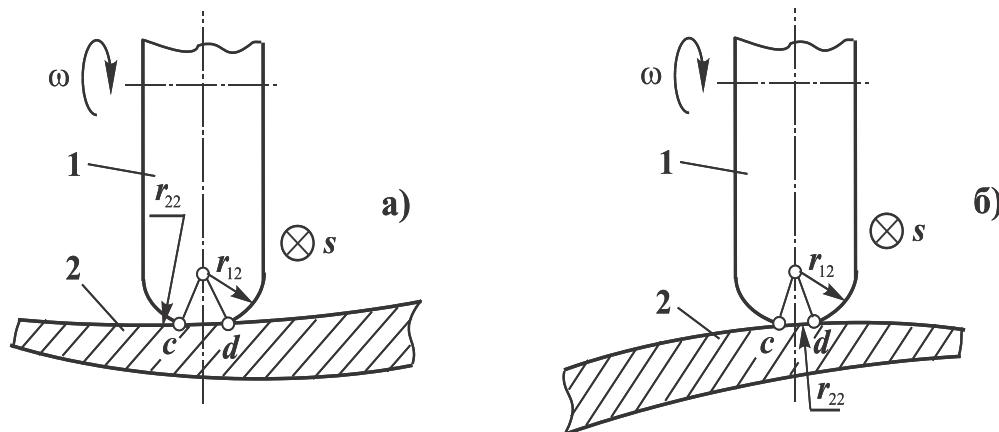
Рисунок ПЗ.2. Схемы обработки поверхностей лопатки ГТД (вид сбоку):

а – обработка корыта лопатки при $r_{11} < r_{21}$; б – обработка корыта лопатки при $r_{11} < r_{21}$ в случае, когда радиусы кривизны инструмента и лопатки почти равны; в – обработка спинки лопатки.

Здесь показано: 1 – полировальный круг; 2 – лопатка; ω – угловая скорость вращения круга; s – подача лопатки; γ_0 – половина угла зоны резания; r_{11} – радиус кривизны круга в осевом сечении; r_{21} – радиус кривизны поверхности лопатки в зоне резания в продольном сечении.

Можно отметить, особенно неравномерные режимы резания возникают при обработке поверхности корыта из-за того, что контакт инструмента и поверхности лопатки внутренний, а также поверхность корыта образована с изменяющимся радиусом кривизны. Это приводит к значительному изменению длины зоны контакта ab в продольном сечении инструмента (рис. ПЗ.2,б). Особенно значительно это влияние происходит в случае, когда радиусы кривизны инструмента r_{11} и поверхности лопатки r_2 почти равны. В этом случае, нагрузка прикладывается постоянная, а пятно контакта имеет переменные параметры из-за изменяющейся дуги контакта ab в зоне резания (рис. ПЗ.2). Это приводит к возникновению неравномерного удельного давления в зоне резания.

Также можно заметить, что такие же процессы неравномерности обработки происходят и в поперечном сечении инструмента [93]. На рис. ПЗ.3 представлены схемы обработки поверхностей лопатки ГТД (вид спереди). На рис. ПЗ.3,а – обработка корыта лопатки; на рис. ПЗ.3,б – обработка спинки лопатки. Здесь цифрами обозначены позиции, аналогичные рис. ПЗ.2. А также на рис. ПЗ.3 показано: r_{12} – радиус кривизны инструмента в поперечном сечении; r_{22} – радиус кривизны по-



верхности лопатки в поперечном сечении.

Можно отметить, что в поперечном сечении зоны обработки, из-за неравномерного радиуса кривизны поверхностей лопатки и особенно

Рисунок ПЗ.3. Схемы обработки поверхностей лопатки ГТД (вид спереди): а – обработка корыта; б – обработка спинки.

стей обработки внутренних и внешних поверхностей лопатки, также происходит возникновение неравномерных удельных контактных нагрузок.

Таким образом, в процессе полирования рабочих поверхностей лопатки возникают следующие особенности обработки [93]:

1. Обработка основных поверхностей лопатки, а именно поверхности корыта и поверхности спинки, ведется в различных условиях из-за того, что при обработке корыта образуется внутренний контакт с инструментом, а при обработке спинки – внешний.

2. Обработка каждой поверхности пера лопатки обусловлена наличием переменного радиуса кривизны в различных точках поверхности и возникновением изменяющихся параметров удельной контактной нагрузки.

3. При обработке поверхности корыта пера лопатки возникают значительные перепады значений контактной нагрузки из-за вхождения инструмента в зо-

ны, где радиус кривизны обрабатываемой поверхности лопатки и инструмента близки по своим значениям.

На рис. ПЗ.4. представлен эпюр удельной контактной нагрузки на поверхности лопатки, возникающий от действия инструмента [93]. Здесь цифрами пока-

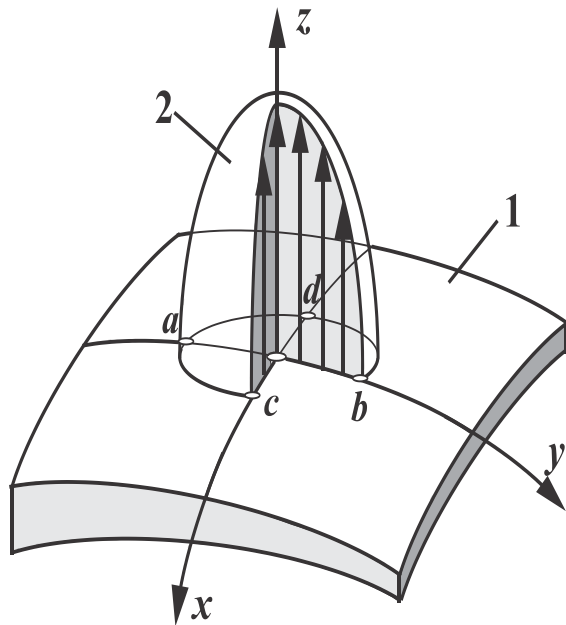


Рисунок ПЗ.4. Эпюр удельной контактной нагрузки на поверхности лопатки от действия инструмента

зано: 1 - обрабатываемая поверхность лопатки, 2 – эпюр контактной нагрузки, возникающий от действия инструмента на поверхность лопатки.

