

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

На правах рукописи



Ломакин Игорь Вячеславович

**Управление технологическими воздействиями для повышения
интенсивности выноса тепла у двигателей и технологичности электрода-
инструмента при многоместной комбинированной обработке по
диэлектрическому шаблону**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность: 2.5.5. Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Научный руководитель

Смоленцев Евгений Владиславович –
доктор технических наук, профессор

Воронеж-2026

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1 АНАЛИЗ НАУЧНОГО И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА ОХЛАЖДАЮЩИХ СИСТЕМ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ В РАБОТЕ ЦЕЛИ.....	14
1.1 Действующие системы теплообмена у теплонапряженных машин и пути использования их в качестве аналогов при создании технологических средств интенсификации охлаждения жидкой средой.....	14
1.2 Технологические методы и средства интенсификации выноса тепла при организации течения потока охлаждающей жидкости через турбулизаторы.....	24
1.2.1 Механизм протекания процесса выноса тепла через каналы.....	24
1.2.2 Методы и расчеты интенсификации охлаждения.....	26
1.2.3 Технологические методы изготовления турбулизаторов.....	28
1.2.3.1 Традиционные методы механической обработки.....	28
1.2.3.2 Комбинированные методы обработки.....	29
1.3 Возможность создания бесконтактного технологичного инструмента для комбинированного группового метода изготовления элементов турбулизаторов.....	35
1.4 Пути интенсификации выноса тепла охлаждающими средами.....	41
1.5 Уровень достаточности имеющегося задела по теории и практике технологического обеспечения для решения поставленных задач.....	42

Глава 2	ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ, ПУТИ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ В РАБОТЕ ЗАДАЧ.....	44
	2.1 Рабочие гипотезы.....	44
	2.2 Исследовательская и испытательная база	46
	2.2.1 Установки для комбинированной электрохимической обработки по шаблону.....	46
	2.3 Научная база работы.....	52
	2.4 Алгоритм выполнения исследований.....	67
	Выводы по главе.....	72
Глава 3	МЕХАНИЗМ И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПОТОКА И ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ ПО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ШАБЛОНАМ.....	74
	3.1 Управление процессом охлаждения и моделирование механизма организации характеристик течения рабочей среды в межэлектродном зазоре при комбинированной обработке.....	74
	3.2 Расчет параметров шаблона для электрода- инструмента.....	81
	3.3 Моделирование процесса разделения электрода- инструмента на фрагменты в едином сборочном узле.....	85
	3.4 Экспериментальное подтверждение расчетных параметров процесса комбинированной обработки углублений.....	88
	Выводы по главе.....	91

Глава 4	ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	92
4.1	Конструкция и технологические возможности безызносного электрода-инструмента.....	92
4.2	Проектирование технологического процесса изготовления турбулизаторов по множественным многократным диэлектрическим шаблонам.....	97
4.3	Алгоритм расчета, изготовления и сборки электрода- инструмента с шаблоном.....	99
4.4	Оценка уровня и поддержание свойств турбулизаторов. при эксплуатации теплообменных устройств.....	105
	Выводы по главе.....	106
Глава 5	НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ЗОНЫ ИЗДЕЛИЙ НА ЭТАПАХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	108
5.1	Новые методы и технологические процессы создания изделий с эффективными охлаждающими система.....	108
5.2	Перспективные пути выполнения исследований по интенсификации процессов охлаждения и ожидаемые результаты работ по совершенствованию теплонапряжённых машин в машиностроении.....	110
5.3	Технико-экономический анализ эффективности использования предложенных электродов-инструментов для создания охлаждающих систем.....	111
5.4	Место предлагаемых технологических методов и устройств в долгосрочных программах создания теплонапряженных научно-технических машин.....	113
	Выводы по главе.....	114
	Заключение.....	115

Список литературы.....	117
Приложения.....	129

Введение

Актуальность темы работы. При создании новых конструкций теплонапряженных машин и их агрегатов типа камер сгорания и реактивных сопел жидкостных ракетных двигателей, возникают труднопреодолимые ограничения, не позволяющие повысить температуры в зоне горения топлива, а технические решения по выносу тепла становятся все более актуальными для новых изделий. Наряду с другими методами охлаждения, перенос части тепла от нагрева деталей горячей зоны удалось осуществить прокачкой компонентов топлива перед подачей его в форсунки через охлаждающие каналы на корпусе камеры сгорания и реактивного сопла с использованием искусственной шероховатости, наносимой на донную часть и боковые поверхности охлаждающих каналов, которая стала выполнять функции эффективной турбулизации потока жидкости в них. Однако, при выполнении более сложных турбулизаторов возникли трудности с доступом инструмента в зону формирования углублений в узких и глубоких охлаждающих трактах. Применение электроэрозионного комбинированного бесконтактного процесса облегчило серийное изготовление турбулизаторов в донной части каналов, но оказалось нетехнологичным из-за большой длительности операции и значительных затрат на доработку профиля и повышение качества поверхностного слоя. Переход на комбинированную электрохимическую размерную обработку позволил устранить часть недостатков предшествующих технологических методов, но не решил задачу по интенсификации теплообмена путем научного обоснования области размещения турбулизаторов, в том числе на боковых ребрах каналов в расчетных местах при одновременной обработке углублений по всей поверхности охлаждаемой зоны. Попытки использовать комбинированную обработку по металлическим и многослойным неразборным шаблонам сделали процесс трудноуправляемым, нетехнологичным и эффективным только для серийного производства двигателей летательных аппаратов. Актуальность получил новый научный подход к решению проблемы изготовления турбулизаторов с использованием быстросменной, технологичной оснастки, прежде всего -

электродов-инструментов, расширяющих технологические возможности и область применения вновь создаваемых охлаждающих жидкостных систем при оперативной перестройке производства на выпуск новых изделий с применением цифровых технологий. Потребовалась новая методика расчета многоместного диэлектрического шаблона в электроде-инструменте, учитывающая оптимальное размещение и форму углублений и реализующая возможности быстрого получения турбулизаторов в охлаждающих каналах. Для этого потребовался имитатор течения охлаждающей жидкости, созданный и модернизированный с участием автора.

Работа выполнялась по государственной космической программе Российской Федерации в период 2016-2025 годов. Результаты работы были использованы в процессе опытно-конструкторской разработки и создании системы «Феникс», которая утверждена постановлением Правительства РФ № 1513 от 9 декабря 2017 года. Часть результатов работы была реализована на Воронежском механическом заводе и в АО КБХА. Исследования послужили базой для стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 5 ноября 2020 года №2869-р, в которой выделены приоритетные для РФ направления развития в области обеспечения современного отечественного производства наукоемким технологическим оборудованием и соответствующими средствами технологического оснащения.

Степень разработанности темы. В работе использовались результаты анализа литературных источников и публикаций ведущих специалистов в области технологии машиностроения из отечественных школ Воронежа, Казани, Москвы, Санкт-Петербурга, Брянска, Тулы, Перми, Новосибирска, Уфы, Иванова, Самары и других городов России, а также зарубежных ученых в области комбинированных методов обработки и достижений отечественных и зарубежных производителей оборудования для комбинированных методов обработки (США, Болгарии, Беларуси, Швеции, Германии, Франции, Китая, Японии), где выделены предпосылки для создания научной базы по развитию рассмотренных в работе направлений, с целью получения необходимых эксплуатационных свойств

высоконагруженных деталей изделий и даны обоснования направлений научных исследований по совершенствованию технологии изготовления существующей и перспективной авиационной и космической техники.

Цель и задачи работы.

Целью работы является расширение области использования технологического способа бесконтактной многоместной комбинированной электрохимической обработки по диэлектрическому шаблону, формирующему турбулизаторы на труднодоступных для традиционного инструмента участках переменного профиля охлаждающих каналов путем совершенствования характера течения жидкой охлаждающей среды, создания электрода-инструмента для достижения высокой технологичности процесса обработки за счет одновременного изготовления качественных углублений без последующей доработки.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Анализ конструктивных ограничений и пути их преодоления при изготовлении углублений в каналах охлаждающих систем теплообменных аппаратов.

2. Разработка механизма и создание бесконтактного технологического инструмента для комбинированного группового метода изготовления элементов турбулизаторов.

3. Научное обоснование путей интенсификации охлаждения за счет совершенствования характера течения охлаждающей жидкости при комбинированной обработке локальных углублений по многократным шаблонам.

4. Создание доказательной базы для проведения научных исследований по интенсификации систем охлаждения теплонапряженных машин и технологическое обеспечение их реализации.

Предмет и объект исследования. Технологические методы и средства для расширения области использования комбинированной обработки при изготовлении локальных средств интенсификации охлаждения жидкими средами в

охлаждающих каналах с ограниченным доступом традиционного инструмента в зону выполнения технологических операций.

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база, достоверность исследований.

Полученные в работе результаты достигнуты на базе анализа исследований по научному направлению темы диссертации с учетом гипотез, выдвинутых соискателем и частично защищенных патентами РФ. Теоретические исследования подтверждены целевыми экспериментами, для чего применен и модернизирован оригинальный, защищённый патентом, имитатор процесса идентификации течения жидкой охлаждающей среды, протекающей через отверстия в диэлектрическом трафарете при формировании углублений между турбулизаторами. Использована научная и производственная база предприятий аэрокосмической отрасли машиностроения, современная исследовательская и вычислительная база научной школы по месту обучения соискателя.

Достоверность результатов, проверенная в промышленных условиях, показала высокую конвергенцию теоретических и практических материалов, что подтверждено официальными документами, отзывами ведущих ученых, материалами конференций, проведенными в стране и за рубежом.

Научные результаты, выносимые на защиту, включают:

1. Научное обоснование возможности повышения интенсивности теплообмена по предложенной схеме размещения турбулизаторов, в том числе на ранее труднодоступных для обработки ребрах охлаждающих каналов, и создание нового электрода-инструмента для интенсивного формирования углублений в охлаждающих каналах современной и создаваемой теплонапряженной техники.

2. Механизм и модель охлаждения по предложенному способу интенсификации теплообмена с применением турбулизаторов, разработанными комбинированными методами обработки по многоместным диэлектрическим шаблонам электрода-инструмента многоразового использования.

3. Научное обоснование возможности расширенного использования разработанной комбинированной обработки для ускорения технологического

процесса и повышения качества обработки при создании охлаждающих систем в теплонапряженных машинах.

4. Результаты использования систем охлаждения в изделиях авиационно-космического машиностроения, доказательства успешного решения поставленных задач и достижение поставленной цели работы.

Научная новизна результатов и личный вклад соискателя в технологическую науку включают:

1. Установление закономерностей выноса тепла через каналы с турбулизаторами и проектирование на этой базе новых видов электродов-инструментов с шаблонами, позволяющими выполнять турбулизаторы на боковой и донной поверхности тракта охлаждения, что в свою очередь, позволит повысить интенсификацию охлаждения в десятки раз.

2. Разработка способа интенсификации охлаждения изделий в системах с турбулизаторами за счет управления характером течения охлаждающей жидкости в узких каналах при обработке углублений по созданным шаблонам в электродах-инструментах для комбинированной обработки.

3. Установление механизма воздействия комбинированной обработки по шаблонам на эксплуатационные характеристики изделий с локальными углублениями и пути повышения технологичности средств технологического оснащения.

Личный вклад соискателя в технологическую науку включает научное обоснование методики проектирования нового многоместного электрода-инструмента, обеспечивающего управляемое течение охлаждающей среды через турбулизаторы во всех каналах для интенсивного охлаждения горячей зоны теплонапряженных машин и технологичного его использования в процессе освоения новой продукции в аэрокосмической отрасли.

Практические результаты работы:

1. Расширение области использования комбинированной электрохимической размерной обработки по гибким диэлектрическим шаблонам в электродах-

инструментах на труднодоступные для инструмента участки охлаждающих каналов теплонапряженных машин и агрегатов.

2. Интенсификация теплообмена за счет обоснованного расположения и одновременного изготовления всех турбулизаторов в выпускаемых и создаваемых двигателях летательных аппаратов, что позволяет снизить трудоемкость изготовления изделий, повысить их ресурс и количество успешных пусков ракетных двигателей.

3. Создание технологичного электрода-инструмента с гибким шаблоном, обеспечивающим одновременное получение всех углублений в донной части и на боковых поверхностях ребер в охлаждающих каналах.

4. Разработка алгоритмов выполнения исследований по созданию электродов-инструментов многократного использования с учетом специфики проектирования технологического процесса на стадии опытного и мелкосерийного производства осваиваемых изделий.

Соответствие выполненных исследований паспорту специальности 2.5.5.

Работа выполнялась в соответствии с требованиями паспорта специальности 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, согласно которой материал включает:

1. Создание нового, на уровне изобретения, технологичного электрода-инструмента для одновременной обработки всех углублений, формирующих турбулизаторы, в том числе на труднодоступных для инструмента поверхностях охлаждающих каналов, что соответствует п. 4 шифра специальности 2.5.5.

2. Назначение и создание режимов и средств комбинированных методов обработки с управляемыми физико-техническими воздействиями для открытых и труднодоступных в процессе обработки элементов охлаждающей системы теплонапряженных машин для повышения эксплуатационных характеристик двигателей летательных аппаратов (п. 2 шифра специальности 2.5.5.).

3. Управление механизмом выноса тепла при жидкостном охлаждении горячей зоны тепловых двигателей, позволившее создать эффективные

ресурсосберегающие средства повышения долговечности изделий, обеспечивающих увеличение допустимого числа повторных пусков ракетных двигателей (п. 6 шифра специальности 2.5.5.)

Апробация и реализация результатов исследований. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и отраслевых научно-технических конференциях: XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении» (Тамбов, 2020); конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2021) (Севастополь, 2021); Международной научно-практической конференции «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (Брянск, 2022); International Scientific Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Пекин, Китай – 9 декабря 2023 г.); XIV Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (Кемерово: КузГТУ, 26 ноября – 2 декабря 2023); 15-м МНТК «Наукоёмкие технологии в машиностроении» в рамках конгресса «Русский инженер» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 1-3 ноября 2023 г.); 16-й МНТК «Наукоёмкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» (Ростов-на-Дону, 23-29 сентября 2024 г.); XVII Международной научно-технической конференция «Наукоёмкие технологии в машиностроении: современные тренды, перспективы развития и опыт подготовки инженерных кадров 2025» (Крым, Алушта); НТК «Машиностроительные технологические системы» (Ростов на Дону, 23-25 апреля 2026 г.); 18 МНТК «Наукоёмкие технологии в машиностроении 2026» (Тула, 5-8 октября 2026 г.)

Результаты работы прошли проверку и приняты к внедрению в АО «Конструкторское бюро химавтоматики», откуда получены документы о состоянии внедрения результатов с крупным экономическим эффектом. Исследования использованы в учебном процессе на кафедре технологии машиностроения ВГТУ и в ВГЛТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ. В их числе: 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в зарубежных научных источниках, рецензируемых в базе «Scopus»; 11 публикаций в научных сборниках и материалах конференций, где соискателю принадлежат: постановка, развитие научной проблемы, изучение механизма протекания процессов в рабочих средах с управляемыми физическими параметрами, создание технологичного электрода-инструмента с диэлектрическим шаблоном многоразового использования, реализация результатов в аэрокосмической отрасли и в других отраслях машиностроения. В работах, изданных в соавторстве, все авторы в равной степени принимали участие в проведении исследований по теме работы и не имеют взаимных претензий.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (111 наименований), 40 рисунков, 5 таблиц и 2 приложений. Содержание диссертации изложено на 132 страницах машинописного текста с рисунками, таблицами, приложениями.

Глава 1 АНАЛИЗ НАУЧНОГО И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА ОХЛАЖДАЮЩИХ СИСТЕМ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ В РАБОТЕ ЦЕЛИ

1.1 Действующие системы теплообмена у теплонпряженных машин и пути использования их в качестве аналогов при создании технологических средств интенсификации охлаждения жидкой средой

Эффективность применения технологического процесса комбинированной обработки турбулизаторов с использованием различных методов зависит от конструктивных особенностей действующей или предлагаемой системы охлаждения [8,10]. Это требует для каждого рассматриваемого метода обработки учитывать возможности подвода инструмента в зону удаления припуска с обрабатываемой детали, высокого уровня технологичности зоны охлаждения, научного обоснования места расположения в шаблоне отверстий и их геометрию, конструкцию охлаждающей системы горячей зоны изделия, [13,74].

В камерах сгорания современных жидкостных ракетных двигателей температура рабочих процессов превышает 3200 К, что делает необходимым применение специальных систем охлаждения, поскольку это значение существенно выше температуры плавления конструкционных материалов. Для обеспечения тепловой защиты используются различные методы интенсификации охлаждения, которые представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные методы интенсификации охлаждения

Группа методов	Основные методы	Назначение	Преимущества	Недостатки/ограничения
Снижение теплоподвода от продуктов сгорания	1.Завесное (плёночное) охлаждение 2. Транспирационное (пористое) охлаждение 3. Обогащённый/обеднённый пристеночный слой	Снижение теплового потока от горячих продуктов сгорания к стенке камеры	Сильная локальная защита стенки	Снижение предельного импульса, сложность организации
Конструктивно-материальные	1.Высокотеплопроводные материалы (медь и сплавы) 2. Теплозащитные покрытия (ТВС) 3.Комбинированное охлаждение 4.Применение в конструкции аддитивных технологий	Улучшение теплопроводности, создание теплового барьера, интеграция нескольких методов	Повышение ресурса и предельных параметров	Технологическая сложность, стоимость

Продолжение таблицы 1.1

Регенера- тивное охлаждение	1.Оребрение каналов	Увеличение турбулентности	Высокая эффектив- ность,	Рост гидравли- ческого
	2.Искусственная шероховатость	, площади теплообмена и	надёжность,	сопротивлен
	3.Оптимизация геометрии каналов	коэффициента теплоотдачи в	отлаженность	ия
	4.Пористые и решётчатые структуры	тракте охлаждения		

В конструкции, представленной на рисунке 1.1, по внутренним каналам циркулирует один из компонентов топлива, выполняя функцию охладителя. Он отводит тепло от корпуса, после чего поступает в камеру сгорания.

Ключевыми элементами системы охлаждения являются [77;80] локальные выступы на поверхности каналов охлаждения (турбулизаторы), вызывающие разрушение пограничного слоя и его постоянное возобновление в потоке жидкости, что может приводить к резкому увеличению локальных скоростей охладителя и возрастанию градиентов температуры у стенки. Благодаря этому обеспечивается интенсивное охлаждение критически теплонапряженных элементов двигателя и повышение эксплуатационных показателей изделия. Турбулизаторы размещены в каналах (рисунок 1.1) между элементами корпуса камеры сгорания и реактивного сопла [7;2].