Все выше перечисленные особенности приводят к возникновению неравномерных удельных контактных давлений при полировании поверхностей лопатки и снижению параметров качества лопаток ГТД в целом. Поэтому вопросы определения удельных нагрузок в зоне контакта полировального инструмента и поверхностей лопатки имеет важное значение для повышения точности процесса формообразования поверхностей корыта и спинки лопатки, а также параметров шероховатости и других свойств поверхностного слоя.

Проведенные исследования особенностей контакта инструмента и поверхностей пера лопатки при полировании позволил установить варианты их взаимодействия, которые представлены в табл. ПЗ.1 [93].

Анализируя варианты взаимодействия поверхностей и особенности распределения нагрузки по пятну контакта инструмента и поверхности лопатки, представленные в табл. ПЗ.1, можно отметить, что при обработке поверхности спинки лопатки существует один их вариант взаимодействия (внешний – внешний контакт), характеризуемый распределением контактной нагрузки, которое можно описать распределение Герца, как по образующей, так и по направляющей лопат-

ки. Здесь один вид контакта между поверхностями, однако, в наличии изменяющиеся радиусы кривизны поверхности в направлении образующей и в направлении направляющей линий лопатки. Поэтому обработка поверхности спинки характеризуется постоянством вида контакта по всей поверхности, но изменяющимся радиусом кривизны поверхности спинки лопатки. В этом случае, распределение нагрузки по пятну контакта будет характеризоваться законом Герца, как по образующей, так и по направляющей поверхности спинки лопатки. Можно отметить, что распределение контактной нагрузки по Герцу достаточно хорошо описано в современной литературе и разработаны формулы для инженерных расчетов [79, 93].

Таблица ПЗ.1. Особенности контактирования полировального круга с поверхностями лопатки и распределения удельной нагрузки по пятну контакта

№ п\п	Наименование обрабатываемой поверхности пера лопатки	Вид контакта по исполнительной линии		Тип распределения удельной нагрузки по пятну контакта	
		образующая	направля- ющая	образующая	направля- ющая
1	Спинка	внешний	внешний	по Герцу	по Герцу
2	Корыто	1-й вариант контактирования			
		внутренний	внешний	по Герцу	по Герцу
		2-й вариант контактирования			
		внутренний	внутренний	по Герцу	по Герцу
		3-й вариант контактирования			
		внутренний (радиусы почти рав- ны)	внутренний	по Штайер- ману	по Герцу

При полировании поверхности корыта мало того, что имеется переменный радиус кривизны обрабатываемой поверхности, возникают три варианта контактирования инструмента и поверхности (табл. ПЗ.1). Эти особенности приводят к возникновению больших неравномерностей процесса обработки и снижению параметров качества обработки. Поэтому поверхность корыта обрабатывать более сложно по сравнению с поверхностью спинки пера лопатки.

Можно отметить, что при распределении контактной нагрузки в соответствии с законом Герца внутреннего и внешнего контакта достаточно хорошо изучены в современной литературе, поэтому эти вопросы не будем детально рассматривать.

При распределении нагрузки по Штаерману – Герцу (табл. ПЗ.1) могут происходить значительные изменения удельного давления, которые приводят к снижению качества поверхности лопатки. В этом случае удельная нагрузка по образующей распределяется в соответствии с законом Штайермана, а по направляющей – по Герцу. Эти вопросы мало исследованы и требуют дальнейшего изучения, поэтому рассмотрим более детально эти вопросы.

Используя закон распределения контактной нагрузки, действующий по образующей в соответствии с распределением Штаермана [79], а по направляющей – по Герцу [79] можно записать следующую систему уравнений [93]:

$$\left. \begin{aligned} 2(v_1 r_{11} + v_2 r_{21}) \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) \cos(\gamma - \gamma^1) \ln \operatorname{tg} \frac{|\gamma - \gamma^1|}{2} d\gamma^1 - (x_1 r_{11} + x_2 r_{21}) \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) \sin|\gamma - \gamma^1| d\gamma^1 + \\ + 2v_1 r_{11} \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} p(\gamma^1) d\gamma^1 = (r_{21} - r_{11})(1 - \cos\gamma) - y \cos\gamma; \\ -\gamma_0 < \gamma < \gamma_0; \\ P_i = 3,636\pi \frac{r_{11} r_{12}}{E} \int_0^\gamma p^2(\gamma) \cos\gamma d\gamma, \end{aligned} \right\} \text{П(3.1)}$$

где

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{\lambda_1 + 2\mu_1}{4\pi\mu_1(\lambda_1 + \mu_1)}, & v_2 &= \frac{\lambda_2 + 2\mu_2}{4\pi\mu_2(\lambda_2 + \mu_2)}, \\ x_1 &= \frac{1}{4(\lambda_1 + \mu_1)}, & x_2 &= \frac{1}{4(\lambda_2 + \mu_2)}. \end{aligned}$$

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 интегродифференциального уравнения Прандля, метод, решения которого предложен Векуа [79]. 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.

Разобьем интервал $0, \gamma_0$ в системе (3.62) на n равных частей и будем считать, что в каждом из полученных подинтервалов функция $p(\gamma)$ сохраняет постоянное значение:

$$p(\gamma) = p_k, \quad (k-1)v < \gamma < kv, \\ k = 1, 2, \dots, n, \quad v = \frac{\gamma_0}{n}.$$

Учитывая, что в системе (3.62) функции четные, можно положить:

$$\gamma = lv, \quad (l = 1, 2, \dots, n).$$

Тогда, проделав ряд соответствующих преобразований, решение сводится к использованию метода конечных разностей. Сглаживая получаемые при этом ступенчатые эпюры распределения удельной контактной нагрузки, получим эпюр, определяемый интегральной системой уравнений (ПЗ.1).

Для повышения качества рабочей криволинейной поверхности пера лопатки ГТД с изменяющимся радиусом ее кривизны ГТД и повышения точности обработки необходимо учитывать следующие особенности обработки:

1. Для исключения условий, когда радиусы кривизны полирующего круга и обрабатываемой поверхности по своим размерам почти равны, необходимо обеспечивать радиус полирующего круга в продольном сечении следующих размеров $r_{11} = (0,7 - 0,8) r_{21\min}$, где $r_{21\min}$ - минимальный радиус кривизны обрабатываемой

поверхности лопатки. В этом случае контактная нагрузка при полировании будет изменяться не значительно. Следует заметить, что в условиях, когда радиусы кривизны полирующего круга и обрабатываемой поверхности по своим размерам почти равны, возникают значительные перепады удельных давлений из-за перераспределения контактного давления на большие размеры площадки контакта. При этом при переходе из режима обработки, когда радиусы кривизны почти равны в обычные условия обработки, когда радиусы кривизны имеют различие, происходит значительное изменение удельной нагрузки, что ведет к изменению свойств (параметров шероховатости) поверхности лопатки. Это ведет к снижению параметров качества рабочих поверхностей лопатки ГТД.

2. Режущую часть полирующего круга в поперечном сечении следует выполнять с закруглением.

3. При обработке поверхности корыта пера лопатки для каждой ступени лопаток должен быть свой конкретный полирующий круг. При этом для комплекта ступеней лопаток должен быть сформирован комплект инструментов. В ряде случаев один инструмент может быть применен для обработки лопаток 2 ... 3 ступеней близких размеров.

4. При обработке поверхности лопатки необходимо обеспечивать параметры поджима полирующего круга из условия средних параметров нагружения. Для определения параметров нагружения зоны полирования необходимо предварительно проводить соответствующие расчеты.

5. Для обеспечения постоянных параметров качества рабочих поверхностей лопатки необходимо вести управление параметрами за счет изменения усилия поджима полирующего круга.

Приведенные рекомендации нужно учитывать при обработке рабочих поверхностей пера лопатки ГТД.

Таким образом, выполненные исследования дают возможность решать вопросы повышения качества криволинейных поверхностей ГТД из титановых сплавов на основе установления механизма полировки и определения схем взаи-

модействия инструмента и поверхности лопатки. В представленной работе решены следующие вопросы:

1. Проведенные исследования позволили определить физическую сущность и механизм процесса полирования криволинейных поверхностей лопатки. При этом установлено, что процесс полирования лопаток из титановых сплавов обусловлен действием комплекса различных типов технологических воздействий.

2. В работе установлены основные особенности обработки и схемы взаимодействия инструмента и криволинейных поверхностей лопатки. При этом показано, что процессу обработки криволинейных поверхностей пера лопатки свойственны резко изменяющиеся параметры контактирования полировального круга и рабочей поверхности лопатки в зоне их контакта.

3. Выполненные исследования позволили разработать математические модели взаимодействия инструмента и поверхности лопатки.

4. В данной работе представлены основные рекомендации по повышению качества обработки криволинейных поверхностей лопатки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Особенности полировки и глянцевого тонких покрытий лопаток компрессора и назначение припусков. Сглаживающее зеркальное полирование поверхностей

В настоящее время для повышения ресурса лопаток компрессора широко применяются вакуумные ионно-плазменные покрытия различного назначения [1, 5, 20, 21]. Эти покрытия позволяют существенно повысить эксплуатационные свойства различных изделий машиностроения. Вместе с тем для обеспечения заданных свойств лопаток компрессора с вакуумными ионно-плазменными покрытиями необходима технологическая подготовка лопаток к нанесению покрытия, выполнение покрытия и дальнейшая отделочная обработка поверхностного слоя изделия с покрытием. Эти вопросы не достаточно освещены в современной литературе [1, 5], а также требуют уточнения и дальнейшей проработки.

Целью данной работы является повышения качества и производительности комбинированной обработки лопаток компрессора с вакуумными ионно-плазменными покрытиями на основе установления связей между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностного слоя основы и покрытия, разработки прогрессивного метода полировки поверхностного слоя покрытия, а также установления рациональных припусков обработки покрытия.

В соответствии с поставленной целью в работе предполагается решить следующие задачи: определить связи между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностного слоя основы и покрытия; разработать прогрессивный метод полировки поверхностного слоя покрытия; предложить рациональный метод определения припусков при полировке поверхностного слоя лопаток компрессора с тонкими покрытиями, например, на основе нитрид титана.