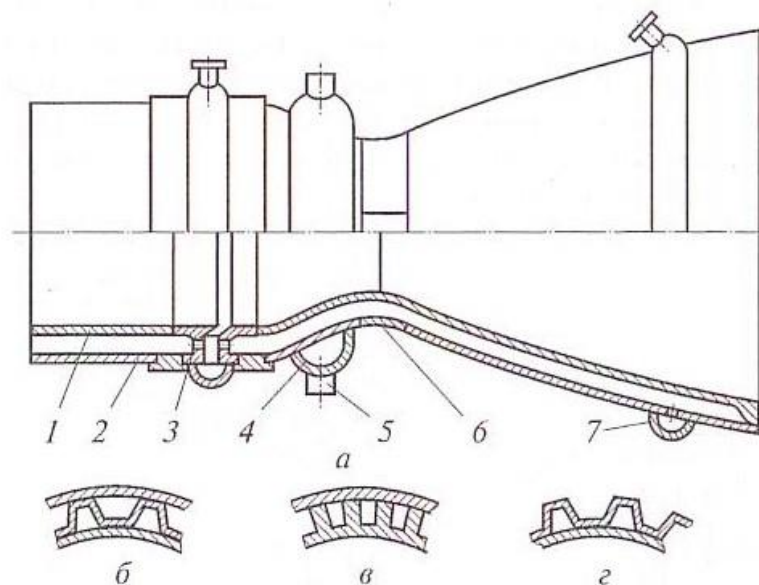


Рисунок 1.1 – Конструктивные схемы изготовления охлаждающих каналов в горячей зоне ЖРД [74]

а- общий вид; б- продольные гофрированные проставки, формирующие щелевые каналы; в- монолитные каналы, разделенные рёбрами; г- сборные конструкции без наружной оболочки

1 – корпус; 2 – наружная оболочка (покрытие); 3 – пояс завесы с отверстием в зону горения топлива; 4 – бандаж; 5 – цапфа; 6 – разрезное кольцо в критическом сечении сопла; 7 – коллектор подачи охлаждающей среды (топлива)

При наличии охлаждающих каналов на рисунке 1.1 достигается интенсивное охлаждение теплонагруженной зоны и появляется возможность уменьшения толщины камеры сгорания. Примерами такой конструкции являются изображенные на рисунке 1.1 б) и г) охлаждающие тракты, выполненные в виде отдельных гофр с продольными, наклонными и винтовыми ребрами. Наибольшее распространение получили монолитные охлаждающие каналы (рисунок 1.1 в)) с ребрами толщиной 1-1,5 мм получаемые путем фрезерования каналов на станках с ЧПУ вдоль образующей камеры двигателя или по винтовой линии с переменной кривизной по радиусу изделия [5]. В оребренном охлаждающем тракте теплообмен улучшается не только за счет увеличения площади поверхности охлаждения, но и за счет возможности выполнения более тонкой внутренней оболочки.

Главным преимуществом винтового щелевого охлаждающего тракта является увеличение скорости протекания охладителя по тракту, что становится еще одним фактором, интенсифицирующим теплоотвод от корпуса.

Гофрированные охлаждающие тракты менее эффективны в конструкции современных жидкостных ракетных двигателей, но из-за высокой технологичности процесса изготовления их достаточно часто применяют в конструкциях ЖРД.

Общим недостатком систем охлаждения, имеющих щелевой охлаждающий тракт, является ограниченная возможность съема тепла при высоких тепловых потоках, возникающих при использовании высококалорийных топлив в условиях работы современного ЖРД. Превышение предельно возможной высоты ребер с утонением корпуса изделия может снижать жесткость и прочность конструкции, а также препятствовать дальнейшему увеличению теплообмена. В ряде случаев эффективность теплосъема в каналах является недостаточной при течении охлаждающей жидкости по гладким поверхностям каналов без изменения характера течения охладителя.

Таблица 1.2 – Анализ известных конструкций и применяемых технологических приемов для повышения технологичности

№ п/п	Критерии классификации	Тип неровностей	Характеристики и примеры неровностей	Технологические ограничения	Рекомендованные методы обработки
1	По геометрической форме	Регулярные, упорядоченные	Прямоугольные, треугольные, криволинейные выступы	Ограниченный доступ инструмента в зону обработки. Сложность настройки инструмента	Комбинированные методы обработки (КМО)
		Нерегулярные, случайные	Абразив, хаотичные неровности из диэлектрика	Ограниченный доступ в зону обработки инструмента при КМО	Лучевые методы обработки (лазерная прошивка)
2	По расположению	Поперечные	Выступы перпендикулярные потоку	Ограничение по высоте выступов на шаблоне электрода-инструмента (ЭИ)	КМО по диэлектрическим шаблонам импульсным током
		Продольные	Выступы параллельные потоку	Ограничение по глубине обработки	Комбинированная электрохимическая обработка по шаблонам (КЭХОШ)
		Диагональные, наклонные	Выступы под углом к направлению потока, по винтовой линии	Сложность настройки и управления процессом КМО по шаблону	Бесконтактная КЭХОШ на постоянном токе

Продолжение таблицы 1.2

		Комбинированные	Крестообразные или сетчатые	Высота выступов сравнима с межэлектродным зазором (МЭЗ), запирающие поток	КЭХОШ с управлением напряжением тока и давлением потока жидкости
3	По относительной высоте выступов	Высота выступов от 0,05 до 0,5 мм [7]	Место расположения выступов в местах стыковки и на границах элементов шаблона	Возможность записывания потока и появление короткого замыкания ЭИ с корпусом	КЭХОШ с управляемым напряжением тока и давлением потока жидкости
		Высота выше выступов 0,5 мм [7]	Требуется промежуточные выступы	Возможность срыва потока жидкости	КЭХОШ с управляемым напряжением тока
4	По назначению	Гидродинамические	Управление турбулентностью потока	Возможность срыва и записывание потока	КЭХОШ с регулированием характера течения потока
		Технологические	Интенсификация охлаждения	Перегрев горячей зоны изделия	КЭХОШ с регулированием потока электролита и параметров режима КЭХО

На современном этапе создания охлаждающих систем в горячей зоне ЖРД применение в конструкции щелевых каналов турбулизаторов позволяет во всех случаях увеличить интенсивность теплообмена.

Для более полного понимания форм, характеристик неровностей и углублений, образующих турбулизаторы, требуется провести анализ известных конструкций и принятых технологических приемов, направленных на повышение технологичности, что показано в таблице 1.2.

Из таблицы 1.2 следует, что для анализа путей интенсификации выноса тепла следует учитывать конструктивные особенности элементов системы, в частности неровности (турбулизаторы), наносимые на охлаждающие каналы, и применение комбинированной обработки с использованием шаблонов, [22;23;53;54;56;73].

Сведения об эффективности применения данных неровностей и их конструктивных особенностей в системе охлаждения, для серийных изделий, как правило, находятся в процессе эксплуатации охлаждающей системы, нередко требуют постоянного совершенствования, что усложняет их использование при большом выпуске продукции. В настоящее время особое внимание уделяется технологичности изготовления турбулизаторов, обоснованию их необходимости на поверхностях ребер каналов охлаждения и применению многоместной одновременной обработки всех углублений по многократному шаблону.

Проведенные практические исследования пока не дали надежного заключения о возможности решения этих вопросов. Так как отсутствуют научно обоснованные доказательства размеров и мест углублений, описания механизмов процесса течения потока через часть турбулизаторов, имеются случаи излишнего нанесения их на участки, труднодоступные для инструмента. Поэтому в современных конструкциях охлаждающих систем целесообразно использовать щелевые винтовые каналы, показанные на рисунке 1.2. Данный конструкционный метод достаточно современный и высокоэффективный, применяется во многих жидкостных ракетных двигателях, работающих на керосине и жидком кислороде.

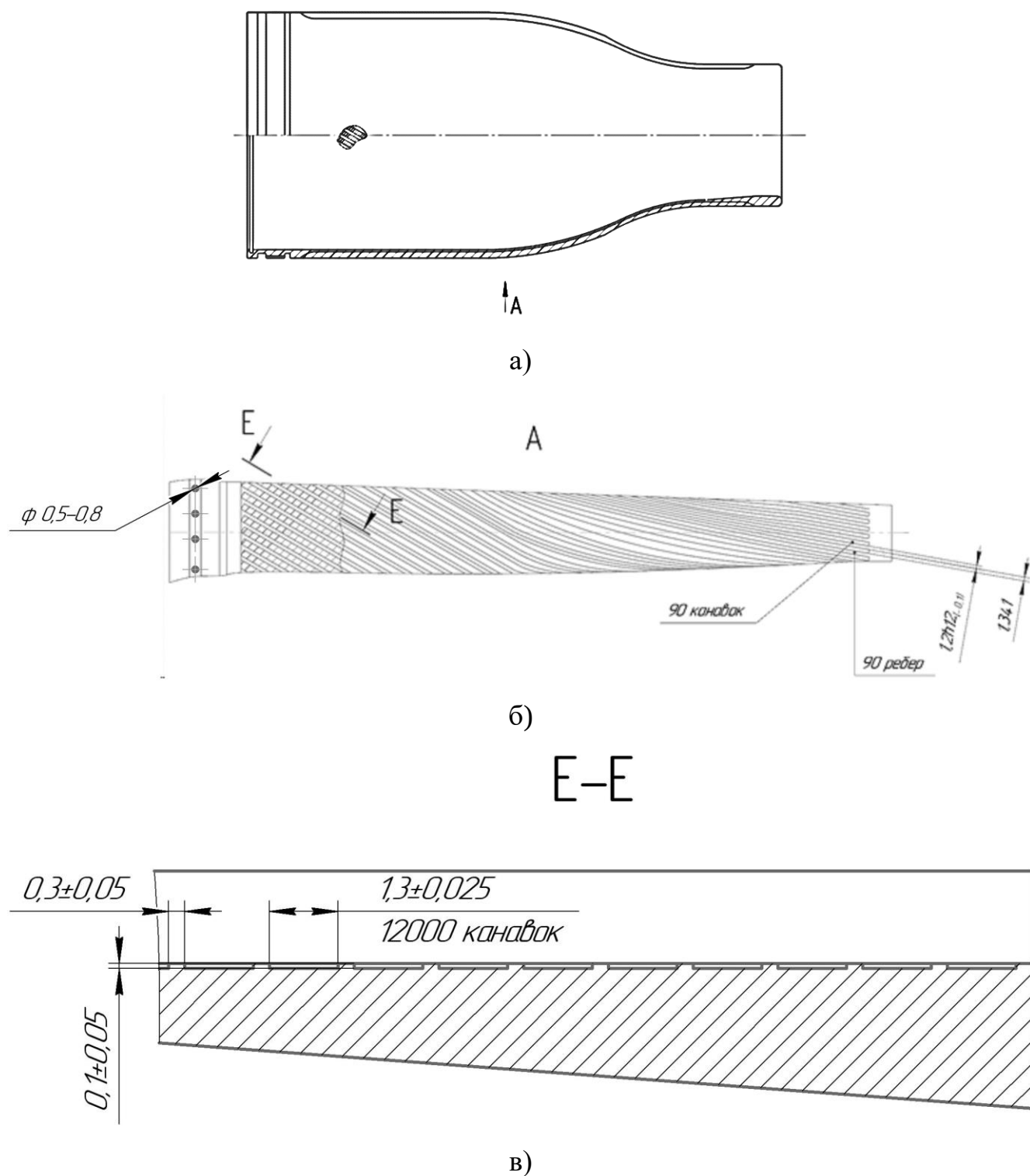


Рисунок 1.2 – Каналы охлаждения корпуса камеры сгорания (а),
расположение на нем винтовых профилей (б) с типовыми геометрическими
размерами (в)

Конструкция, приведённая на рисунке 1.2 резко увеличивают теплоотдачу за счет: удлинения охлаждающих каналов, возможности размещения на некоторых

сложнопрофильных участках дополнительных турбулизаторов, управления течением потока в каналах.

Нанесение винтовых канавок двойной кривизны на элементы охлаждающих систем вызывает технологические сложности изготовления турбулизаторов на донной и боковых поверхностях тракта охлаждения из-за трудно поддающихся обработке элементов с переменными геометрическими параметрами канала. На текущий стадии создания охлаждающих систем теплонагруженной зоны ракетных двигателей следует учитывать [24] широкий диапазон изменения геометрических параметров каналов, осложняющих и удорожающих процесс их изготовления:

- перепад высот по дну охлаждающих каналов до 43мм;
- изменение глубины канала от 2,8 мм на входе, до 1,68 мм на выходе;
- вариацию ширины канала от 1,2 мм на входе, до 0,9 мм на выходе;
- изменение угла наклона оси канала от 30° на входе, до 20° на выходе.

Геометрические характеристики влияют на технологические возможности нанесения углублений, формирующих турбулизаторы, что в свою очередь влияет на точность выполнения выступов, которые могут иметь длину от 0,3 мм, высоту от 0,1 мм, а ширина может приниматься равной экспериментально установленной ширине канала на исследуемом участке.

При проектировании охлаждающих систем возникает потребность в использовании неоднородности параметров турбулизаторов (таблица 1.2) (выступы могут иметь различные формы, геометрические размеры и расположение), нарушающих равномерное охлаждение горячей зоны двигателя. Принимая во внимание вышеперечисленное, их изготовление требует совершенствования технологических приемов, обеспечения высокой технологичности методов и средств обработки элементов систем (вторая задача работы). Для решения такой задачи требуется разработка высокопроизводительных и эффективных способов обработки теплонапряжённых поверхностей корпусов камеры сгорания и реактивного сопла, обеспечивающих необходимую точность и повторяемость на всех обрабатываемых участках, имеющих зачастую сложную криволинейную поверхность.

Представленный материал позволяет наметить направления технологических исследований на совершенствование применяемых методов и создание новых, путём повышения технологичности процесса обработки, для увеличения интенсификации охлаждения жидкой средой, что предусмотрено при решении первой задачи работы. Материал окажется полезным для оптимизации конструкций охлаждающих систем создаваемых теплонапряженных машин, в том числе ЖРД, но требует улучшения средств технологического оснащения, что будет рассмотрено при решении второй задачи работы.

1.2 Технологические методы и средства интенсификации выноса тепла при организации течения потока охлаждающей жидкости через турбулизаторы

1.2.1 Механизм протекания процесса выноса тепла через каналы

Наиболее теплонагруженной частью камеры сгорания является её критическое сечение (рисунок 1.1), поскольку в этой зоне тормозится течение охлаждающей среды, возрастает гидравлическое сопротивление и как следствие снижается теплодинамическая эффективность охлаждения (таблица 1.2).

Для увеличения скорости потока и снижения гидравлического сопротивления, необходимо применение принципиально нового подхода к размещению (при ее наличии) искусственной шероховатости. В расчётах, выполненных специалистами АО КБХА [5] представлены доказательства правомерности механизма выноса тепла при использовании турбулизаторов, полученных в каналах различной геометрии с применением комбинированного метода изготовления электроэрозионной прошивкой. На Рисунках 1.3–1.6 приведены [5; 13] температурные поля в сечениях с турбулизаторами в донной части каналов от форсунок по длине течения охлаждающей жидкости на длинах 40, 100, 300 и 500 мм соответственно при интенсивности турбулентных пульсаций на входе $I = 10 \%$.

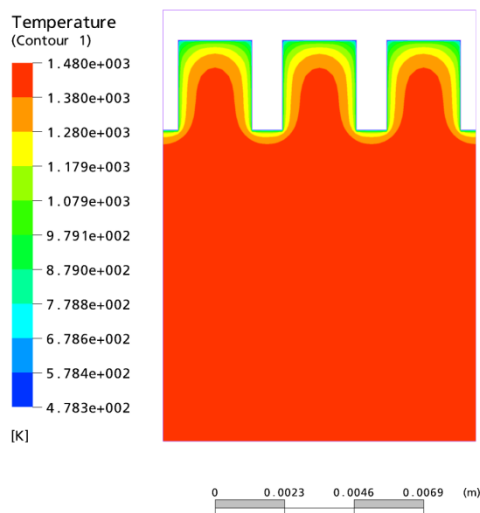


Рисунок 1.3 – Поле температур в поперечном сечении на расстоянии 40 мм

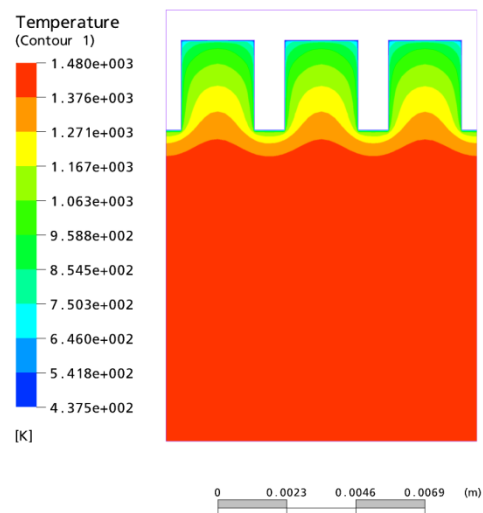


Рисунок 1.4 – Поле температур в поперечном сечении на расстоянии 100 мм

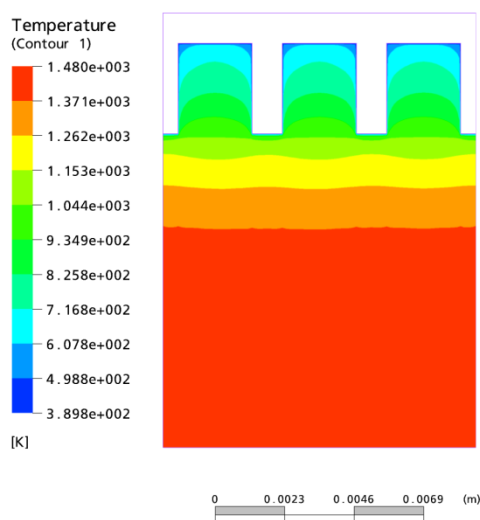


Рисунок 1.5 – Поле температур в поперечном сечении на расстоянии 300 мм

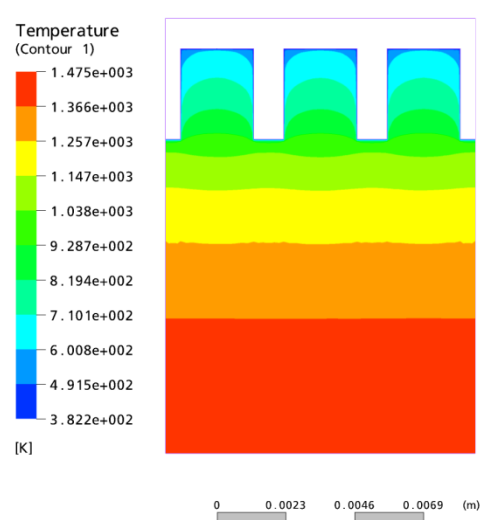


Рисунок 1.6 – Поле температур в поперечном сечении на расстоянии 500 мм

Основываясь на данных рисунках, можно сделать следующий вывод: температура снижается пропорционально удалению от форсуночной части оболочки камеры сгорания. В зоне критического сечения (100мм, рисунок 1.4) на

донной части канала охлаждения, температура ниже, чем в зоне малого диаметра (40мм, рисунок 1.3) на той же поверхности. Таким образом интенсификация теплообмена в зоне критического сечения позволяет увеличить давление в камере сгорания, что в свою очередь повышает удельный импульс и тягу двигателя. На расстоянии 300 мм существенно снижается температура, за счёт прямолинейной геометрии канала охлаждения. Снижение температуры значительно уменьшает ползучесть, термическую усталость и эрозию материала стенки, что особенно важно для многоразовых двигателей.

1.2.2 Методы и расчеты интенсификации охлаждения

Оребрение и создаваемые выступы в виде турбулизаторов относятся к наиболее эффективным и широко применяемым методам интенсификации теплообмена в трактах охлаждения жидкостных ракетных двигателей. Эти два подхода часто используются совместно, особенно в зоне критического сечения (таблица 1.1), где плотность теплового потока достигает максимальных значений (80–160 МВт/м² и выше). Оребрение существенно увеличивает площадь теплообменной поверхности и организует вторичные течения, а выступы эффективно разрушают вязкий подслой, повышая турбулентность и коэффициент теплоотдачи со стороны корпуса камеры сгорания к охлаждающей жидкой среде. Для этого требуется [53;54;56] обосновать количество, место и размеры углублений в охлаждающих каналах, чтобы по этим данным спроектировать сквозные отверстия в шаблоне. Такие мероприятия выполняются по результатам моделирования механизма выноса тепла жидкой средой с управлением характером течения потока. Это относится ко второй решаемой задаче работы, некоторые элементы которой выполнялась в [74] с научным обоснованием элементов системы охлаждения в рамках единого итеративного теплогидравлического анализа. Здесь на первом этапе определяли тепловой поток от продуктов сгорания к стенке (обычно по модифицированному уравнению Бартца) [5,18,42], теплофизические свойства охладителя (с учётом их зависимости от температуры и давления),

массовый расход и максимально допустимый перепад давления в тракте охлаждения, что использовалось в данных работах [5;18;42] при описании механизма и решения задачи теплообмена при проектировании сквозных отверстий в шаблонах созданных электродов-инструментов.