Выполним исследования особенностей связей между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностного слоя основы и тонких покрытий.

Проведенные исследования показывают [1, 5], что возможны варианты образования структуры покрытия. На параметры структуры вакуумных ионно-плазменных покрытий влияют следующие факторы:

- температура поверхности основы поверхности изделия,
- давление реакционного газа,
- ток дуги.

В целом структуру покрытия можно представить тремя вариантами (рис. 3.17) [170]:

- I зона, низкотемпературная, формируется при температуре поверхности основы до температуры $T_1 = 0,35 T_{пл}$, где $T_{пл}$ - температура плавления конденсированного вещества;
- II зона, промежуточная, формируется при температуре поверхности основы от T_1 до T_2 , где $T_2 = (0,45 \dots 0,5) T_{пл}$;
- III зона, высокотемпературная, формируется при температуре поверхности основы выше T_2 .

В I зоне, покрытие состоит из конусоподобных кристаллов, а его поверхность имеет куполоподобное строение. При этом во внутренних объемах кристаллов и особенно в их прилегающих зонах имеются микропоры.

Около II зоны происходит поступательный переход до второй зоны с ровной матовой поверхностью, при этом образующееся покрытие имеет столбчатую структуру. Особенностью структуры этого покрытия является наличие межкристаллических границ. Микропористость покрытия в этой зоне практически не наблюдается, и ширина столбчатых кристаллов растет с увеличением температуры основы изделия.

В III зоне формируется равновесная структура покрытия. Если материал покрытия склонен к полиморфному превращению, то он может дополнительно изменять структуру при этой температуре.

На рис. П4.1 представлены гипотетические модели вариантов особенностей параметров шероховатости поверхности основы и покрытия: рис. П4.1,а – до механической обработки, рис. П4.1,б - после механической обработки [88].

Можно отметить, что возможны и другие структурные варианты покрытия поверхности изделия, однако для практики целесообразно использовать три рассмотренных вариантов.

Также заметим, что наиболее целесообразно наносить покрытия на поверхность лопаток компрессора со структурой I и II зон. Это обусловлено тем, что

структура покрытия III зоны может иметь измененную кристаллическую решетку.

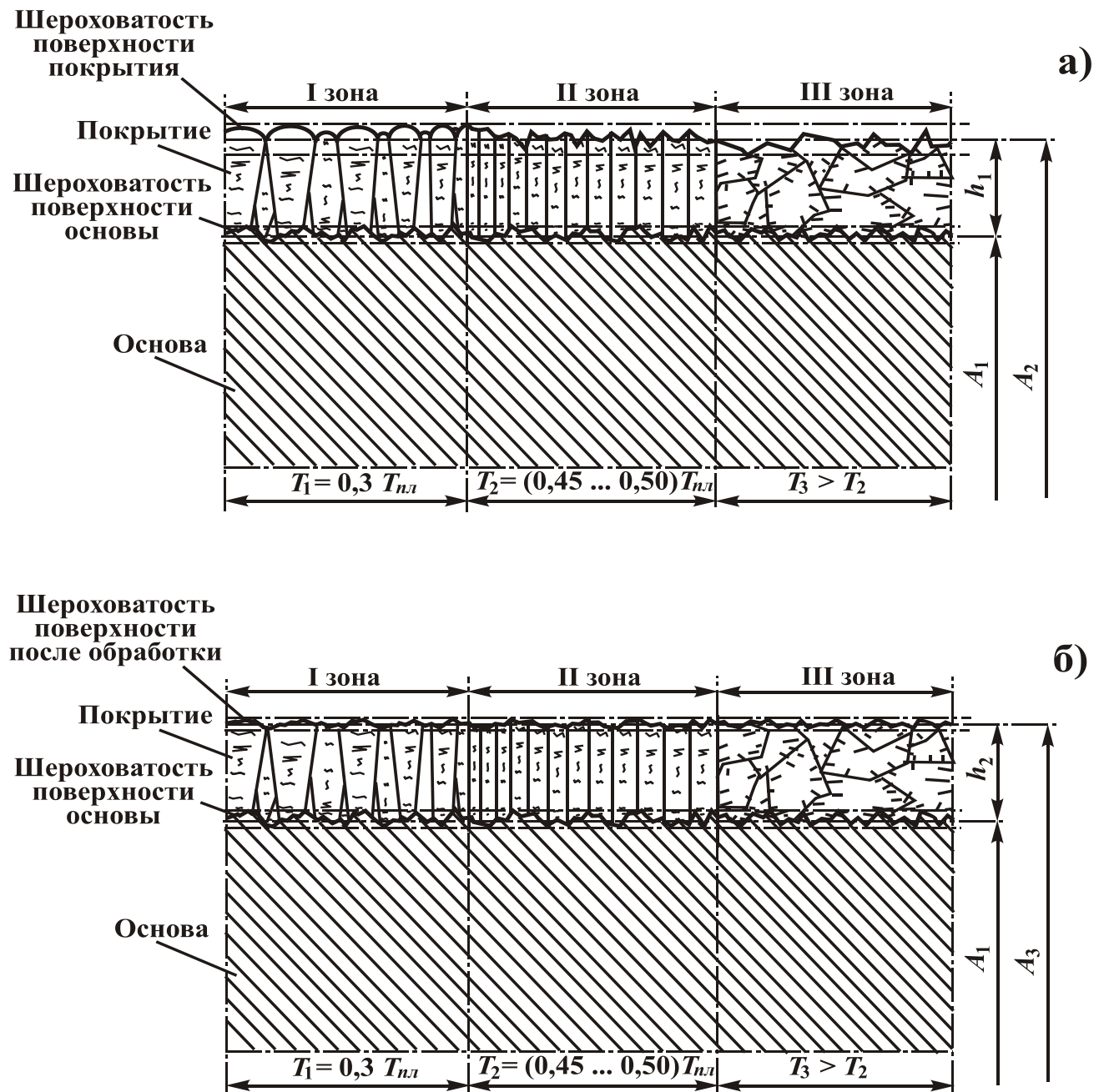
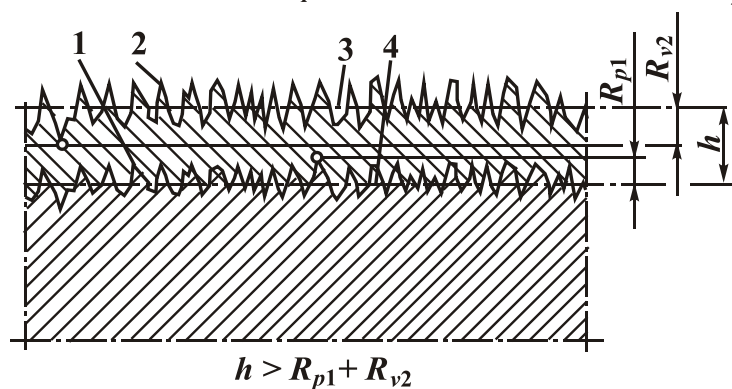
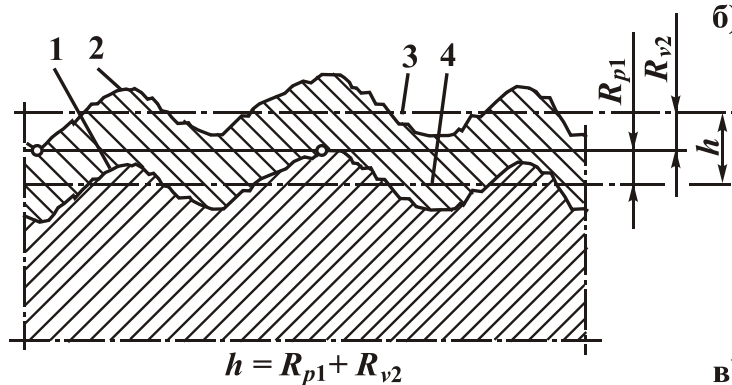
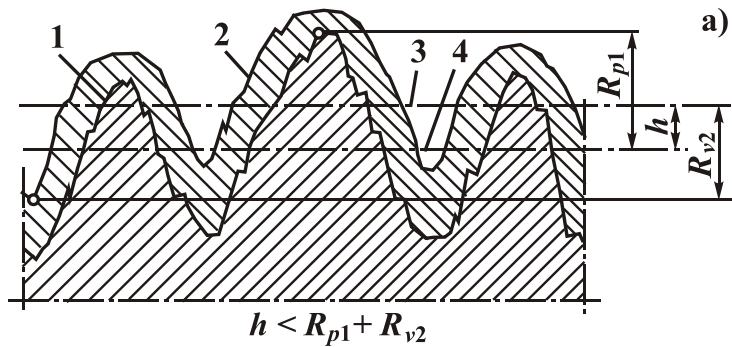


Рисунок П4.1. Гипотетические модели вариантов параметров шероховатости поверхности основы и покрытия: а – до механической обработки, б – после механической обработки

Выполненные исследования позволили установить, что между толщиной покрытия, параметрами шероховатости основы поверхности лопатки компрессора и параметрами шероховатости покрытия существует связь. Эта связь может быть трех видов (рис. П4.2) [88].

Первый вид связей (рис. П4.2,а) возникает тогда, когда толщина покрытия h меньше, чем сумма высоты сглаживания профиля шероховатости R_{p1} основы и



а) глубины сглаживания профиля шероховатости R_{v1} покрытия. Данная связь может быть представлена следующим выражением [88]:

$$h < R_{p1} + R_{v2}; \quad (\text{П4.1})$$

где h - толщина покрытия;

R_{p1} - высота сглаживания профиля шероховатости основы поверхности изделия;

в) R_{v2} - глубина сглаживания профиля шероховатости покрытия поверхности изделия.

Можно отметить, что параметры высоты сглаживания профиля шероховатости R_{p1} основы и глубины сглаживания профиля шероховатости R_{v1} покрытия определяются на основании следующих выражений:

$$R_{\max 1} = R_{p1} + R_{v1},$$

$$R_{\max 2} = R_{p2} + R_{v2};$$

где $R_{\max 1}$ и $R_{\max 2}$ - наибольшие высоты профилей шероховатости основы и покрытия, соответственно;

R_{p1} и R_{p2} - высоты сглаживания профиля шероховатости покрытия основы и покрытия, соответственно;

R_{v1} и R_{v2} - глубины сглаживания профиля шероховатости покрытия основы и покрытия, соответственно.

Можно отметить, что покрытия с данным видом связи можно рекомендовать, для следующих случаев:

- для нанесения покрытия, на поверхность изделия имеющего большие параметры шероховатости, для защиты от коррозии;
- для нанесения супер тонких покрытий на поверхность изделия.

В этом случае, толщина покрытия меньше параметров шероховатости и покрытие повторяет геометрию покрытия основы.