Расчёт оребрения начинается с выбора геометрических параметров: высоты ребра h , ширины канала a , ширины ребра b и толщины огневой стенки δ . Эффективность оребрения оценивалась коэффициентом, представленным в формуле (1.1) [5]:

$$\eta = \frac{\tanh(m \cdot h)}{m \cdot h} \quad (1.1)$$

где:

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{охл}}}{\lambda \cdot b}} \quad (1.2)$$

$\alpha_{\text{охл}}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки к охладителю;

λ — теплопроводность материала (для медных сплавов $\sim 350\text{--}380 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

Затем вычисляют приведённый коэффициент теплоотдачи с учётом оребрения:

$$\alpha_{\text{прив}} = \alpha_{\text{охл}} \cdot \left(1 + \eta \cdot \frac{2h}{a}\right) \quad (1.3)$$

В [5] показано, что при предельно высокой степени оребрения (аспект-Рейшо $h/a = 8\text{--}16$) коэффициент эффективности η может составлять $0,6\text{--}0,85$, а суммарный теплосъём возрастет до $2\text{--}4$ раз.

Расчёт геометрии выступов проводился параллельно.

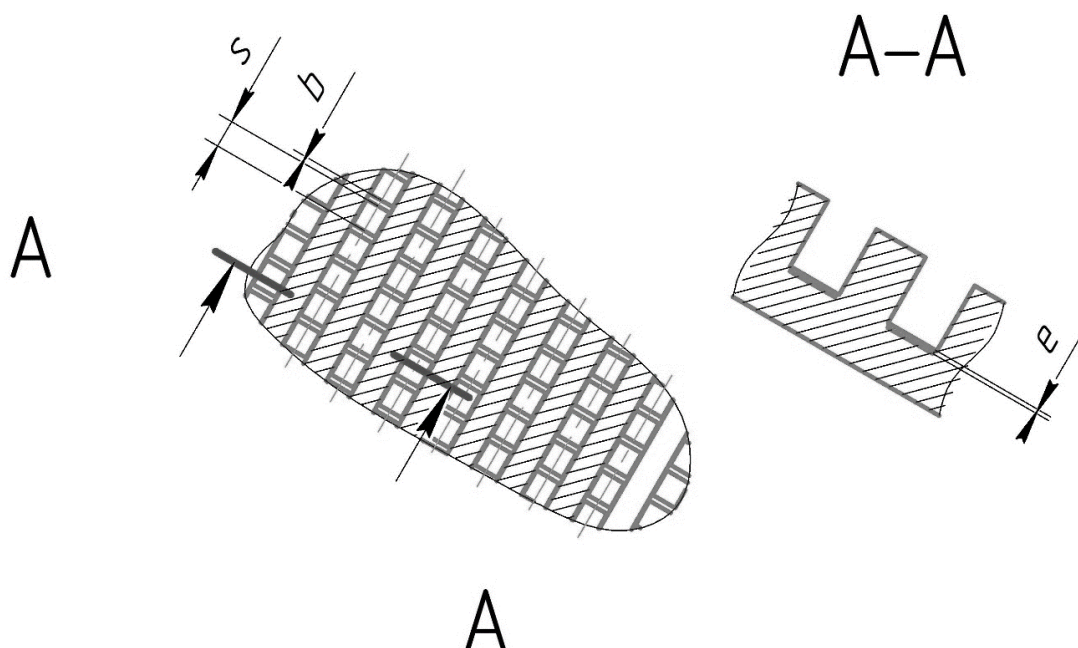


Рисунок 1.7 – Геометрические параметры турбулизаторов, от
теплонпряженности которых зависит интенсивность охлаждения
 s - шаг турбулизаторов; b - длина; e - глубина

На рисунке 1.7 показаны основные геометрические параметры применяемых турбулизаторов, ширина углубления в данном случае равна ширине канала охлаждения.

Комбинированное применение оребрения и искусственных неровностей, образующих турбулизаторы в каналах, позволяет повысить суммарный коэффициент теплоотдачи до 1,8–3 раза по сравнению с гладким каналом [5].

1.2.3 Технологические методы изготовления турбулизаторов

1.2.3.1 Традиционные методы механической обработки

Для изготовления деталей с искусственными неровностями, которые могут создать турбулизаторы, используются как традиционные методы обработки (фрезерование, формирование роликом), так и перспективные комбинированные методы обработки с электрофизическими и электрохимическими воздействиями [23,74].

В авиакосмическом машиностроении достаточно широко используются традиционные методы. К их достоинствам следует отнести хорошую обеспеченность отрасли средствами технологического оборудования, квалифицированными кадрами, опытом выполнения сложных операций. Для получения требуемой геометрии выступов в местах, доступных для подвода в зону обработки инструмента, чаще используют фрезерование и прокатку фасонным инструментом. Здесь применение торцевого фрезерования позволяет получить требуемые параметры выступов и углублений, за счёт выбора оптимальных режимов подачи и скорости резания, минимизировать дефекты после обработки заготовки. Основными недостатками фрезерования являются ограничения по форме канала охлаждения и быстрое затупление инструмента из-за, в основном, налипания стружки, особенно при обработке применяемых в авиакосмическом машиностроении медных и бронзовых сплавов. Из-за криволинейной формы канала зачастую невозможно выполнить фрезерование без подрезки ребра канала даже при использовании специального металлорежущего инструмента. Но главным недостатком традиционных приемов является ограниченная область использования этих методов, и даже отсутствие возможности применять их в узких пазах (шириной 0,8-1 мм) каналов, особенно при обработке углублений сложной формы на боковых поверхностях ребер. Данная проблема, недоступности использования традиционных методов требует дальнейшего поиска высокопроизводительных комбинированных методов обработки с хорошим доступом безысходного технологичного инструмента в формируемую зону.

1.2.3.2 Комбинированные методы обработки

Под комбинированными методами понимаются технологические процессы, в которых использовано сочетание совместимых видов воздействий, оказывающих существенное влияние на повышение технологических показателей проектируемого способа формообразования или изменение эксплуатационных характеристик изделий.

Сочетание различных, в том числе механических, воздействий на объект обработки с наложением электрического поля позволяет повысить технологические возможности процессов и достичь результатов, открывающих возможность создания изделий нового поколения, часто не имеющих аналогов на мировом рынке.

Комбинированные методы обработки проектируют путем объединения известных в технике физических воздействий: теплового, химического, механического, магнитного, ядерного. Электрическое поле является не только источником энергии, но и интенсифицирующим фактором, усиливающим значение базовых воздействий. Примером может служить коррозия металлов, где за счет внутренних электрических токов происходит разрушение структурных составляющих сплавов. Подобный же механизм раскрывает процесс электрохимической размерной обработки, который происходит путем подвода внешнего тока большой плотности, что приводит к ускорению съема металла на несколько порядков. Все известные способы обработки материалов [86] представляют собой комбинацию воздействий. При описании механизма протекания процесса комбинированной обработки с наложением электрического поля достаточно учитывать только основные воздействия, главным образом внешние, которые поддаются управлению, и некоторые виды взаимного влияния, вызванные изменениями показателей от внешних воздействий.

В зависимости от используемого поля рассматриваются [86] анодные, катодные процессы, а также методы обработки, протекающие при постоянном, импульсном, переменном токе, создающем электромагнитные поля, вызывающие новые воздействия и изменения эксплуатационных свойств изделий

Анализ возможных сочетаний известных нетрадиционных воздействий [86] доказывает, что из них можно спроектировать не менее 800 новых комбинированных процессов, обладающих существенными полезными свойствами. [84]

Электроэрозионная обработка в сочетании с высокочастотными вибрациями успешно применяется в отрасли для формирования турбулизаторов на дне

охлаждающих каналов камер сгорания жидкостных ракетных двигателей [86]. Её достоинством является возможность бесконтактной обработки узких, длинных и сложных по конфигурации каналов жестким электродом-инструментом без нарушения процесса изготовления крупногабаритных деталей малой жёсткости, где механические методы не обеспечивают необходимой однородности микрорельефа и качества поверхностного слоя, нарушают точность мест сопряжения и конечных участков обрабатываемых элементов, требуют трудоемких, нередко ручных, доводочных операций, вызывающих снижение уровня технологичности процессов. Электроэрозионный метод обработки позволяет формировать углубления с контролируемыми параметрами, обеспечивая устойчивость объектов обработки к термоциклическим нагрузкам, минимальное термомеханическое воздействие на конструкцию и высокую воспроизводимость результатов при серийном производстве.

Обработка осуществляется последовательным перемещением электрода вдоль канала с контролем положения по его дну. Выбор режима определяется в соответствии материалом стенок, конфигурацией канала и требуемой шероховатостью. Заключительные операции включают промывку диэлектриком, ультразвуковую очистку, сушку изделия. Для электроэрозионной обработки углублений между турбулизаторами назначают режимы [86] представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Рабочие режимы электроэрозионной обработки

Напряжение, V	Сила тока, А	t_n , мкс	f_n , кГц
80-120	1-8	75-180	2-15

Анализ источников [84;86;88] доказывает, что основными недостатками электроэрозионной обработки являются:

1. Образование дефектного слоя («белого слоя») толщиной 5–20 мкм, который характеризуется повышенной твёрдостью, изменённой микроструктурой, наличием микротрещин и остаточных напряжений. При обоснованном выборе

режимов обработки (таблица 1.3) дефектный слой имеет стабильные характеристики и практически не снижает эксплуатационную надёжность детали. Однако при повышенной энергии разрядов возможно его утолщение и ухудшение эксплуатационных свойств материала, что требует дополнительного контроля и (при необходимости) корректирующей обработки.

2. Значительный износ рабочей части электрода-инструмента, приводит к снижению его производительности из-за периодической правки и удаления изношенных участков, переналадки оборудования, что служит причиной нарушения стабильности процесса обработки.

3. Длительность процесса обработки профильным инструментом соизмерима с трудоемкостью изготовления всей системы охлаждения двигателя.

4. Управление процессом обработки могут осуществляться только через величину углубления, где высота неровностей соизмерима с величиной углубления, которое по [24] может изменяться в узких пределах и не позволяет устойчиво турбулизировать поток.

5. Высокая шероховатость в форме выступов (рисунок 1.8) тормозит перемещение жидкости в донной части углубления, что показано на имитаторе (рисунок 2.4), где поток обтекает углубление по гладкой поверхности канала, создавая слабые завихрения, хотя для требуемой развитой турбулентности необходима поверхность с шероховатостью в углублении не более $Ra=3,2$ мкм.



Рисунок 1.8 – Шероховатость углубления в бронзовой детали после электроэрозионной обработки

Приведённые недостатки удалось частично снизить, выполнив переход на комбинированные методы обработки с электрохимическим воздействием [23,86,99], применив многоэлектродный электрод-инструмент [51;86] и технологичное приспособление при комбинированной многоместной обработке по шаблону [53;54;56;73 и др.]. Для этого потребовалось [86] создание и модернизация технологического оборудования, разработка инструмента, корректировка режимов обработки (решение задачи 2 работы).

Для формирования турбулизаторов был создан и применен специальный станок для эрозионно-химической обработки с трехэлектродной схемой инструмента, приведенный на рисунке 1.9, что в несколько раз (до 2,5-3) повышает производительность, снижает шероховатость каналов, но не решает проблему эффективной обработки турбулизаторов в целом.



Рисунок 1.9 – Экспериментальный станок и технологическая оснастка для комбинированной многоэлектродной обработки углублений в каналах

Экспериментальные исследования, выполненные на предприятии АО КБХА и в ВГТУ [23;77;80], подтвердили, что для обработки углублений в корпусах из бронзовых сплавов допустимы электроды-инструменты из медных сплавов и графитовых композиций, но и они не отвечают многим требованиям заказчиков новых изделий, что требует дальнейших исследований, приведенных в задачах 1;4 работы.

1.3 Возможность создания бесконтактного технологичного инструмента для комбинированного группового метода изготовления элементов турбулизаторов

Основываясь на разделе 1.2.3.2 и таблице 1.2, можно предположить, что наиболее технологичная схема — это комбинированный метод электрохимической обработки углублений по шаблонам. Такие исследования действительно выполнялись, начиная с семидесятых годов, и частично рассмотрены в [14,73]. Они более подробно изучены с участием соискателя в работах [22;23;77;80], а результаты обобщены в патенте [56] и создали научную базу исследований для достижения поставленной в работе цели (решение задачи 2)

Целью изобретения по [56] является снижение трудоемкости и повышение точности изготовления углублений, гарантированное формирование канала с турбулизаторами для протекания электролита, что обеспечивает стабильность процесса, высокую производительность электрохимической размерной обработки и повышенную точность получаемого углубления.

В предлагаемом способе [56] поставленная цель достигается тем, что снаружи вдоль токопроводящего участка на диэлектрическом слое фотоэмульсионного покрытия методом вдавливания вдоль углублений формируют равномерно расположенные выступы из диэлектрического слоя, после чего диэлектрический слой фотоэмульсионного покрытия закрепляют, а шаблон плавно изгибают по форме пазов охлаждающих каналов деталей с обеспечением на боковых границах токопроводящих участков межэлектродных зазоров между диэлектрическим слоем и поверхностью паза.

Конструкция многослойного шаблона отличается тем, что его металлический слой выполнен из пластичного материала с малым удельным электрическим сопротивлением при размещении турбулизаторов с обеспечением увеличенного потенциала выноса тепла охлаждающими средами через оребренные поверхности. Этот принцип был заложен при решении задачи 3 работы.

Авторы [5] построили свои исследования по выносу тепла на базе классических закономерностей [18;33] интенсификации охлаждения через каналы с оребрением при использовании в расчетах параметров газообразных продуктов теплопередачи, определяющих численные значения полученных результатов, сравнение которых с опытными значениями проводилось сопротивлением и толщиной листа не более половины ширины паза охлаждающего канала детали, при этом высота выступов на диэлектрическом слое не менее величины межэлектродного зазора, а наружный радиус скругления шаблона в местах его сгиба не превышает полуразности между шириной паза охлаждающего канала и шириной углубления в пазах. Наиболее близки к рассматриваемому изобретению относится конструкция многослойного устройства [50], применяемого при производстве двигателей летательных аппаратов.

Схожим, так же является конструкция многослойного устройства для электрохимического удаления заусенцев, содержащего металлический слой на слое диэлектрической ленты, и окна по размерам обрабатываемой детали по патенту 2504461 (Бюл. №2, 2014 г.), где диэлектрический и металлический слои плотно прилегают друг к другу, а на металлический слой подается ток, что позволяет удалить припуск на детали за счет анодного растворения током, протекающим между катодом-инструментом и деталью через электролит, протекающим между инструментом и металлическим слоем устройства.

Недостатком устройства является необходимость увеличения межэлектродного зазора на величину толщины металлического слоя шаблона, что снижает точность углублений на детали и производительность обработки, а также использование шаблона одноразовое, что ограничивает его применение в процессе отработки при запуске изделия в серийное производство.

Способ изготовления и конструкцию многослойного шаблона по [56] раскрывает его конструкция на рисунке 1.10, где показаны металлический (1) и диэлектрический (2) слои.

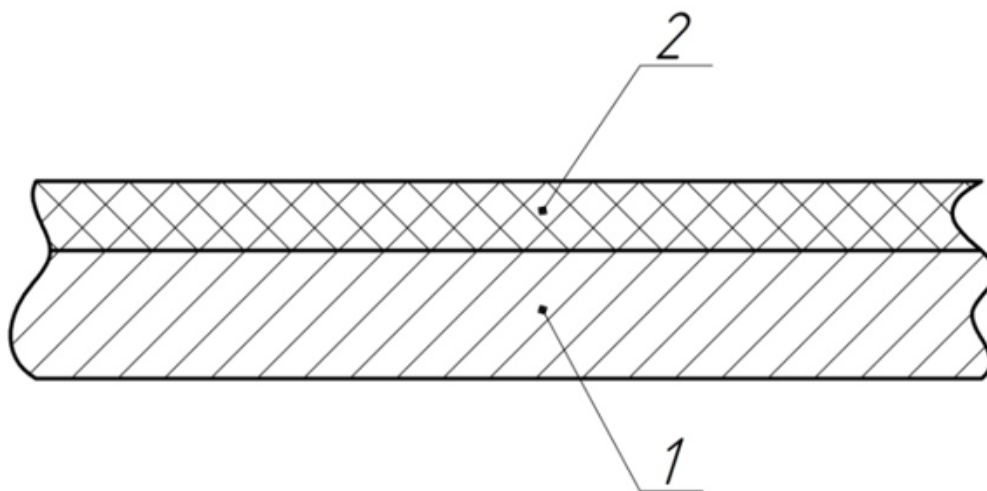


Рисунок 1.10 – Шаблон с металлическим и диэлектрическим слоями

Многослойный шаблон изготавливают и используют в следующей последовательности: выбирают листовой материал (рисунок 1.10) для металлического слоя 1, отвечающего условиям пластичности и малого удельного электрического сопротивления, при этом толщина листа должна быть не более половины ширины паза охлаждающего канала детали. На металлический слой наносят (например, напылением) слой 2 фотоэмульсионного диэлектрического покрытия, на который с реальным размером экспонируют контур поверхности и взаимное положение углублений 3 (рисунок 1.11) на боковой поверхности ребра между пазами 4 на донной части паза и 5 на боковой поверхности с обратной стороны ребра по всей ширине и длине шаблона, после чего проявляют слой фотоэмульсионного диэлектрического покрытия до образования в местах нахождения покрытий токопроводящих участков.

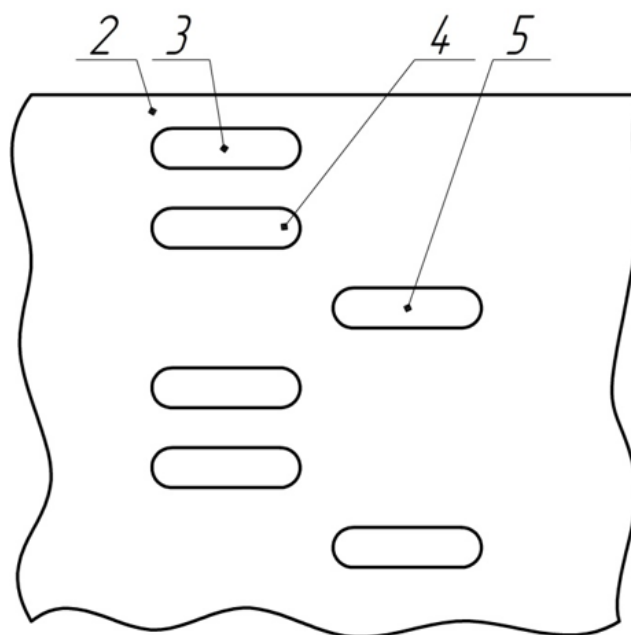


Рисунок 1.11 – Шаблон после нанесения профиля углублений и проявления диэлектрического слоя

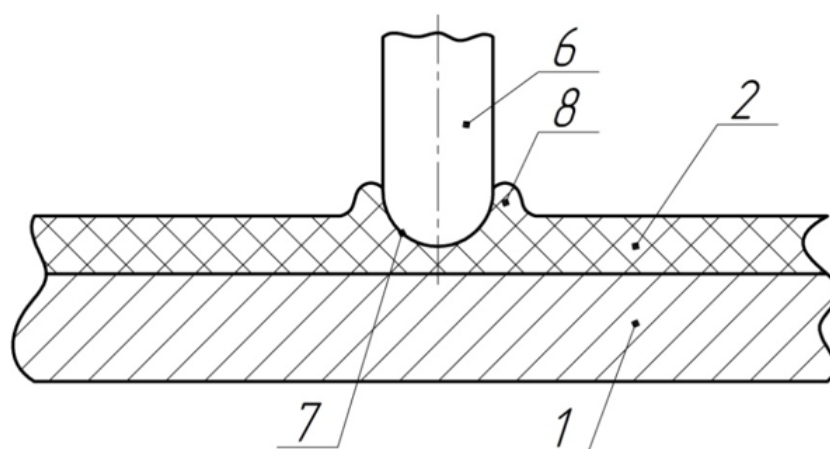


Рисунок 1.12 – Изготовление выступов на поверхности диэлектрического слоя

Затем, (рисунок 1.12) стержнем 6 с закругленным концом 7 выдавливают в слое фотоэмульсионного диэлектрического покрытия выступы 8, высота которых не менее величины межэлектродного зазора при электрохимической размерной обработке.