Второй вид связей (рис. П4.2,б) возникает тогда, когда толщина покрытия h равна сумме высоты сглаживания профиля шероховатости основы R_{p1} и глубины сглаживания профиля шероховатости покрытия R_{v1} . Эта связь может быть представлена следующим выражением [88]

$$h = R_{p1} + R_{v2}. \quad (\text{П4.2})$$

В этом случае толщина покрытия соизмерима с параметрами шероховатости поверхностей. Это переходные покрытия, они могут применяться как для решения вопросов коррозионной стойкости, так и для износостойкости.

Третий вид связей (рис. П4.2,в) образуется тогда, когда толщина покрытия h больше суммы высоты сглаживания профиля шероховатости основы R_{p1} и глубины сглаживания профиля шероховатости покрытия R_{v1} . Эта связь может быть представлена следующим выражением [88]

$$h > R_{p1} + R_{v2}. \quad (\text{П4.3})$$

В этом случае толщина покрытия больше параметров шероховатости поверхностей. Эти покрытия могут применяться для решения вопросов повышения износостойкости.

Выполненные исследования позволили установить связи между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностей основы и покрытия.

Далее исследуем особенности специальной полировки изделий с тонкими покрытиями и приведем данные по назначению припусков.

Полирование – обработка (отделка) материалов до получения зеркального блеска поверхности. Полировка металлов производится на полировальных станках быстровращающимися мягкими кругами из фетра, сукна или войлока либо быстродвижущимися лентами, на поверхность которых нанесены шлифпорошок или полировальная паста микрошлифпорошков.

Полированием эластичными кругами получают шероховатость поверхности, находящуюся в пределах $R_a = 0,16 \dots 0,010$ мкм. При этом предварительно обработанная поверхность должна иметь шероховатость не ниже следующих параметров $R_a = 0,32 \dots 0,16$ мкм [171]. Количество снимаемого в процессе полирования металла составляет $0,01 \dots 0,03$ мм, скорость вращения полировального круга – 2800 об/мин (10 м/с). Зернистость абразивного материала применяемого для полирования, выбирают в зависимости от вида полирования:

- для предварительного полирования зернистость шлифпорошка 10 ... 6 (размер зерен 100 ... 60 мкм);
- для окончательного полирования зернистость шлифпорошка от 6 ... 4 (размер зерен 60 ... 40 мкм) микрошлифпорошка до М40 ... М10 (размер зерен 40 ... 10 мкм).

Для полирования изделий из труднообрабатываемых материалов - твердых сплавов, керамики, ситалла, кремния, кварца и других материалов – применяют алмазные пасты с зернистостью алмазного порошка 60/40 ... 1/0 с нормальной (Н), повышенной (П) и высокой (В) массовыми долями алмазов (ГОСТ 25593 -83).

Можно отметить, что нитрид титановые покрытия, наносимые вакуумным ионно-плазменным напылением, имеют микротвердость порядка 20 ... 23 ГПа и выше, при этом толщина покрытия может находиться в следующих пределах 2 ... 15 мкм. Рекомендуемая толщина покрытия для лопатки компрессора обычно принимается 5 ... 6 мкм.

Выполненный анализ особенностей **полировки поверхности до нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия** (в основном нитрид титановых покрытий) позволил установить следующее:

- до нанесения ионно-плазменного покрытия, для улучшения процесса нанесения покрытия, необходимо выполнить полировку поверхности;

- перед полировкой поверхности изделия необходимо обеспечить параметры шероховатости поверхности в следующих пределах $R_a = 0,32 \dots 0,16$ мкм [171];

- полировка поверхности может быть выполнена традиционными методами.

Вместе с тем, проведенный анализ особенностей **полировки поверхности после нанесения покрытия** также позволил установить следующее:

- процесс полировки имеет определенные специфические особенности, связанные с тем, что при традиционных методах полирования припуск на обработку составляет $0,01 \dots 0,03$ мм [171], а толщина нитрид титанового покрытия составляет $2 \dots 15$ мкм, поэтому здесь традиционные методы не подходят из-за возможности повреждения или полного удаления покрытия;

- вследствие того, что нитрид титановое покрытие имеет толщину, находящуюся в пределах $2 \dots 15$ мкм, процесс полировки должен быть направлен не на сьем материала покрытия, а только на уменьшение параметров шероховатости в пределах шероховатости;

- расчет и назначение припусков на обработку покрытия поверхности изделия должен иметь новый подход, отличный от рекомендуемых в работах [78, 140] для специальных или обычных материалов изделий;

- вследствие того, что микротвердость нитрид титанового покрытия составляет $20 \dots 23$ ГПа и выше, а его толщина составляет $2 \dots 15$ мкм, полировка должна выполняться тонкими микрошлифпорошками с размерами зерен меньше толщины покрытия (M5 ... M10) и имеющих более низкую твердость, чем нитрид титановое покрытие (электрокорунд нормальный и белый, формокорунд и другие материалы);

- данный вид полирования называется высотным сглаживающим полированием или глянцеваанием покрытия поверхности изделия.

Проведенные исследования позволили установить, что перед нанесением покрытия для улучшения его параметров связи с основой необходимо поверх-

ность полировать. В этом случае можно использовать традиционные методы и режимы полировки.

Для выполнения полировки поверхности с вакуумным нитрид титановым покрытием необходимо выполнение высотного сглаживающего полирования, базирующегося на следующем:

- в качестве абразивных материалов необходимо использовать тонкие микрошлифпорошки с размерами зерен меньше толщины покрытия зернистостью M5 ... M10;

- применяемые абразивные материалы должны иметь более низкую твердость, чем нитрид титановое покрытие (электрокорунд нормальный и белый, формокорунд и другие материалы), это исключит возможность повреждения покрытия, здесь будут удаляться только вершины профиля шероховатости и реализовываться процесс их сглаживания;

- на новых методах расчета припусков высотного сглаживающего полирования.

Последовательно назначая припуски по всем операциям и переходам из условия неполного удаления высоты шероховатости, полученной на этапе напыления покрытия, при механической обработке на этапе технологического процесса после нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия обеспечивается эффективность отделочной обработки поверхности изделия близкая к предельному значению. При этом суммарное значение всех припусков на этом этапе обработки не должно превышать величины параметров высоты шероховатости поверхности, образующейся на этапе нанесения покрытия.

Для расчета и назначения припусков при высотном сглаживающем полировании покрытия может быть использован метод деления параметров (шероховатости) поверхностного слоя по операциям технологического процесса и последовательного уменьшения их на последующих операциях.

Для поверхности изделий с покрытием минимальный припуск (двусторонний припуск) на обработку может определяться следующим образом [88]:

$$2z_{\min i} = 2 \frac{R_{\max(i-1)}}{n}; \quad (\text{П4.4})$$

где $z_{\min i}$ - минимальны припуск на обработку i -го поверхностного слоя;

$R_{\max(i-1)}$ - наибольшая высота профиля $(i-1)$ -го поверхностного слоя, здесь

$$R_{\max(i-1)} = R_{p(i-1)} + R_{v(i-1)};$$

n - коэффициент уточнения припуска (для высотного сглаживающего полирования покрытий $n = 1,3 \dots 2,0$).

Можно отметить, что при $n = 2$ полностью выполняется сглаживание высоты профиля $R_{p(i-1)}$ до центральной линии сглаживания, а при $n = 1,3$ происходит уменьшение $R_{\max(i-1)}$ на 30%.

В табл. П4.1 представлены результаты экспериментальных исследований процесса высотного сглаживающего полирования покрытия поверхностного слоя изделия. Здесь результаты представлены в зависимости от коэффициента уточнения припуска. Скорость полировального круга $v = 20$ м/с, покрытие на основе нитрид титана (катоды – ВТ 1-0), исходные параметры шероховатости поверхности изделия $R_a = 0,080$ мкм, обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ – 8М, алмазная паста (ГОСТ 25593-83) АСМ, полировальный круг – войлок. В качестве обрабатывающего устройства использован станок для полировки поверхности (рис. П4.3).



Рисунок П4.3. Полировальный станок для специальной обработки изделий с покрытиями

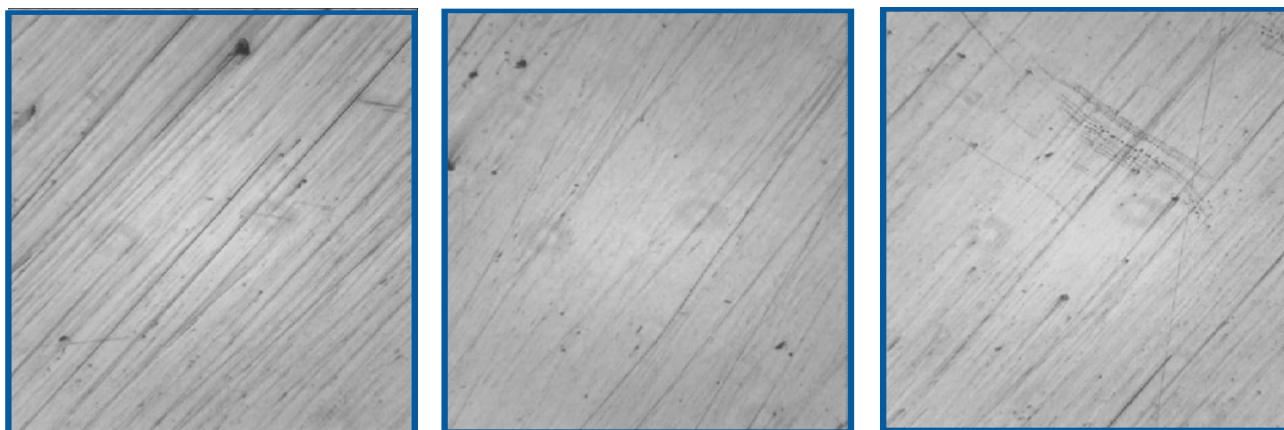
На рис. П4.4 представлен общий вид поверхности изделия из титанового сплава ВТ – 8М (увеличение $\times 100$ раз), обработка выполнена в соответствии с параметрами, представленными в табл. П4.1. На рис. П4.4,а показана поверхность после предварительного полирования; на рис. П4.4,б - поверхность после чистового полирования; на рис. П4.4,в – поверхность после глянцеваания.

Таблица П4.1. Результаты экспериментальных исследований процесса высотного сглаживающего полирования покрытий поверхностного слоя изделия

№ п/ п	Операция полирования	Коэф. уточн. припус ка, n	Время полиро вания, T , с	Характер. пасты, зернис- тость	Параметр шероховатости, R_a , мкм (не более)	
					до обработки	после обработки
1	Предвари- тельное	1,26	185	АСМ 10/7	0,080	0,063
2	Окончатель- ное	1,26	185	АСМ 7/5	0,063	0,050
3	Глянцевание	1,25	190	АСМ 5/3	0,050	0,040

Выполненные в работе исследования позволили установить следующее:

- перед нанесением ионно-плазменного покрытия, для улучшения процесса нанесения покрытия, необходимо выполнить полировку поверхности, при этом



а)

б)

в)

Рисунок П4.4. Общий вид поверхности изделия из стали 18X2H4MA (увеличение $\times 100$ раз): а - предварительное полирование, б – окончательное полирование, в - глянцевание

можно применять традиционные методы и режимы полировки;

- для выполнения полировки поверхности с вакуумным нитрид титановым покрытием необходимо использовать нетрадиционные методы полировки поверхности, базирующиеся на выполнении высотного сглаживающего полирования;

- расчет и назначение припусков на обработку покрытия поверхности изделия должен иметь новый подход, базирующийся на расчете и назначении припусков при высотном сглаживающем полировании покрытия, основанный на методе деления параметров шероховатости поверхностного слоя по операциям технологического процесса и последовательном уменьшении их на последующих операциях.