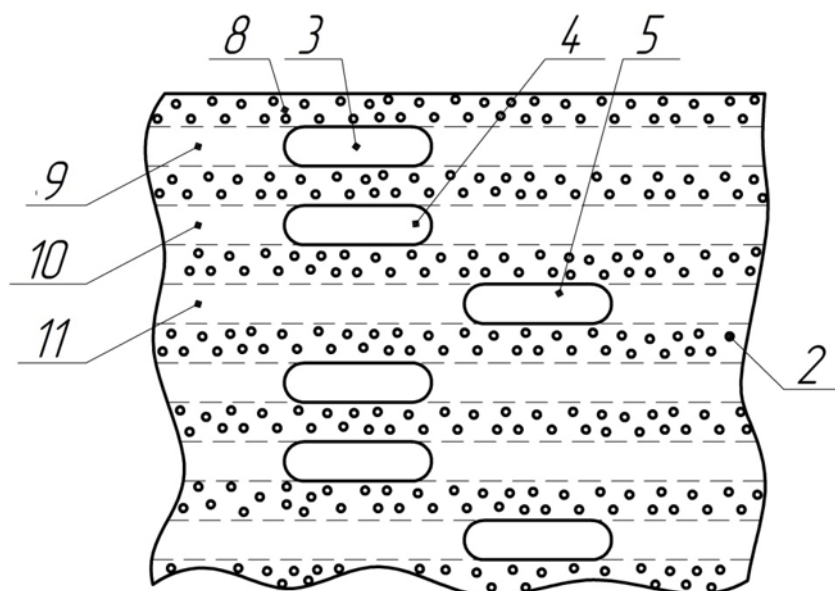


Рисунок 1.13 – Карта размещения выступов на диэлектрическом слое

На рисунке 1.13 показано, что выступы 8 размещены по обе стороны углублений 3; 4; 5 с образованием между ними гладких участков 9; 10; 11 вдоль пазов для протекания электролита при электрохимической размерной обработке. Слой 2 фотоэмульсионного диэлектрического покрытия закрепляют на металлическом слое 1 (рисунок 1.10) путем нагрева по технологии, приведенной в [73]

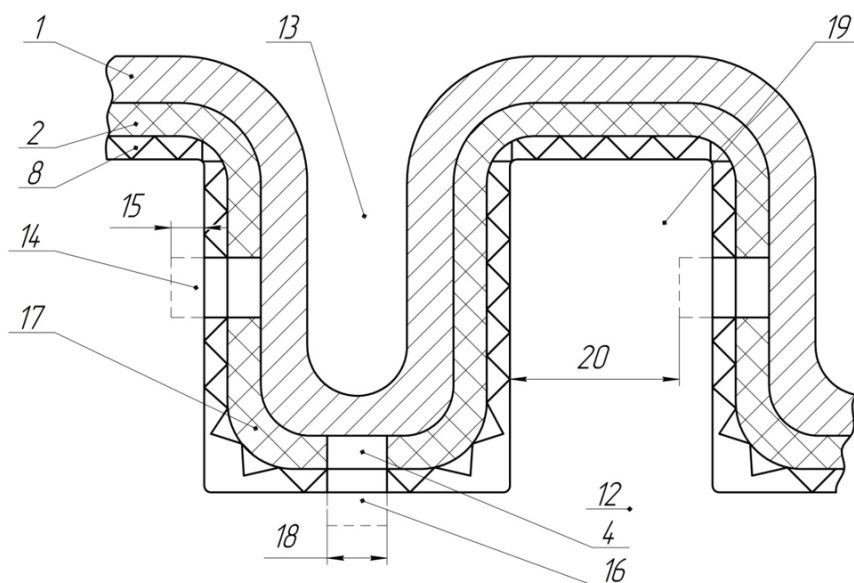


Рисунок 1.14 – Схема формирования шаблона и размещения его в канале детали

По готовой детали 12 (рисунок 1.14) или по ее макету изгибают плоский шаблон так, чтобы слой 2 фотоэмульсионного диэлектрического покрытия находился снаружи шаблона, а его профиль на токопроводящих участках 3;4 (рисунок 1.13) слоя без диэлектрического покрытия повторял поверхность пазов 13 детали 12. При этом места нахождения углублений 14; 16 должны находиться напротив токопроводящих участков 3;4 слоя диэлектрического покрытия, а наружный радиус 17 скругления шаблона в месте его изгиба не превышал полуразности между шириной паза 13 охлаждающего канала детали 12 и шириной углубления 18 в пазе, служащем в дальнейшем каналом для течения охлаждающей жидкости. Для сохранения прочности и жесткости ребра 19 между пазами 13 углубления на противоположных сторонах ребра 19 выполняют со сдвигом между углублениями 3; 5 вдоль паза, как показано на рисунке 1.11. При этом толщина 20 ребра 19 (рисунок 1.14) везде имеет снижение толщины ребра 19 не более, чем на величину углубления с одной его стороны.

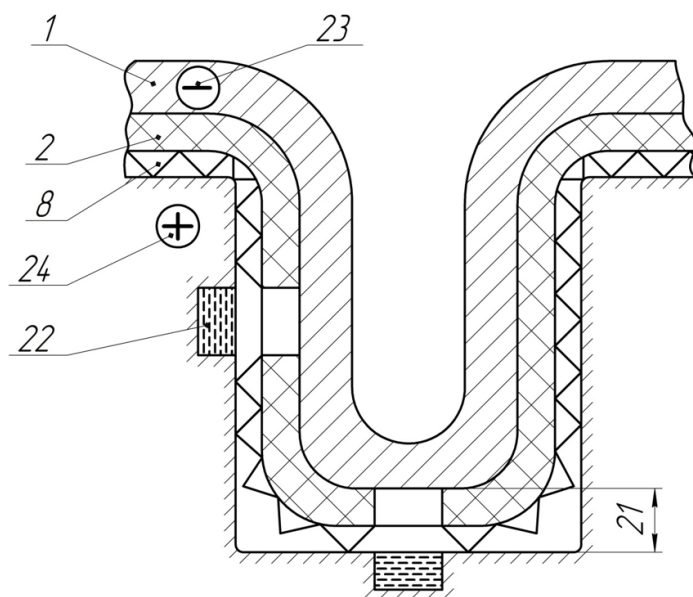


Рисунок 1.15 – Схема получения углублений по шаблону с получением турбулизатора

При использовании шаблона на оборудовании для электрохимической размерной обработки (рисунок 1.15) его устанавливают в пазе, как показано на

рисунке 1.13 с созданием за счет выступов 8 межэлектродного зазора 21 (рисунок 1.15), через который протекает электролит 22. Металлический слой 1 (рисунок 1.10) шаблона подключают к отрицательному полюсу 23 (рисунок 1.15) источника постоянного тока, а деталь к положительному полюсу. Режимы электрохимической размерной обработки назначают по [86]. После анодного растворения углублений деталь снимают со станка, удаляют шаблон, после чего контролируют место и размеры углублений.

Применение патента [56] позволило обосновать пути решения второй задачи работы и выполнить требования к перспективным системам охлаждения создаваемых ракетных двигателей многоразового использования. Приведённый материал послужил прототипом для создания нового патента соискателя.

1.4 Пути интенсификации выноса тепла охлаждающими средами

Расчет диэлектрического шаблона позволяет обосновать положение и форму сквозных отверстий в шаблоне, чтобы интенсифицировать охлаждение из каналов, в которых должны быть изготовлены турбулизаторы, определяющие характер течения охлаждающей жидкости. Условия протекания через турбулизаторы в каналах при теплоотводе имеют существенные отличия относительно течения над шаблоном, поэтому требуется его доработать с учетом требований к турбулизаторам в каналах корпуса изделия. Ранее размещение таких элементов охлаждения выполняли по результатам многократных экспериментальных исследований, что создавало большие трудности при расчете и изготовлении шаблонов.

Результаты расчетов, приведенных в [5] с использованием программного комплекса ANSYS CFX при сложносопреженном теплообмене через турбулизаторы оребренной стенки, показали, что даже при интенсивной работе турбулизаторов фактическая эффективность оребрения заметно ниже расчетной, что доказывает необходимость поиска новых путей, в том числе технологических, для интенсификации выноса тепла в создаваемых теплонапряжённых машинах. К

ним следует отнести научно обоснованное расположение и количество турбулизаторов, подтверждение которых рассмотрено в последующих главах работы, где приводятся результаты расчетного исследования и намечаются пути повышения интенсивности охлаждения при обоснованном применении турбулизаторов, что показано при решении поставленных в работе технологических задач.

1.5 Уровень достаточности имеющегося задела по теории и практике технологического обеспечения для решения поставленных задач

Объем рассмотренных материалов позволяет утверждать, что принятые во внимание ранее выполненные исследования могут служить базой для решения поставленных задач, позволяющих достичь цели выполняемой работы.

Решаемые задачи являются развитием научного направления по интенсификации теплообмена. Они решают проблемы, актуальные в современном ракетном двигателестроении: управление процессом формообразования углублений рекомендуемой геометрии, корректировки размещения турбулизаторов на донной части и боковых поверхностях в минимально необходимых количествах, обеспечивающих требуемый характер течения жидкой охлаждающей среды. Реализуется возможность одновременного получения всех углублений на поверхностях канала, решающих проблему многократного сокращения трудоемкости операции по изготовлению турбулизаторов, появляется возможность устранения необходимости доработки мест сопряжения профиля по длине прямолинейного, наклонного и винтового охлаждающего канала, стало возможным многократное использование шаблона, повышающее технологичность электрода-инструмента, и быстрая переналадка процесса на аналогичную операцию

Анализ состояния вопроса показал, что предлагаемый способ комбинированной обработки по шаблону находит применение в опытном и серийном производстве, но его результативность зависит от обоснованного

решения поставленных задач. При этом требуется создание нового электрода-инструмента, содержащего элементы научной новизны, где оптимальным может быть метод электрохимической обработки сборным технологичным неподвижным электродом-инструментом, позволяющим получать турбулизаторы с углублениями различного профиля одновременно на протяженном участке канала без переналадки режимов и процессов оборудования, что решает актуальную проблему сокращения затрат на серийное производство ракетных систем при многократном их использовании.

Глава 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ, ПУТИ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ В РАБОТЕ ЗАДАЧ

2.1 Рабочие гипотезы

Для достижения цели работы требуется решение задач, научный задел по которым рассмотрен в главе 1 работы. С целью оценки уровня значимости и выбора оптимального решения задач требуется ограничить количество применяемых вариантов исследований с использованием выдвинутых рабочих гипотез:

1. В результате анализа процессов, протекающих при теплообмене через жидкость в каналах с турбулизаторами, и в случае действия механизма тепло- и массовыноса продуктов при комбинированной электрохимической обработке электродом-инструментом по многоместному шаблону установлена общность технологических приемов, действующих механических и физико-технических воздействий, позволяющих в основу расчета конструкции электрода-инструмента и гидравлических параметров течения жидкости включать положения теории подобия, где базой для сравнения и совершенствования профиля сквозных отверстий в шаблоне служат ранее выполненные углубления, образующие турбулизаторы, форма которых при расчете переносится на сквозные отверстия в шаблоне.

2. Одним из путей интенсификации охлаждения жидкой средой является расчетная или экспериментальная карты изменения температуры в районе расположения турбулизаторов, по которой возможно спроектировать и изготовить индивидуальный шаблон электрода-инструмента, пригодный для многократного использования, совершенствования формы методом теплового нагрева и корректировки формы в катодном устройстве.

3. Возможно совершенствование выбора места положения сквозных отверстий в шаблоне по результатам измерения уровня турбулизации в каналах при

условиях течения охладителя, полученных на имитаторе после уточнения технологических режимов комбинированной обработки по шаблону.

4. Технологические режимы комбинированной обработки по шаблону для течения охлаждающих сред над углублениями на различных поверхностях каналов можно принять за базу для назначения рабочих режимов многоместной обработки.

5. Управление течением рабочей среды через межэлектродный зазор можно производить изменением давления охладителя в корпусе камеры сгорания до получения рабочей величины, обеспечивающей по всему периметру сечения потока свободное стекание жидкости на выходе из электрода-инструмента.

6. Для выравнивания условий течения рабочих сред через межэлектродный зазор в электроде-инструменте могут быть использованы имеющиеся в зоне охлаждения корпуса кольцевые проточки, как составные части, объединяющие каналы с различной геометрией и расположением турбулизаторов. Характер течения рабочих сред служит индикатором эффективности охлаждения и определяет место расположения углублений турбулизаторов, необходимость в дополнительных средствах охлаждения, корректировки количества, размеров формы отверстий в шаблоне электрода-инструмента.

7. При обосновании длины, ширины турбулизаторов и размеров электродов-инструментов в зоне течения охладителя площадь активной зоны теплообменной части элемента можно считать у всех углублений в сечении электрода-инструмента одинаковыми при любом количестве турбулизаторов и местах их размещения. Последнее ускоряет перенастройку электродов инструментов при переходе на новые виды изделий с другой системой охлаждения их горячей части.

8. Хотя вязкость жидкости изменяется в зависимости от температуры для рабочей среды при комбинированной обработке всех углублений, возможно принять в расчетах этот показатель единым по всем элементам трафарета, т.к. имеющиеся в корпусе кольцевые проточки выравнивают в электроде-инструменте температурный режим по всему межэлектродному зазору независимо от изменения просвета в допустимых пределах для комбинированной обработки по шаблону.

Принятые рабочие гипотезы позволяют обеспечить исследовательскую и испытательную базу с учетом имеющейся материальной базы, необходимости изготовления экспериментального оборудования (например, имитаторов процесса течения рабочей и охлаждающей среды), создают требования к выбору начальных условий при моделировании процесса обработки и расчету сборного электрода-инструмента.

2.2 Исследовательская и испытательная база

На этапах выполнения исследований по решению, поставленных задач проверка теоретических результатов выполнялась на экспериментальной и производственной базе АО Конструкторское бюро химавтоматики и на экспериментальных установках кафедры «Технология машиностроения» ВГТУ. При использовании исходных условий для проектирования шаблона в разработанном электроде-инструменте применялись сведения, полученные при испытании и приёмочных мероприятиях на стендах предприятия, работающих на огневых режимах, где объектом исследований являются сами изделия или их макеты.

2.2.1 Установки для комбинированной электрохимической обработки по шаблону

Для подтверждения теоретических изысканий и решения поставленных в работе задач был создан новый, защищенный авторскими свидетельствами и патентами станок [47;49]. Это специальный полуавтомат с адаптивной системой управления, приведённый на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Опытно-промышленный станок для комбинированной электрохимической обработки по шаблону

Рассматриваемая группа объединяет большое число электрохимических станков, общим признаком которых является отсутствие перемещения электродов в процессе обработки. Взаимные перемещения агрегатов, как правило, выполняют функции приведения электродов в рабочее положение или транспортирования заготовок между позициями станка. Вид операций ЭХРО (скругление кромок, контурная обработка) определяет конструкцию катода и режимы работы.

Технические характеристики данного станка представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики станка

Габариты обрабатываемых образцов и деталей, мм	от 10x10x10 до 100x100x100
Напряжение сети, В	380 ⁺³⁸ ₋₃₈
Давление в сети сжатого воздуха, МПа (кг/см ²)	от 0,4 (4,0) до 0,6 (6,0)
Регулируемое выходное напряжение холостого хода, коммутируемое источником питания ИПЭ901, В	6, 9, 12, 15, 18
Технологический ток, а	не более 600
Давление электролита, МПа	не более 0,4
Точность углового позиционирования, угл. мин.	±5
Габаритные размеры (ширина, длина, высота), мм	не более
1) станка	700x700x1800
2) источника питания	650x500x1050
3) гидроагрегата	1000x1800x1385
Масса, кг	не более
1) станка	300
2) источника питания	250
3) гидроагрегата	250
Потребляемая мощность (макс), кВт	12
Время настройки рабочего режима, мин	не более 15
Продолжительность непрерывной работы, в часах	не менее 8
Максимальное время позиционирования, сек	не более 5
Диапазон получения углублений (мм) при гарантированной точности размеров	
по 11 качеству	от 0,05 до 0,15 мм
по 12 качеству	от 0,15 до 0,3 мм
по 14 качеству	от 0,4 до 0,8 мм

Аналоги станка, приведённого на рисунке 2.1, выпускались по заказам предприятий машиностроения страны и ряда зарубежных стран по серийной технологии. Схема такого станка приведена на рисунке 2.2. Его станина

выполнялась гибкой листа толщиной 5 мм из нержавеющей стали, устойчивой к действию концентрированных солевых растворов. Рабочая камера имела герметичное уплотнение с возможностью создания избыточного давления и вакуума. Для сбора отработавшего электролита в нишу станка устанавливается съемная ванна из нержавеющей стали, стойкая к воздействию электролитов с большим содержанием агрессивных солей. Ток подается от многодиапазонного генератора, вынесенного из станка и управляемого с учетом сигналов систем регулирования и настройки технологических режимов.

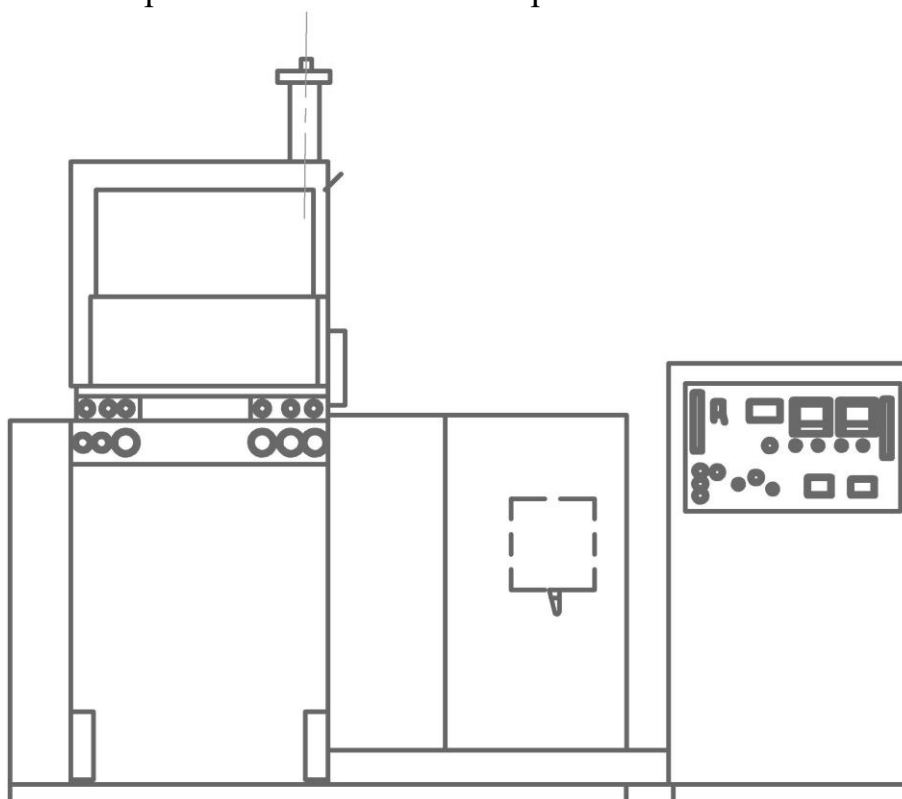


Рисунок 2.2 – Конструктивная схема станка

Автоматизация станка на рисунке 2.2 выполняется за счет использования микропроцессорного управления, в частности для получения по шаблонам индивидуальных и групповых углублений с требуемым шагом и глубиной, отвечающих размерам и положению турбулизаторов систем охлаждения в пазах горячей части изделия. Управление работой и настройкой станка осуществляют от микропроцессорной системы по созданному варианту машинной программы, в которую при необходимости вносятся изменения. Программа, написанная в кодах

микропроцессора предназначена для управления работой станка в трех режимах: ручном, полуавтоматическом и автоматическом.