Выполненные исследования позволили установить связи между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностей основы и покрытия. Это дает возможность технологу проектировать необходимую структуру операций технологического процесса до и после нанесения покрытия на поверхности изделия, а также обеспечивать необходимые параметры качества поверхностей в зависимости от видов связей.

В работе разработан прогрессивный метод полировки поверхностного слоя покрытия базирующемся на новом подходе в обработке. Этот метод получил название высотное сглаживающее полирование тонких покрытий.

Для реализации высотного сглаживающего полирования в данной работе разработан рациональный метод определения припусков при полировке поверхностного слоя изделия с тонкими покрытиями, например, на основе нитрид титана.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Акты внедрения результатов работы

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Снежнянского
машиностроительного
завода АО «МОТОР СИЧ»

А.П. Недашковский
2014 г.

**АКТ**

внедрения общей методики синтеза структуры технологического процесса
восстановления лопаток компрессора ГТД с применением
функционально-ориентированных покрытий
на Снежнянском машиностроительном заводе

Кафедрой технологии машиностроения Донецкого национального технического университета выполняются научно-исследовательские работы по разработке структур технологических процессов восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий.

Одним из направлений этой работы является разработка технологического обеспечения восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий. Разработанная общая методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий, представленная в диссертационной работе Михайлова Дмитрия Александровича, используются на Снежнянском машиностроительном заводе для разработки технологического обеспечения восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 9800,00 грн. (девять тысяч восемьсот грн. 00 коп.)

Председатель комиссии
Члены комиссии:

А.М. Бровкин

Главный технолог

В.Г. Павловский

Главный металлург

В.В. Цимбалист

Начальник ТБ ОГМ

С.Ю. Бурыкин

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ЧП «ДЕПЛА»



М.Г. Петров

2015 г.

внедрения технологии ремонта и восстановления
лопаток газотурбинных двигателей ТВЗ-117 в ЧП
«ДЕПЛА»

Кафедрой технологии машиностроения Донецкого национального технического университета выполняются научно-исследовательские работы по разработке технологии ремонта и восстановления лопаток газотурбинных двигателей ТВЗ-117. Одним из направлений этой работы является разработка комплексной технологии ремонта и восстановления лопаток газотурбинных двигателей ТВЗ-117. А также проектирование технологической оснастки ее изготовление с обеспечением высокого качества и эффективности нанесения ионно-плазменных композиционных покрытий на установке ННВ 6.6-И.

Разработанная технология ремонта и восстановления лопаток газотурбинных двигателей ТВЗ-117, представленная в диссертационной работе Михайлова Дмитрия Александровича, используется на Луганской ЧП «ДЕПЛА» для выполнения работ по ремонту и восстановлению лопаток газотурбинных двигателей ТВЗ-117. Ремонтные работы лопаток газотурбинных двигателей выполняются совместно с кафедрой «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 36000,00 грн. (тридцать шесть тысяч грн. 00 коп.) из расчета на один двигатель ТВЗ-117. Для десяти двигателей ТВЗ-117 ожидаемый экономический эффект составит 360000,00 грн. (триста шестьдесят тысяч грн. 00 коп.)

Председатель комиссии

Алишевский А.Н.

Члены комиссии:

Головятинская В.В.

Васильева Л.Д.

Назаренко А.А.



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе ДонНТУ
проф., д.т.н. Маренич К.Н.

03 2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Михайлова Дмитрия Александровича в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета

Кафедрой технологии машиностроения Донецкого национального технического университета выполняются научно-исследовательские работы по созданию функционально-ориентированных технологий машиностроения. Одним из направлений этой работы является разработка технологий по нанесению функционально-ориентированных покрытий для лопаток компрессора ГТД. Функционально-ориентированные покрытия лопаток компрессора выполняются на базе вакуумных ионно-плазменных технологий, которые позволяют обеспечивать качественно новые свойства лопаток авиационных двигателей. Особенно эффективны эти технологии для восстановления лопаток в процесс эксплуатации ГТД.

В ходе выполнения этих исследований на кафедре технологии машиностроения Донецкого национального технического университета разработана «Общая методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий» при непосредственном участии диссертанта кафедры Михайлова Дмитрия Александровича.

Разработанная методика «Общая методика синтеза структуры технологического процесса восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий» внедрена в учебный процесс кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета для чтения курсов лекций технологического профиля кафедры.

Представленная на кафедру «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета методика и рекомендации дают возможность повысить качество подготовки, инженерную компетенцию и навыки студентов и магистрантов, обучающихся на кафедре.

Председатель комиссии,
профессор, к.т.н.

Горобец И.А.

Члены комиссии:

доц., к.т.н. Грубка Р.М.
доц., к.т.н. Буленков Е.А.
доц. к.т.н. Лахин А.М.