Одной из операций, реализуемой на станке, является разделение заготовок на образцы, выполняется в ручном режиме, в основном для вырезания сквозных отверстий в шаблоне, для чего в станке предусмотрена съемная головка с режущим электроабразивным диском. Общее управление режимами обработки происходит автоматически.

В полуавтоматическом режиме технологические операции осуществляются по командам непосредственно от кнопок и переключателей пульта микропроцессорной системы управления. По этим командам могут выполняться перемещения стола по осям x и y на заданный размер и с различной скоростью, включение электрода-инструмента, подача напряжения и электролита.

В автоматическом режиме вначале происходит перемещение стола в исходное положение, в точку, т.е. до момента срабатывания концевых выключателей, далее автоматически производятся подача стола к месту обработки, подача рабочей жидкости, контроль состояния системы, включение тока, подаваемого на электрод-инструмент. Процесс заканчивается после отработки шаговыми двигателями заданного пути, устанавливаемого на пульте управления. При этом отключаются все технологические операции, стол приводится в исходное положение по оси x . После перемещения стола вдоль оси y на шаг, заданный на наборнике, технологический процесс повторяется необходимое количество раз.

В программах ручного, автоматического и полуавтоматического управления станком используют библиотеку подпрограмм управления приводом станка, ввода данных с переключателей, наборников, кнопок пульта стойки микропроцессорной системы.

В состав станка входит полуавтоматический блок с адаптивной системой управления, конструкция которого защищена патентами и авторскими свидетельствами. При всех вариантах работы станок обеспечивает широкий диапазон режимов обработки в том числе по шаблону, автоматическое запоминание вариантов и режимов процесса.

Ограничением использования опытного станка в качестве экспериментальной установки являются габариты рабочей части зоны обработки по шаблону и сложности ручной настройки при переменном положении сквозных отверстий в съемном диэлектрическом шаблоне. В промышленном варианте комбинированной установки (рисунок 2.3) эти ограничения должны приниматься во внимание только в серийном производстве, и в период настройки учитываться при выборе заготовок с габаритами, не превышающими рабочей части установки, а также в случае возможности упрощения настройки технологических режимов при обработке с неподвижными электродами на имитаторе и испытании параметров на макете корпуса камеры сгорания отдельно или совместно с реактивным соплом



Рисунок 2.3 – Установка для комбинированной обработки углублений, формирующих турбулизаторы в охлаждающих пазах изделий

2.3 Научная база работы.

Имитатор на рисунке 2.4 выполнен по патенту [46] и предназначен для определения параметров течения жидкой среды при выборе режимов комбинированной обработки для получения геометрии турбулизаторов, требующихся для интенсификации охлаждения теплонапряжённых деталей.

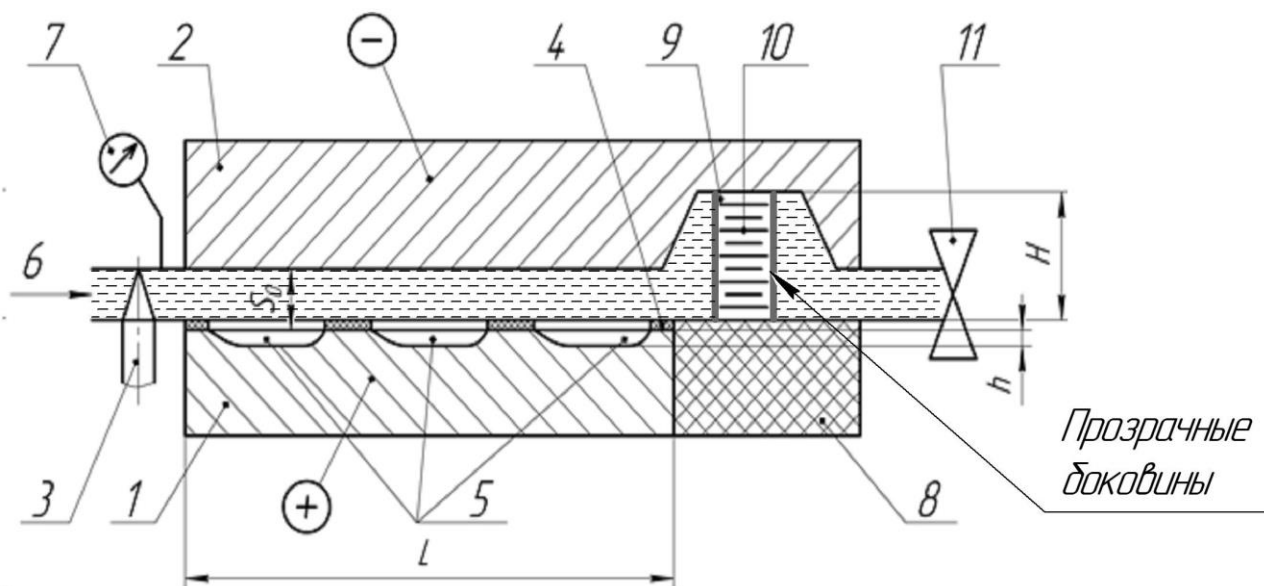


Рисунок 2.4 – Схема имитатора для назначения гидродинамических параметров процесса получения геометрии турбулизаторов, требующихся для интенсификации охлаждения теплонапряжённых деталей

1 – съемная часть имитатора, служащая анодом; 2 – электрод-инструмент; 3 – регулируемый упор, аналогичный диэлектрическим регуляторам межэлектродного зазора (S_0); 4 – шаблон из диэлектрика, для управления электрическим полем в зоне анодного растворения углублений 5; 6 – электролит, поступающий в зазор S_0 ; 7 – манометр для измерения давления электролита на входе в межэлектродный зазор; 8 – диэлектрическая вставка на аноде 1; 9 – участок измерения газовой составляющей (шкала 10) в рабочей среде после выхода ее из зоны обработки; 11 – вентиль для регулирования скорости потока и газонаполнения электролита 6

Выполнение исследований с использованием имитатора выполняется в следующей последовательности: из металла исследуемой охлаждаемой детали, в нашем случае корпуса камеры сгорания или реактивного сопла, выполняют анод 1, который представляет собой пластину из металла, используемого в охлаждаемой детали изделия, с длиной и формой, повторяющей (при необходимости) фрагмент формы индивидуального охлаждаемого участка канала изделия. Электрод-инструмент 2 содержит регулирующие выступы-упоры 3 в шаблоне, имитирующие начальный межэлектродный зазор при изготовлении по шаблону углублений в каналах охлаждения. Шаблон изготовлен из гибкой пленки 4 и установлен на катодном устройстве с охватом поверхности катода 2. В шаблоне выполнены сквозные отверстия, противолежащие углублениям 5 в местах растворения анода 1. Параметры локальных углублений 5 указываются разработчиком и выполняются на заданную глубину за счет анодного растворения металла анода 1, контролируемого, например, по времени обработки и управляемого положением электрода-инструмента 2, регулируемого упорами 3 для настройки начального зазора S_0 . При необходимости они корректируются по результатам испытаний для полученного варианта их расположения на шаблоне. На боковых поверхностях электрода-инструмента 2 закреплены прозрачные боковины, плотно прижимающие диэлектрический шаблон 4 к боковым поверхностям ребер канала. Электролит 6 прокачивают под давлением через межэлектродный зазор S_0 вдоль анода 1. Давление измеряют манометром 7 на входе электролита в зону обработки анода и электрода-инструмента 2. На выходе электролита 6 из зоны обработки на аноде 1, на его обрабатываемой поверхности установлена диэлектрическая вставка 8, противолежащая участку 9 электрода-инструмента 2 с расширением межэлектродного зазора S_0 на высоту, равную высоте охлаждающего канала в изделии. На выходе из канала установлен вентиль 11, посредством которого может регулироваться давление и гидравлическое сопротивление исследуемого участка канала с углублениями перед турбулизаторами в охлаждаемом изделии.

Через прозрачные боковины над диэлектрической вставкой можно наблюдать за съемом металла с анода в местах локальных углублений. На

прозрачных боковинах участка 9 находится шкала 10, с равномерным разделением высоты газовой составляющей в межэлектродном зазоре на равные части. По известному соотношению давлений охлаждающей среды в каналах изделия, вентилем 11 устанавливают аналогичное соотношение в имитаторе, опираясь на значения манометра 7. Если наблюдается снижение съема по длине анода, то вычисляют требуемое изменение зазора S_0 и регулируемыми упорами 3 устанавливают его пропорционально величине углубления турбулизатора. При испытаниях на заложенных в имитаторе режимах обработки не всегда удаётся достичь соотношения жидкой и газовой фазы, формирующейся в охлаждающих системах изделия. В этом случае следует дополнительно подать в зазор под давлением воздух, чтобы привести состояние межэлектродного зазора в соответствие с условиями протекания процесса при комбинированной обработке с анодным растворением припуска. Следует учитывать, что по [43] в системе жидкостного охлаждения допустимое соотношение газообразной фазы к высоте H не может быть более 64%, иначе при электрохимической размерной обработке возможно заклинивание канала и нарушение теплообменной системы испытуемого изделия. Это не желательно, поэтому в охлаждающих каналах газонаполнение не превышает 50%. Для этих условий фиксируют величину давления на входе электролита по манометру и используют ее величину при расчете параметров углублений в охлаждающих каналах изделия с геометрией, аналогичной заложенной разработчиком в испытуемом изделии, если выбранное давление электролита на входе в зазор S_0 больше используемого для охлаждающей среды в каналах изделия (что практически маловероятно), то требуется корректировка на имитаторе величины зазора S_0 , путём регулировки упора 3.

Результаты испытания гидравлической системы охлаждения на имитаторе позволяют уточнить положения физической модели механизма тепло-массовыноса, создать перспективную систему гидродинамического охлаждения и установить требуемые технологические режимы электрохимического процесса обработки. Материал испытаний на имитаторе является научно обоснованным

подтверждением теоретических выкладок, полученных при моделировании процессов изготовления турбулизаторов.

При решении задач 1;2 работы использовались материалы патента на изобретение №119663 [46] «Способ изготовления и шаблон для электрохимического получения углублений в пазах охлаждающего канала детали», направленный на повышение точности группового получения отверстий при одновременной прошивке несколькими электродами-инструментами. К его недостаткам следует отнести отсутствие возможности получения углублений профильными инструментами на боковых поверхностях охлаждающих каналов, что в этом случае делает способ и устройство нетехнологичными и пригодными для ограниченного количества вариантов выполнения углублений, что не позволяет достичь требуемого интенсивного охлаждения теплонагруженной зоны изделия.

Известен патент на изобретение №2625378 [55] «Способ групповой прошивки отверстий и устройство для его реализации», направленный на преодоление заклинивания потока, отличающийся тем, что способ изготовления шаблона требует нанесения на него диэлектрического фотоэмульсионного покрытия с трудоемким и не всегда доступным процессом проявления, нагрева и закрепления его на участках шаблона без возможности повторного использования, а выступы на нем не связаны с положением шаблона и токопроводящих участков, что не позволяет эффективно воздействовать на поток жидкости с целью достижения требуемой интенсификации охлаждения детали и получить технологичный метод обработки углублений, формирующих турбулизаторы.

Для решения задачи 1 были учтены сведения из патента на изобретение 2568404 [53] «Способ изготовления шаблона из эластичного гибкого листового диэлектрического материала для электрохимической размерной обработки», где для изготовления углублений в донной части узких пазов в каналах достигается получение переменной ширины сквозных окон в шаблоне путем приложения растягивающих сил к концам шаблона. К ограничениям его использования при решении поставленных в работе задач относится отсутствие возможности

регулирования ширины сквозных отверстий (окон) при криволинейном положении шаблона в канале, невозможность получения углублений на боковых поверхностях ребер шаблона, куда не удастся подвести средства натяжения и получить требуемые размеры углублений для построения турбулизаторов, ограничивая этим область использования способа по охлаждению теплонапряженных деталей машин

При подготовке заготовки для изготовления турбулизаторов в процессе нарезания пазов использовались материалы по патенту RU 2041029 C1 «Прорезная или отрезная дисковая фреза», где инструмент выполнен в виде дисковой фрезы с конструкцией из двух дисков с зубьями противоположного направления, установленных на общей оси с совпадением или со сдвигом вершин зубьев, предназначенный для обработки материалов резанием, включая прорезку пазов и отрезку деталей, преимущественно в узких пазах и в труднообрабатываемых заготовках.

Недостатком данного устройства является разделение стружки на части, которое при обработке вязких сталей и сплавов приводит к налипанию и наволакиванию стружки на режущие кромки, а также повышенный риск деформации или поломки инструмента в узких пазах и при обработке тонких заготовок из-за концентрации напряжений в зонах сложной геометрии зубьев.

Известно устройство по патенту RU 2454301 «Сборная фасонная фреза» (авторы Гречишников В.А., Чулин И.В., 2012 г.), относящееся к области машиностроения и предназначенный для обработки на фрезерных станках наружных и внутренних профилей сложной конфигурации, содержащее корпус с пазами и установленные в них оправки в виде реек с режущими пластинами, образующими единую линию профилирования обрабатываемой поверхности.

Недостатками указанной фрезы являются высокая трудоемкость изготовления и сборки из-за необходимости обеспечения высокой точности базовых поверхностей и механизмов позиционирования, увеличение себестоимости вследствие использования дополнительных элементов, а также снижение точности обработки и стойкости инструмента при интенсивной

эксплуатации и обработке сложных профилей, негативное влияние ошибок при сборке и настройке на точность получаемого профиля.

Для повышения технологичности системы подготовки каналов охлаждающих систем с учетом ограничений, приведенных выше в аналогичных патентах, подготовлена с участием соискателя заявка на изготовление каналов под создание турбулизаторов систем охлаждения теплонапряженных машин (Заявка №2026115234 от 19.05.2026, «Способ получения сложнопрофильных трактов охлаждения камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя и инструментальный блок для его осуществления»).

Наиболее близким к заявляемому техническому решению является способ механической обработки глубокого отверстия в трубной заготовке по патенту RU 2702214 С1 «Способ механической обработки глубокого отверстия в трубной заготовке» (авторы Санинский В.А., Нестеренко Е.Н., 2019 г.), в котором для совмещения операций растачивания, протягивания и дорнования используется комплект дисковых модульных фрез, установленных на борштанге с заданным расстоянием между фрезами и с ориентацией под малым углом к оси обрабатываемого изделия.

Недостатками указанного способа является удорожание операции из-за повышенных требований к точности установки и жесткости технологической системы, сложность настройки комплекта фрез, а также ограничения по геометрии обрабатываемых каналов, что снижает область использования предлагаемого устройства и затрудняет применение способа для получения сложнопрофильных трактов охлаждения оболочек камер сгорания жидкостных ракетных двигателей.

Технической задачей изобретения является создание эффективного способа получения сложнопрофильных трактов охлаждения оболочки камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя и специального инструментального блока для его осуществления, обеспечивающих обработку каналов по всей длине изделия с заданными в конструкторской документации параметрами толщины ребер и величины углублений.

Техническим результатом, достигаемым при реализации способа, является получение качественного поверхностного слоя ребер и каналов трактов охлаждения и обеспечение стабильного профиля каналов по длине оболочки за счет предварительного расчета геометрических параметров обработки и использования инструментального блока, представленного в виде блока взаимосвязанных дисковых фрез с заданной шириной режущей части.

Сущность способа получения сложнопрофильных трактов охлаждения оболочки камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя заключается в том, что механическую обработку ребер и канавок трактов охлаждения осуществляют комплектом дисковых фрез, сформированных в инструментальный блок, при этом предварительно рассчитывают по предлагаемой в работе методике толщину установочного кольца и ширину режущей части фрез с учетом допуска на толщину ребер, находят глубину каналов и изменение диаметра оболочки по длине, а также при необходимости выполняют финишную обработку участков типа «косынок» фрезой со специально разработанной и рассчитанной шириной режущей части и прямолинейного участка режущей кромки.

Сущность инструментального блока для осуществления способа заключается в том, что он выполнен в виде комплекта дисковых фрез, установленных на оправке и связанных между собой по оси установочным кольцом рассчитанной толщины, при этом дисковые фрезы имеют ширину режущей части и допуски, выбранными по меньшему значению ширины каналов, при этом по меньшей мере одна фреза имеет прямолинейный участок режущей части с длиной, обеспечивающей перекрытие ширины «косынок» при обработке со стороны меньшего и большего диаметров оболочки.

Сущность изобретения и последовательность осуществления способа поясняется чертежами. На рисунке 2.5 показан общий вид оболочки камеры сгорания с каналами охлаждения.

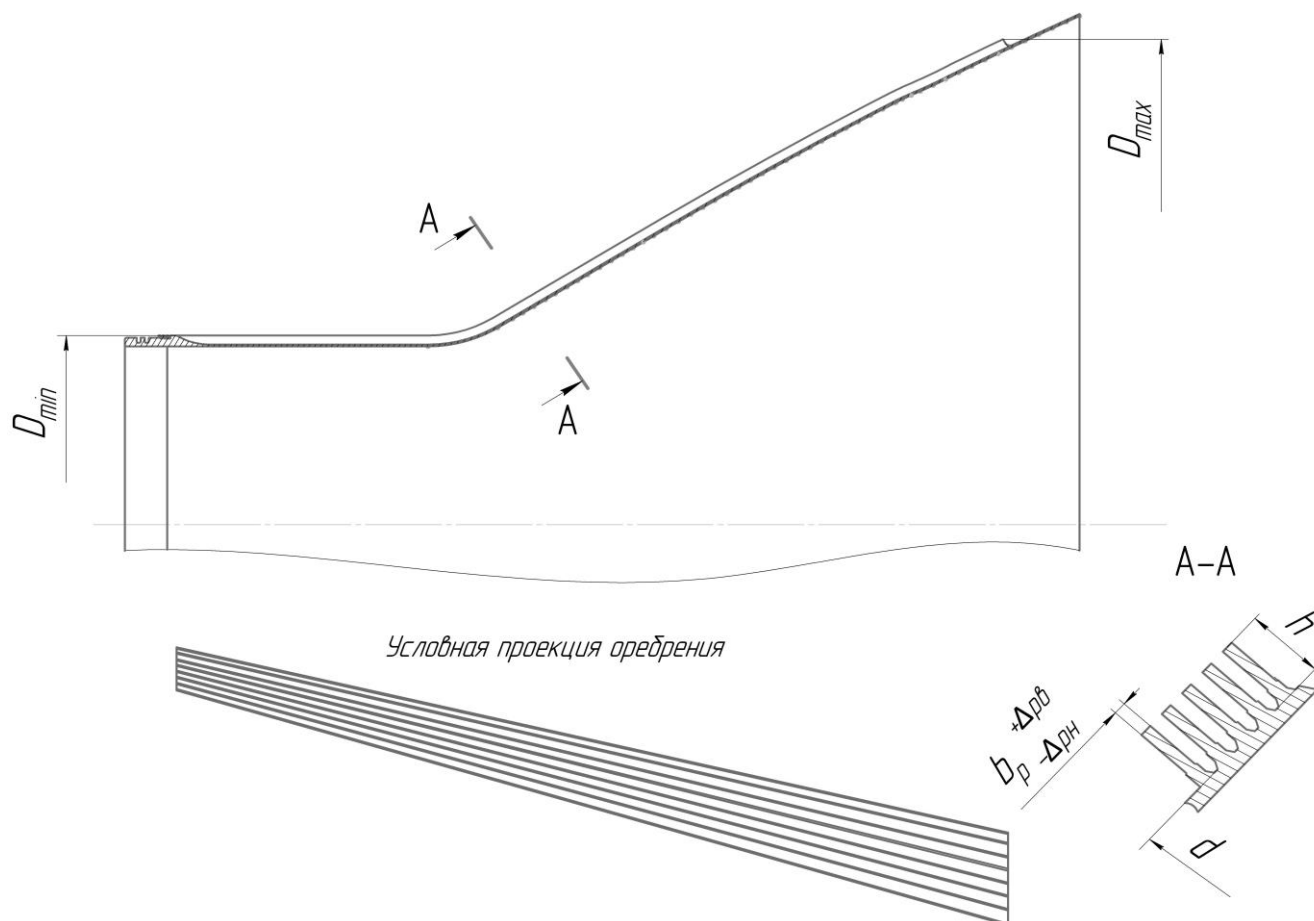


Рисунок 2.5 – Наружная оболочка камеры сгорания ракетного двигателя

В описании и на рисунках приняты следующие обозначения:

D_{min} – диаметр с меньшей стороны наружной оболочки;

D_{max} – диаметр с большей стороны оболочки;

b_p – номинальное значение толщины ребра;

Δp_b – верхний допуск толщины ребра;

Δp_n – нижний допуск толщины ребра оболочки;

h – глубина каналов;

d – диаметр по донной части каналов;

P_t – торцевой шаг между ребрами;

P_n – нормальный шаг между ребрами;

β – угол наклона канавок оси оболочки;

V_n – ширина канала;

l – расчётная толщина установочного кольца;

Δl – допуск толщины установочного кольца;
 s – ширина режущей части дисковой фрезы;
 Δs – допуск ширины режущей части фрезы;
 s_k – ширина режущей части фрезы для обработки «косынок»;
 $R_{\max}$ – максимальный радиус скругления фрезы;
 c – длина прямолинейного участка режущей части фрезы;
 Δ – прямолинейный участок режущей части фрезы, перекрывающий осевую линию канала;
 R – радиус фрезы;
 t – ширина необработанного участка оболочки - «косынки».

На рисунке 2.6 приведен инструментальный блок/

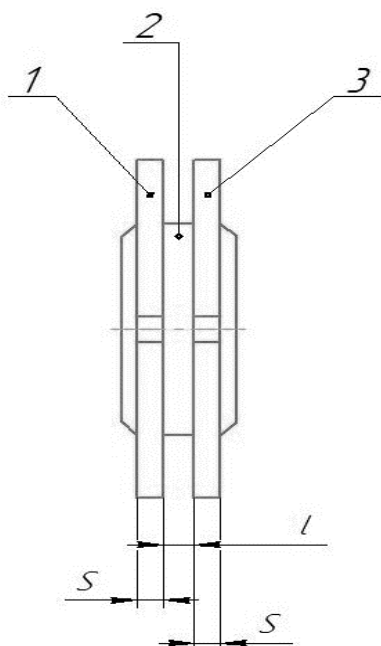


Рисунок 2.6 – Структура инструментального блока, предлагаемого в заявке
 s – толщина фрезы, l – толщина установочного кольца, 1 – фреза, 2 – кольцо установочное, 3 – фреза

Рисунок 2.7 описывает способ обработки ребер.

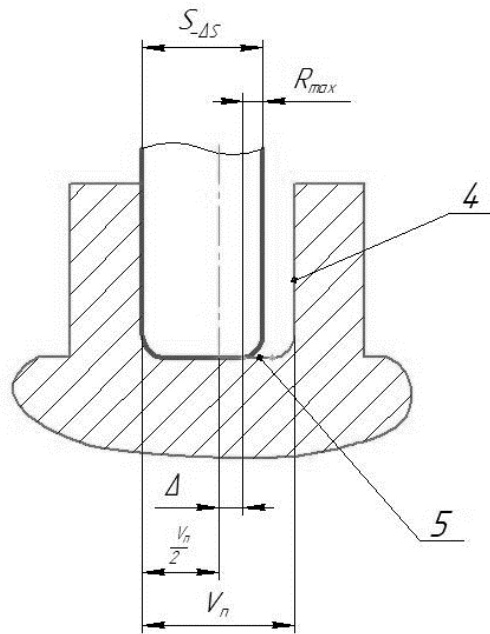


Рисунок 2.7 – Схема обработки ребер оболочки

V_n – ширина канала; Δ – прямолинейный участок режущей части фрезы, перекрывающий осевую линию канала; R_{max} – максимальный радиус скругления фрезы; s – ширина режущей части дисковой фрезы; Δs – допуск ширины режущей части фрезы.

4 – ребро, 5 – канал

Рисунок 2.8 поясняет размещение каналов и ребер в системе охлаждения

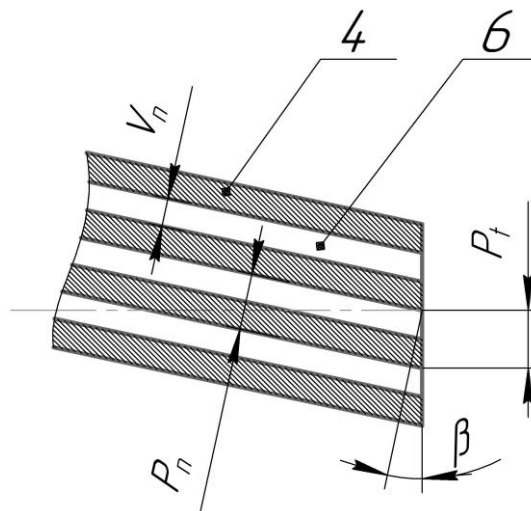


Рисунок 2.8 – Схема расположения ребер и каналов

4 – ребро, 6 – впадина;

На рисунке 2.9 показана рассчитываемая ширина режущей части фрезы при обработке со стороны меньшего диаметра оболочки.

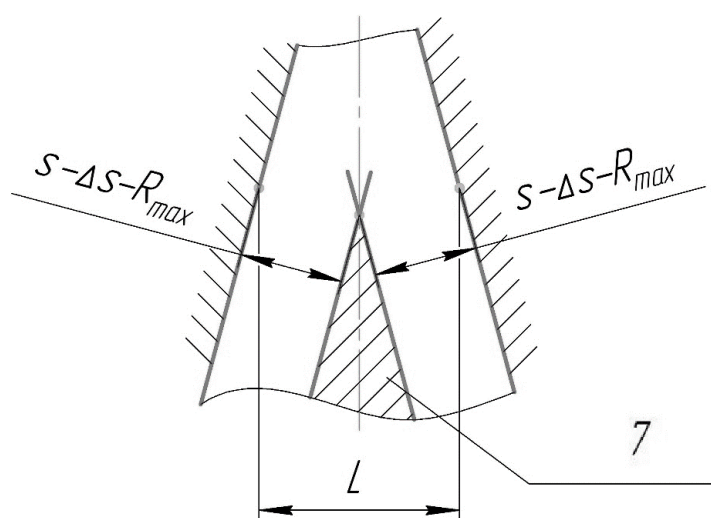


Рисунок 2.9 – Схема для определения ширины режущей части фрезы

7 – косынка

На рисунке 2.10 дан общий вид режущей части фрезы для обработки участков типа «косынок».

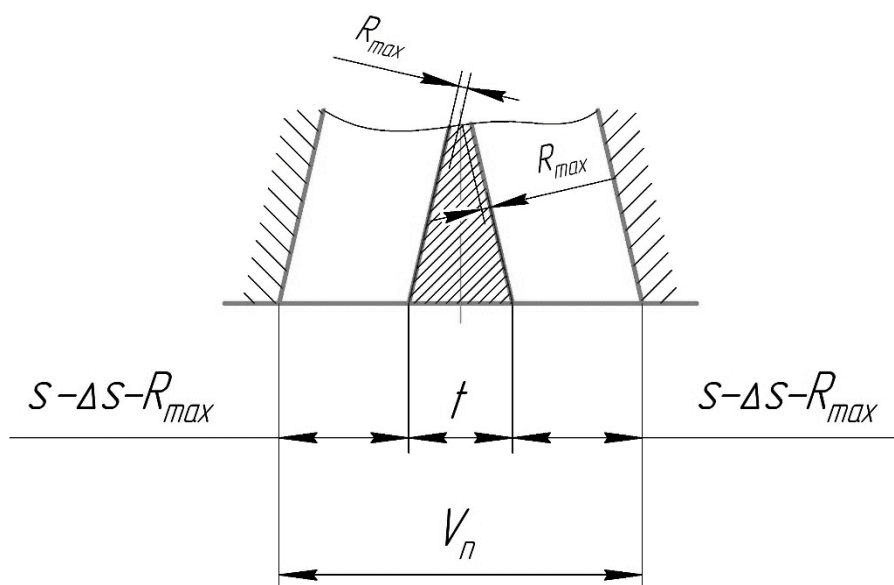


Рисунок 2.10 – Общий вид фрезы для обработки «косынок».

С использованием пояснений на рисунках 2.5–2.10 способ осуществляют следующим образом: в приведенных на рисунке 2.5 конструктивных элементах камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя инструментальным блоком

(рисунок 2.6) на наружную поверхность сложнопрофильных трактов охлаждения наносят охлаждающие элементы (рисунок 2.7), образованные чередованием ребер 4 и каналов 5 по схеме на рисунке 2.8. При этом диаметр оболочки изменяется от меньшего значения D_{min} к большему D_{max} . Для обеспечения заданной толщины ребра b_p по всей длине оболочки глубину каналов h предварительно рассчитывают через параметры режущей части инструмента (рисунок 2.9), после чего формируют комплект дисковых фрез 1 (рисунок 2.10), который затем собирают в инструментальный блок с установочным кольцом 2 (рисунок 2.6).

Расчеты параметров для выполнения ребра 4 (рисунок 2.7) толщиной b_p выполняют в следующей последовательности: определяют значение толщины установочного кольца 1 по приведенной в заявке зависимости, при этом коэффициенты $\frac{2}{3}$ и $\frac{1}{4}$, применяются для гарантированного получения заданного профиля и получены путём набора статистики применения режущего инструмента при обработке имитаторов внутренних оболочек камер сгорания, если данные отношения будут другими, то фреза может недообработать или наоборот зарезать поверхность:

$$l = b_p + \Delta_{рв} - \frac{2}{3} (\Delta_{рв} - \Delta_{рн}) + \frac{1}{4} (\Delta_{рв} - \Delta_{рн}) \quad (2.1)$$

Далее находят величину допуска толщины Δl кольца 2, которая является отношением $\Delta_{рв} - \Delta_{рн}$ и коэффициента 4, по формуле:

$$\Delta l = \frac{(\Delta_{рв} - \Delta_{рн})}{4} \quad (2.2)$$

Толщину установочного кольца 2 принимают равной $l - \Delta l$.

Определяют толщину s фрезы 1 для обработки трактов охлаждения со стороны меньшего диаметра оболочки D_{min} с учетом глубины h канала. Для этого рассчитывают диаметр d по донной части канала 4 по формуле:

$$d = D - 2h \quad (2.3)$$

Для определения толщины s фрезы 1 необходимо найти расчётную ширину каналов V_n . Так как диаметр оболочки увеличивается, рассчитывают ширину каналов с торца меньшего диаметра D_{min} и с торца большего диаметра D_{max} , чтобы

обеспечить возможность доступа к месту обработки специального инструментального блока (рисунок 2.6).

На рисунке 2.6 представлена схема основных параметров оболочки, необходимых для расчета фрез для инструментального блока.

$$P_t = \frac{\pi d}{n} \quad (2.4)$$

где, n – количество рёбер.

После определения величины торцевого шага P_t вычисляют нормальный шаг P_n оболочки по формуле 2.5:

$$P_n = P_t \cos \beta \quad (2.5)$$

Вычисляют ширину каналов

$$V_n = P_n - l \quad (2.6)$$

С учётом изменения диаметра оболочки по длине расчеты выполняют как для торца меньшего диаметра $D_{\min}$, так и для торца большего диаметра $D_{\max}$, чтобы обеспечить возможность обработки трактов одним и тем же инструментальным блоком. Ширину режущей части s фрезы с допуском Δs выбирают меньшей из минимальных значений ширины канавок V_n , обеспечивая гарантированный заход фрезы в канал без повреждения ребер.

После расчета указанных параметров собирают инструментальный блок (рисунок 2.6) и осуществляют механическую обработку оболочки путем прохода блока с формированием ребра 4 и канала 5 по всей длине тракта охлаждения, обеспечивая заданные толщину ребра b_p и глубину канала h в пределах допусков. В процессе обработки возможно образование материала (рисунок 2.10) в форме «косынки» 7, остающегося после прохода фрез за счет неполного перекрытия канала их режущей частью.

Для оценки величины перекрытия канала режущей частью фрезы определяют значение Δ :

$$\Delta = s - \Delta s - R_{max} - \frac{V_n}{2} \quad (2.7)$$

Если перекрытие недостаточно и остаются «косынки» 7, то выполняют дополнительную финишную обработку. Для этого рассчитывают ширину режущей части s_k фрезы для обработки «косынок» со стороны меньшего диаметра D_{min} :

$$L = 2(s - \Delta s - R_{max}), \quad (2.8)$$

$$s_k = 0,85L \quad (2.9)$$

Для обеспечения качества канала требуется обеспечить возможность обработки «косынок» фрезой с толщиной режущей части s_k со стороны большего диаметра D_{max} .

На рисунке 2.9 приведена схема определения толщины режущей части фрезы со стороны большего диаметра D_{max} .

Далее рассчитывают ширину канавок V_n со стороны большего диаметра D_{max} и ширину «косынки» t :

$$t = V_n - 2(s - \Delta s - R_{max}), \quad (2.10)$$

Финишную обработку «косынок» со стороны D_{max} осуществляют фрезой, у которой прямолинейный участок (С) режущей частью перекрывает ширину t при выполнении условия $s > t$.

Инструментальный блок для осуществления приведенного способа содержит установленный на оправке комплект дисковых фрез 1, связанных между собой по оси установочным кольцом 2 (рисунок 2.6) Установочное кольцо выполнено с толщиной $l - \Delta l$, определяемой по приведенным зависимостям, что обеспечивает формирование ребер 4 заданной толщины b_p и канавок 5 требуемой глубины h по всей длине тракта охлаждения.

Каждая дисковая фреза 1 имеет ширину режущей части s и допуск Δs , на основании условия:

$$s < V_{\text{п}}, \quad (2.11)$$

Такое соотношение позволяет обеспечить стабильное положение режущих кромок относительно ребер 4, каналов 5 и предотвратить завышение толщины ребер 4.

Фреза инструментального блока может быть выполнена с прямолинейным участком режущей части длиной « s », предназначенным для финишной обработки участков оболочки в виде «косынок» 7. Длина рассматриваемого участка (s) выбирается такой, чтобы при обработке со стороны большего диаметра D_{max} выполнялось условие $s > t$, где t – ширина «косынки», определяемая по зависимости (2.10)

Выполнение приведенного выше условия обеспечивает возможность использования одного и того же инструментального блока как для основной, так и для финишной обработки без применения дополнительного инструмента.

Применение заявляемого способа и инструментального блока позволяет обеспечить получение сложнопрофильных трактов охлаждения оболочки камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя с высокой точностью геометрических параметров, улучшенным качеством поверхностного слоя ребер 4, каналов 5, с возможностью финишной обработки «косынок» 7 с обеих сторон оболочки, что повышает надежность и эксплуатационные характеристики камеры сгорания.

Технический результат осуществляется за счет того, что перед механической обработкой сложнопрофильных трактов охлаждения оболочки камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя предварительно рассчитывают толщину установочного кольца 2 инструментального блока (рисунок 2.6) и ширину режущей части дисковых фрез 1, 3 с учетом допусков на толщину ребер 4, глубину каналов 5 (рисунок 2.7) и изменение диаметра оболочки по длине.

Данная работа была выполнена на экспериментальном образце, в рамках гранта РФФИ №25-29-00085 «Разработка математических моделей и методов получения сложнопрофильных трактов охлаждения камер сгорания жидкостных

ракетных двигателей». Экспериментальный образец, каналы которого получены при помощи инструментального блока, описанного выше, стал эталоном, по которому в дальнейшем устанавливался и размечался диэлектрический шаблон и проводилась установка ЭИ.

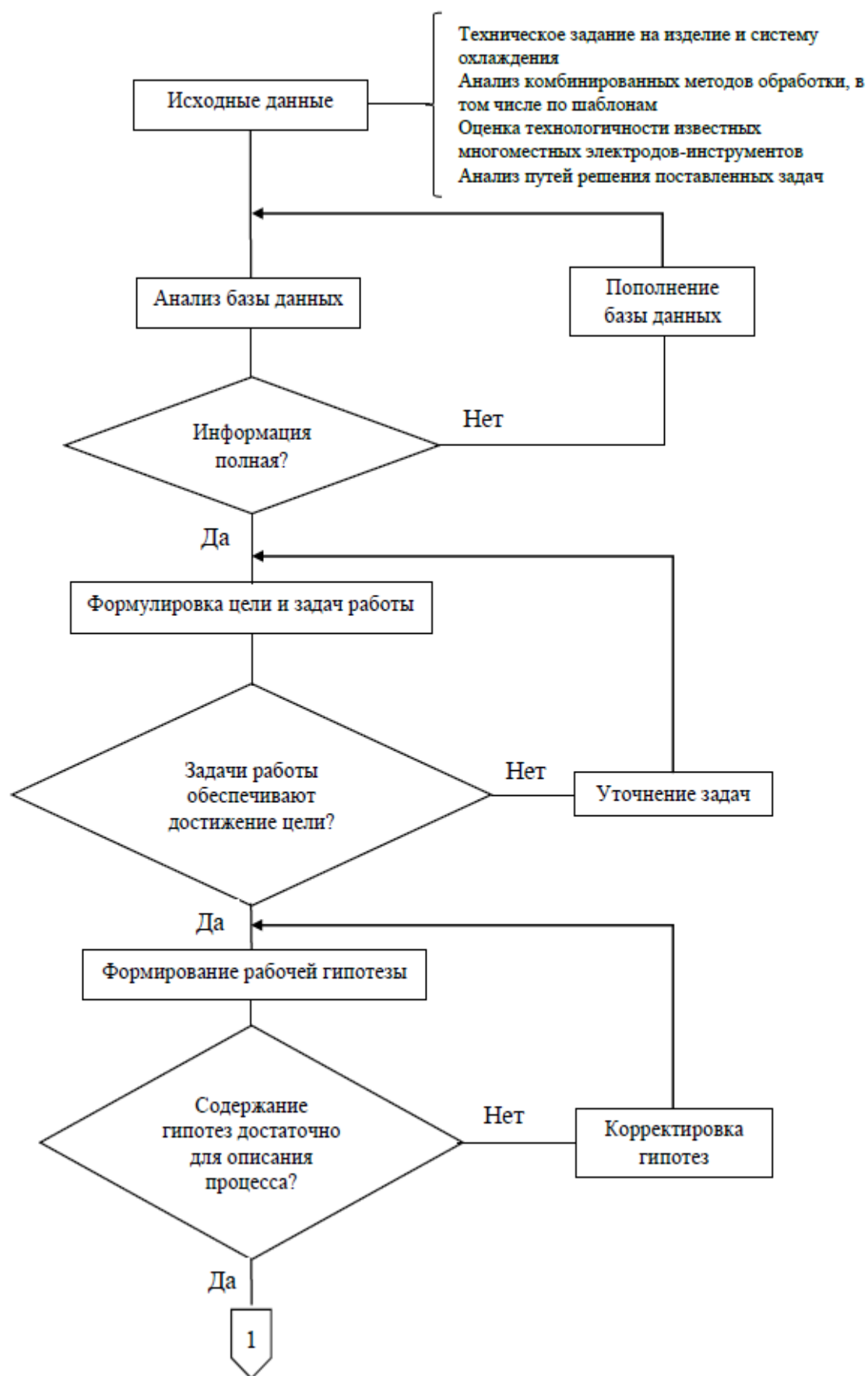
2.4 Алгоритм выполнения исследований

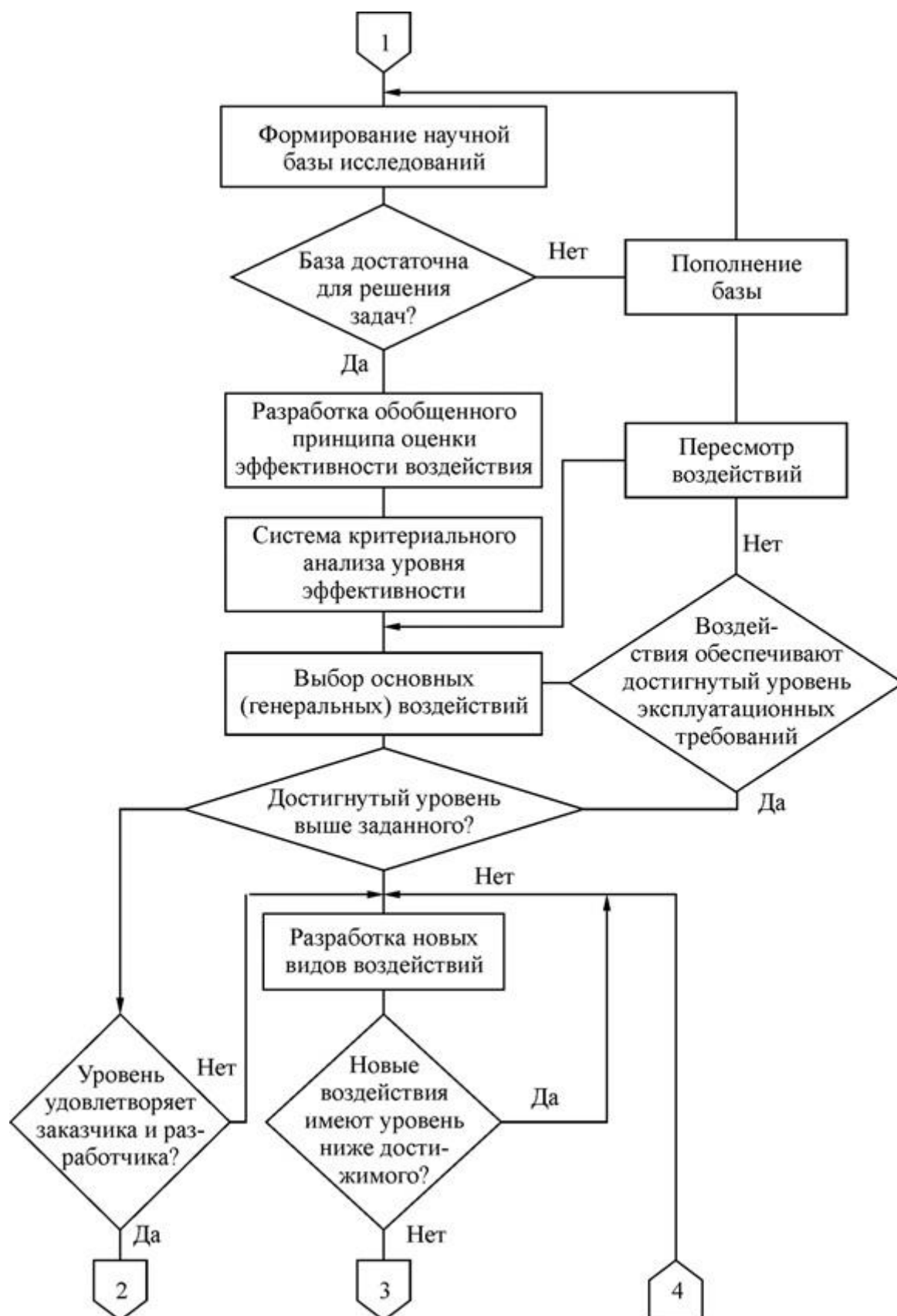
В алгоритме (рисунок 2.11) раскрыта система использования в работе предложенного в [85] принципа полезности для реализации программы решения поставленных задач и достижения цели работы, что позволяет сократить сроки обоснования и достичь целесообразности назначения вида воздействий в комбинированном технологическом процессе для получения требуемого технологического результата.

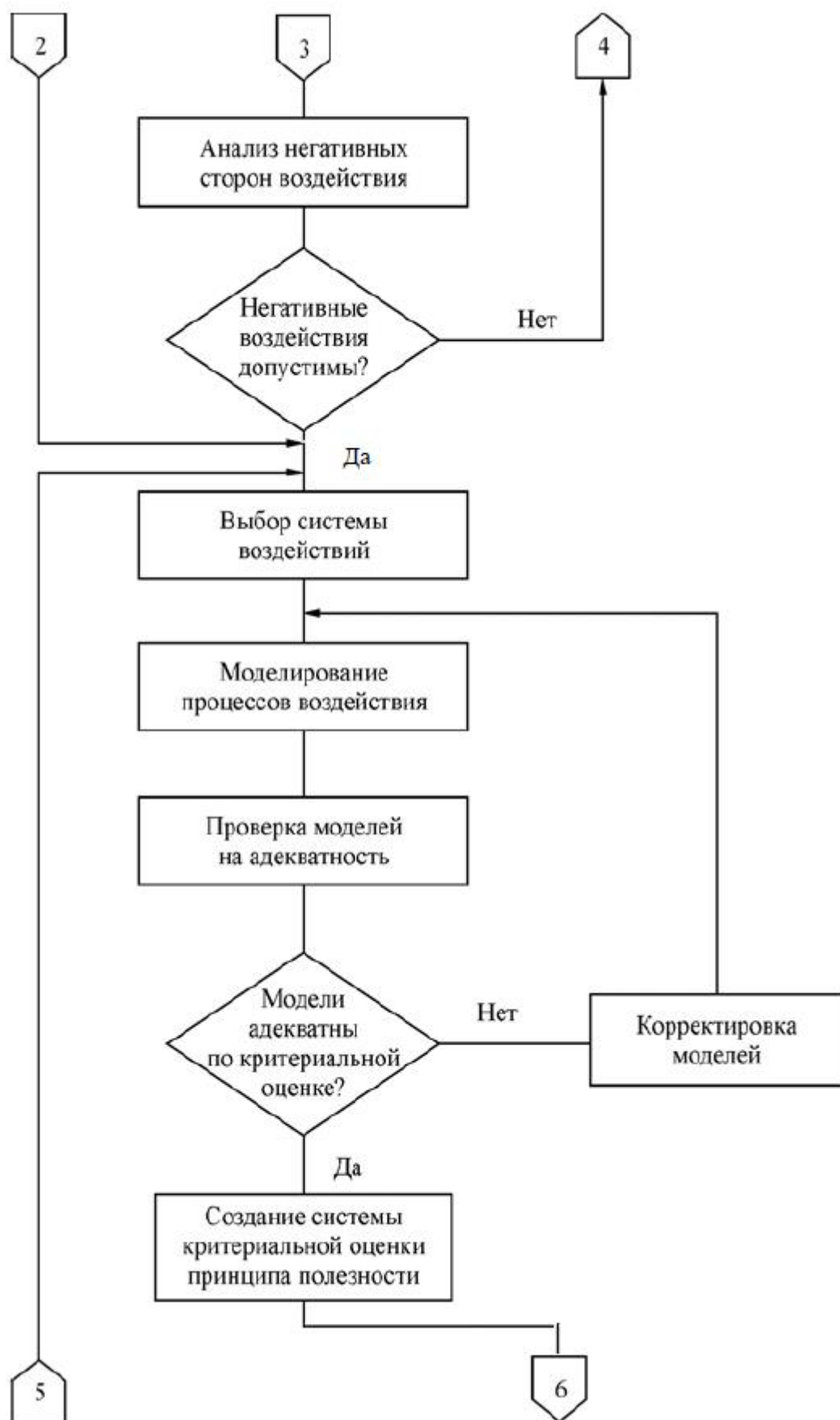
Алгоритм включает несколько последовательных этапов, позволяющих моделировать процесс обработки при различных ограничениях для реализации вариантов проведения операций.

На первом этапе выполняется анализ выбора типового объекта, приводятся способы повышения эксплуатационных свойств изделий, где рассматривалась, в основном, возможность применения принципа полезности на стадии группового получения углублений турбулизаторов, проанализированы недостатки известных способов и их значимость для используемых технологий.

Далее обоснованы и научно доказаны эффективные направления проведения исследований для усиления роли каждого воздействия, включая гибкий диэлектрический шаблон для электрода-инструмента и его применимость для комбинированного технологического процесса с электрохимическим воздействием, предложена процедура проектирования типовых технологических процессов, основанных на современных достижениях технологической науки, патентах на изобретения и опыте ведущих отраслей машиностроения в стране и за рубежом.







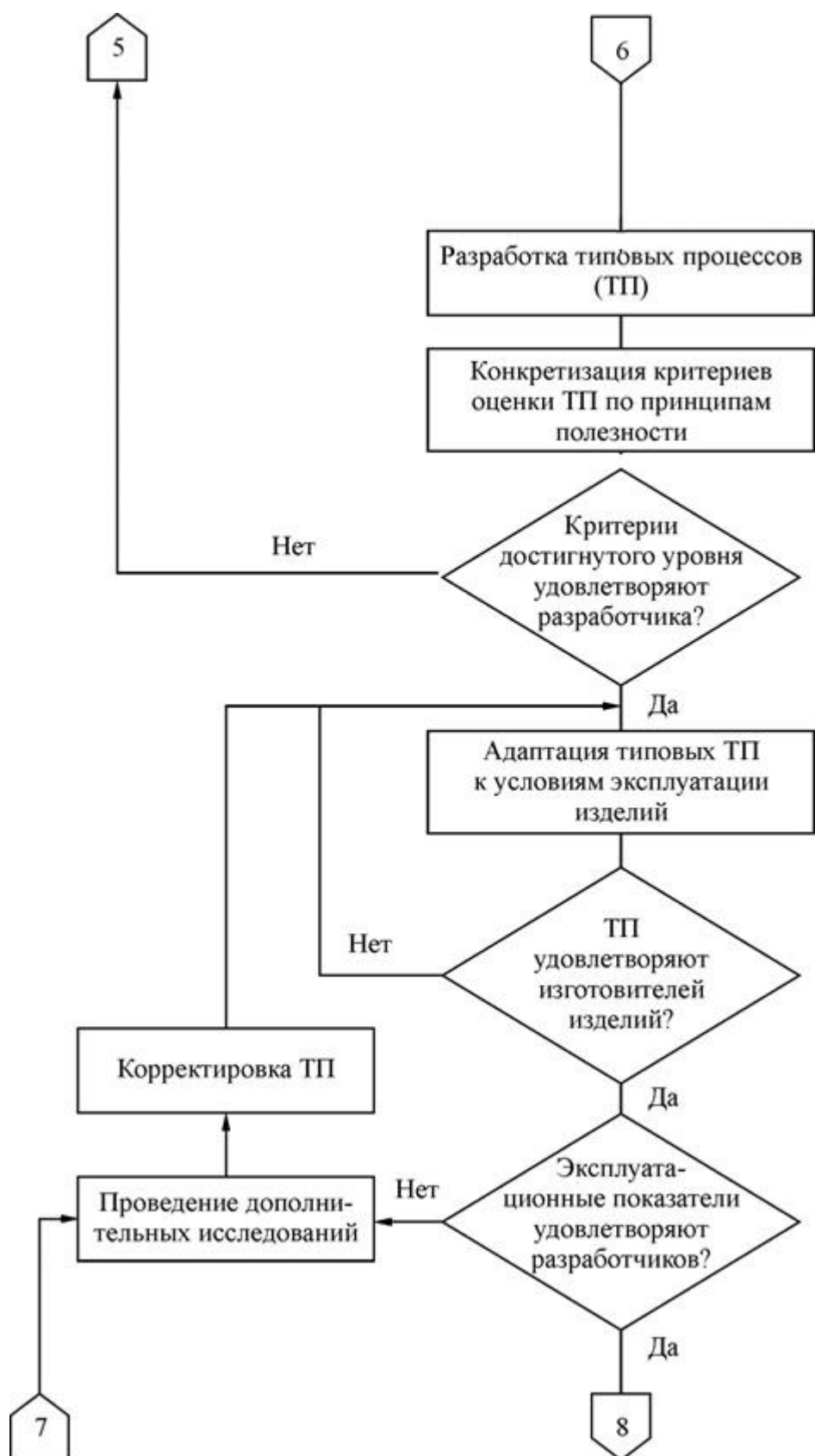




Рисунок 2.11 - Алгоритм выполнения исследований для пополнения базы знаний по комбинированным методам обработки углублений в турбулизаторах по многоместным технологичным шаблонам и снижения негативных воздействий, затрудняющих расширение области использования метода в авиакосмическом и общем машиностроении

Выводы по главе

1. Разработаны научные гипотезы, ускоряющие выполнение исследований для решения поставленных задач и достижения цели работы.
2. Научно обоснованы методы и устройства преимущественно отечественного производства для исследований в области комбинированной обработки многоместными технологичными электродами-инструментами с гибкими шаблонами, обеспечивающими одновременное получение всех турбулизаторов на всех (в том числе труднодоступных для инструмента участках охлаждающих каналов). Разработан способ получения сложнопрофильных трактов

охлаждения камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя и инструментальный блок для его осуществления, на который отправлена заявка №2026115234 от 19.05.2026 с целью его патентования. На базе данного способа в рамках гранта РНФ изготовлен эталон оболочки камеры сгорания, который в дальнейшем был использован для работы с диэлектрическим шаблоном и электродом-инструментом.

3. Разработан алгоритм выполнения исследований для пополнения технологической базы знаний, применение которой позволяет ускорить проведение исследований, намеченных в целях и задачах работы, учесть перспективы, расширить область использования достижений технологической науки и опыта практического использования результатов в промышленности.

Глава 3 МЕХАНИЗМ И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПОТОКА И ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ ПО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ШАБЛОНАМ

3.1 Управление процессом охлаждения и моделирование механизма организации характеристик течения рабочей среды в межэлектродном зазоре при комбинированной обработке

Управление параметрами процесса охлаждения жидкой рабочей средой построено на закономерностях тепломассообмена [33], теплопередачи [18] и теории подобия в технике [70], рассмотренных в главе 1 работы. Из [18] известно, что теплопередача в медленном ламинарном потоке происходит в основном поперек его течения и даже без турбулизаторов в каналах охлаждения вынос тепла менее эффективен по сравнению с турбулентным при конвекции процесса, определяемой через скорость стабильного течения охлаждающей жидкости. Аналогичная структура потока при создании турбулизаторов образуется в случае использования комбинированной обработки по шаблонам, где жидкость преодолевает участки с углублениями, что показано на рисунке 3.1.

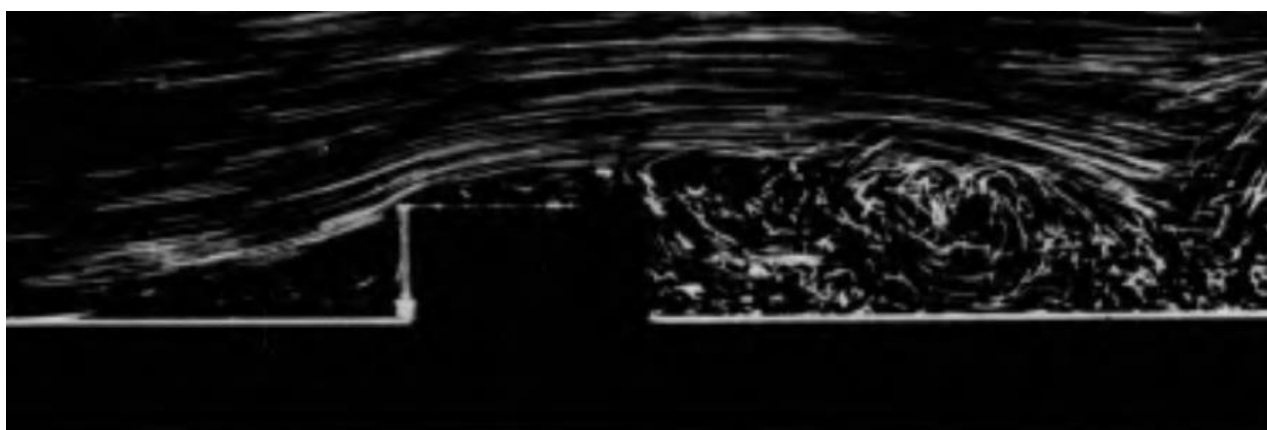


Рисунок 3.1 – Воздействие неровностей на характер течения жидкостей в охлаждающих каналах в конце формирования углубления турбулизатора

В потоке охлаждающей жидкости (рисунок 3.1) просматриваются пузырьки газа, которые перераспределяются в потоке после обтекания турбулизатора и участвуют в формировании завихрений, изменяющий характер течения охлаждающей жидкости с ламинарного на турбулентный.

На рисунке 3.2 приведено течение жидкости через канал с турбулизаторами в период охлаждения горячей зоны камеры сгорания протекающим охладителем типа, показанного на рисунке 3.1.

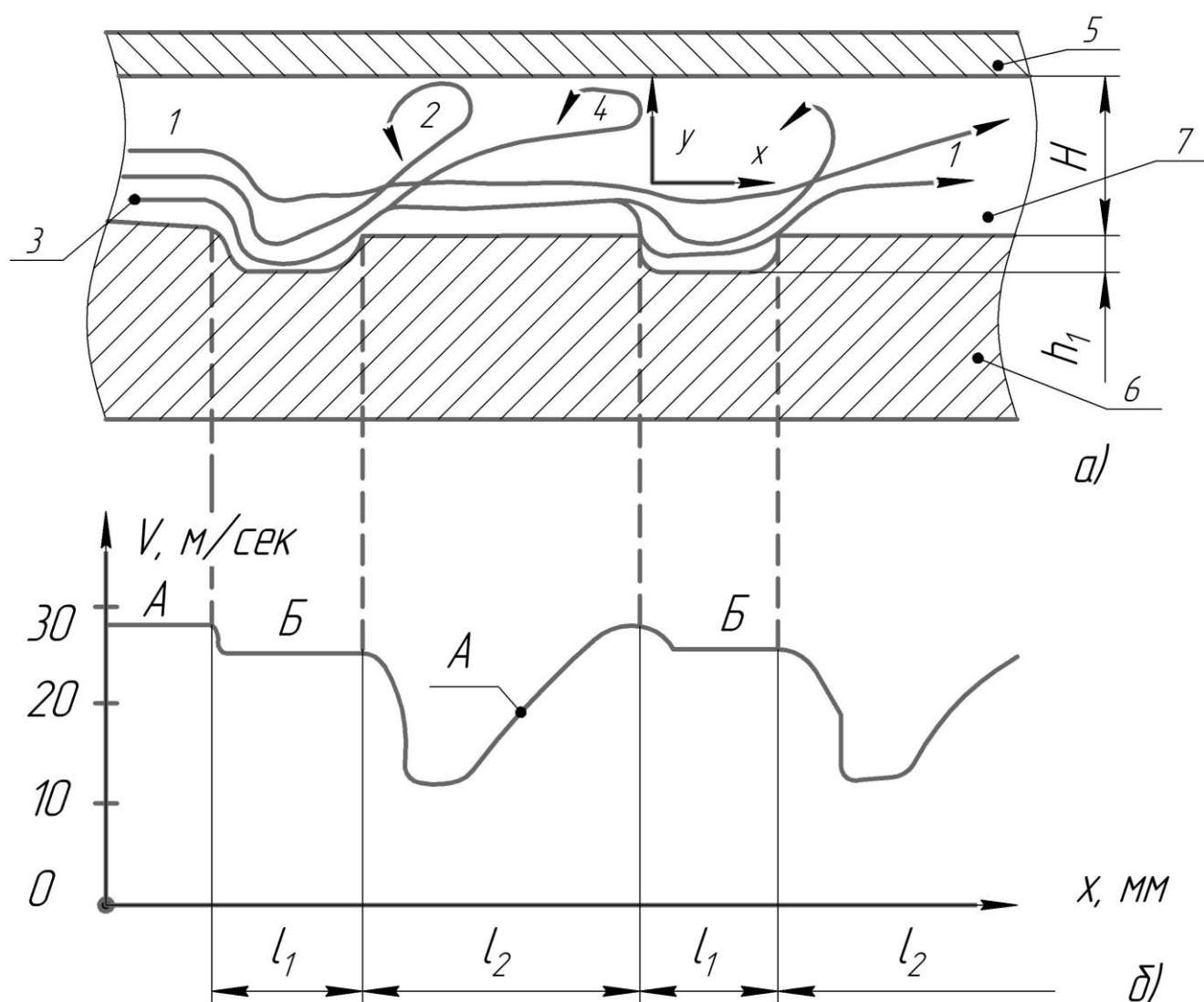


Рисунок 3.2 – Механизм течения охлаждающей жидкости через углубления и турбулизаторы, где l_1 - l_2 – рассматриваемые участки

а) - характер течения жидкости в канале. 1 - характер течения по гладкой донной части канала; 2, 4 - завихрения; 3 - течение над углублением; 5 - наружная оболочка канала; 6 - корпус камеры сгорания; 7 - ребро канала.

б) - скорость течения жидкости в оребренной зоне канала, полученная расчётными методами [26].

А - скорость жидкости над турбулизатором; Б - скорость течения над углублением; x ; y - направления течения струй в канале; h_1 - величина углубления; H - высота ребра; l_1 - длина углубления; l_2 - длина турбулизатора.

Анализ механизма течения жидкости на рисунке 3.1 показывает принципиальные различия процессов в зоне обтекания турбулизатора. При выносе тепла в детали глубина канала на порядок превышает конечную величину углубления в корпусе камеры 6 (рисунок 3.2), составляющего часть межэлектродного зазора, не превышающего 0,8 мм. Конфигурация потока, показанная, на рисунке 3.2 не позволяет течению 5, 7, 9 на рисунке 3.3 сформировать турбулентность, повышающую теплообмен. При проектировании размещения сквозных отверстий в шаблоне приходится исходить из учета параметров и расстояний для углублений, полученных экспериментальным методом, где такие данные установлены из практики использования системы охлаждения с турбулизаторами и методом последовательных приближений, моделированием на имитаторе. Это дает возможность ускорить проектирование трактов, но не исключает поиск параметров течения через турбулизаторы расчетным методом.

На рисунке 3.2, а показан фрагмент зоны охлаждения, на котором при огневых испытаниях камеры сгорания на испытательном стенде снимали скорость течения охлаждающей жидкости над гладкой частью 1 канала, формирующей турбулизаторы (участок Б на рисунке 3.2, б). В рассматриваемом случае [24] она оказалась равной 28,86 м/сек. Над углублением скорость 3 незначительно (до 28 м/сек) снизилась из-за увеличения площади сечения в начале углубления, а в конце его сформировались потоки с завихрениями 2;4, создающие течения по осям x и y с турбулизацией потока. За счет резкого возрастания скорости потока по оси y

составляющая по x снизилась до 12,5 м/сек. Торможение потока в направлении y снижалось, а по x возрастало до выравнивания средней скорости потока, где воздействие турбулизации фактически прекратилось. Это позволяет принять, что длина турбулизатора l_2 увеличилась относительно l_1 на V_1/V_2 .

На рисунке 3.3 приведены варианты течения на аналогичных участках каналов электролита при комбинированной обработке с диэлектрическим трафаретом между ребром 1 канала (анод) и катодным устройством 4, полученные на имитаторе (рисунок 2.4.)

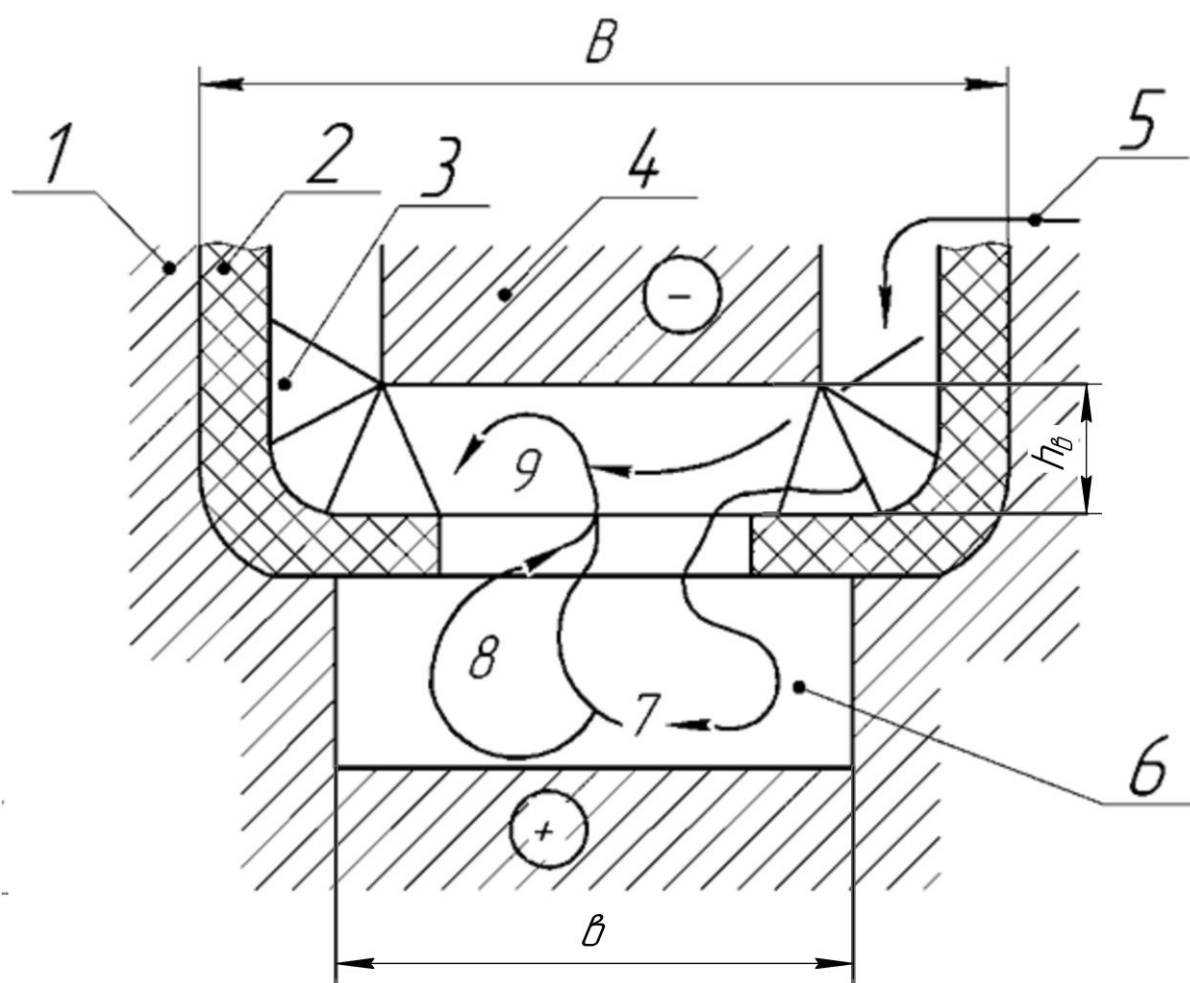


Рисунок 3.3 – Варианты течения электролита над углублением турбулизатора
 1 - ребро канала; 2 - трафарет; 3 - выступ на трафарете; 4 - катодное устройство; 5 - направление течения потока электролита при обработке углубления 6; 7-9 траектория перетекания жидкости в зоне формирования углубления. B - ширина канала; b - ширина сквозного отверстия в трафарете; h_b - высота выступов.

Из рисунка 3.3 видно, что для определения размеров сквозных отверстий при проектировании, шаблона требуется установить, кроме длины углубления и турбулизатора (рисунок 3.2, б) его ширину B_y в канале. В [24] для этого предлагается принять $B_y = (0,8-0,9)$. Однако такая оценка может дать только приблизительное значение при расчете элементов шаблона, так как здесь не учтены его толщина, радиус скругления при гибке, геометрия катодного устройства 4, высота выступов 3, определяющих межэлектродный зазор при комбинированной обработке, обжатие концов камеры сгорания, вызывающих уменьшение ширины каналов. В рассматриваемом примере [24] на концевых участках камеры сгорания этот показатель снижался на участке перед форсунками с 1,2 до 0,9 мм, что может значительно менять картину течения электролита при обработке углублений по шаблону. Такое изменение вызвано пластической деформацией после сборки камеры сгорания с наружной оболочкой, как это показано на рисунке 3.4



Рисунок 3.4 – Фрагмент камеры сгорания в месте сборки с огневым диском

Механизм перетекания электролита на рисунке 3.3 позволяет выровнять поток жидкости в межэлектродном зазоре и назначать режимы обработки углублений на элементах охлаждающей системы между кольцевой проточкой, приведённой на рисунке 3.5, обеспечивающими выравнивание параметров течения в каналах на элементах. На этих участках может изменяться направление течения жидкости, размеры форма и количество каналов, что должно учитываться при проектировании шаблона, катодного устройства в электроде-инструменте

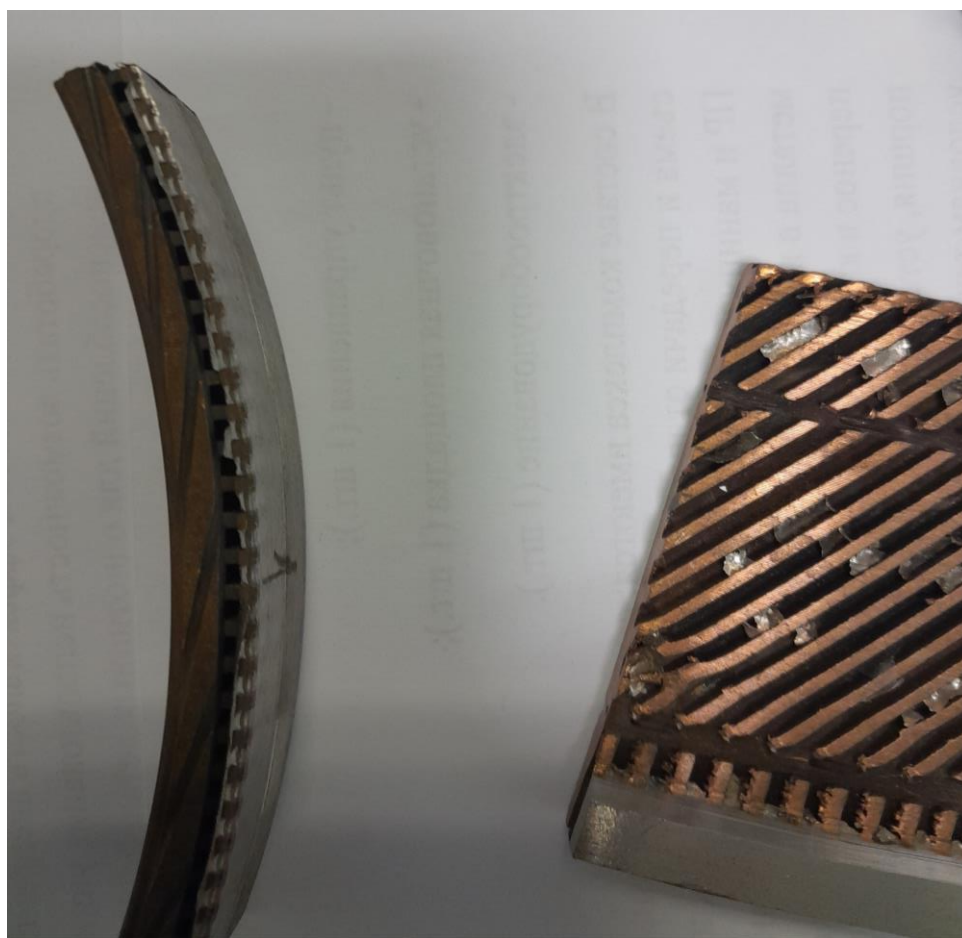


Рисунок 3.5 – Охлаждающие каналы в камере сгорания с наружной оболочкой

Скоростная съемка течения электролита через прозрачные каналы на имитаторе подтвердила правомерность картины обработки углублений через шаблоны, где скорость течения жидкости регулируется давлением в начале потока и ограничена началом пульсации течения, показанного в [43] и на рисунке 3.6.

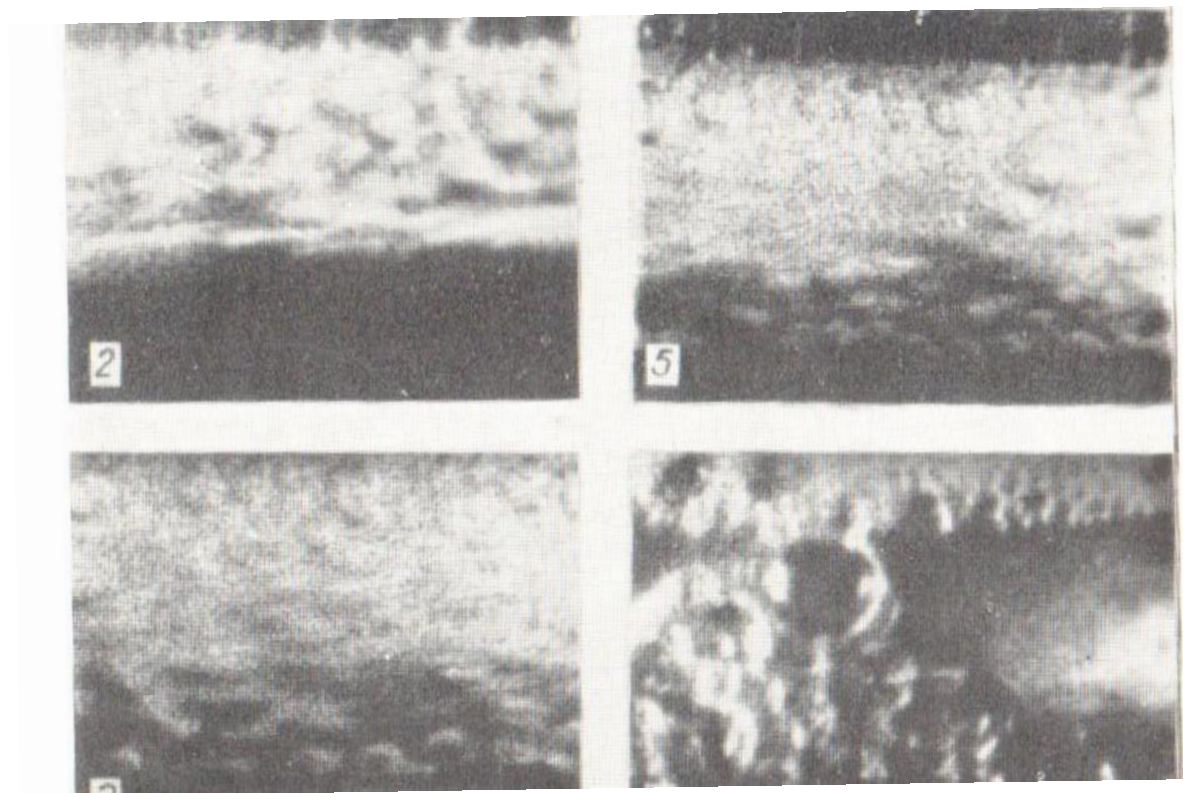


Рисунок 3.6 – Кадры скоростной съемки течения электролита в зазоре

На кадре 2 в начале обработки углубления на границе катода образуется слой продуктов обработки, который утолщается и заполняет межэлектродный зазор. Далее к ним добавляются новые газообразные продукты, которые полностью перекрывают просвет между электродами и затормаживают течение через зазор. С повышением давления на входе место заклинивания потока перемещается вдоль канала и в конце открывает место свободному течению потока. Это давление является нижней границей режима стабильного течения 1.

3.2 Расчет параметров шаблона для электрода-инструмента

Приведенный и научно обоснованный материал по формированию режимов течения в углублениях и турбулизаторах позволяет рассчитать размеры и положение сквозных каналов в шаблоне при комбинированной обработке углублений в турбулизаторах с учетом поднутрения их профиля, за счет анодного расширения границ углублений. В [43] предложен критерий устойчивости течения электролита через межэлектродный зазор, границей которого является турбулизация потока в конце углубления перед турбулизатором. На рисунке 3.2, б этот участок в канале обозначен величиной l_1 , а его длина определяется по формуле

$$l_1 = \frac{V_0 P_0}{(U - \Delta U) S \cdot C_{H_2} \cdot R T_0}, \quad (3.1)$$

где C_{H_2} электрохимический эквивалент выделения водорода (справочные сведения для различных рабочих сред); R -газовая постоянная; T_0 - абсолютная температура (К) жидкости в начале потока; V_0 – скорость течения жидкости на входе в канал, м/сек; P_0 -давление (кг/см²) жидкости на входе; U – напряжение на электродах; ΔU – потери напряжения; S -межэлектродный зазор без шаблона.

Длина сквозного отверстия $l_{ш1}$ в шаблоне (рисунок 3.3) напротив углубления в канале l_1 (рисунок 3.2), в соответствии с [24] составит

$$l_{ш1} = k_1 h_1 - 2 \Delta L, \quad (3.2)$$

где k_1 –соотношение в охлаждающем канале между длиной углубления l_1 и его величиной h_1 (рисунок 3.2). По [24] $k_1 = 10-12$; ΔL - поднутрение.

Для оценки величины поднутрения в литературе [15;73;85] предлагается использовать различные методы расчетов с учетом использования шаблонов. Так в [15] величину поднутрения рассчитывают по безразмерным (относительным) начальным условиям протекания процесса.

Математическая модель формирования поднутрения рассчитана на базе физической модели, для которой разработана математическая модель, процесс которой поясняется на рисунке 3.3. В модели приняты допущения, что ось и стенки

канала прямолинейны, а изменение электрического поля по глубине зависит только от начального межэлектродного зазора S_0 .

Необходимая для расчета сквозных отверстий в шаблоне величина поднутрения ΔL_1 зависит от расстояния S_0 , силы электрического поля со стороны катодного устройства и других факторов, показанных в (2.2).

Принимая в качестве граничного условия минимальную плотность тока в зоне анодного растворения и, используя метод [70] отображения зоны обработки на область межэлектродного зазора, можно с помощью интеграла Кристоффеля-Шварца [13] установить величину поднутрения $\Delta L_1'$

$$\Delta L_1 = \frac{2}{\pi\gamma} \int_0^1 \frac{(1-\gamma-\tau^2)d\tau}{\sqrt{t-\gamma} (1-\tau^2)(2-\tau^2)^{3/2}}, \quad (3.3)$$

где τ - безразмерная величина, характеризующая длительность процесса;

γ - параметр, характеризующий скорость анодного растворения, определяемую плотностью тока

t - параметр, характеризующий скорость анодного растворения по оси углубления в начале процесса

$$\gamma = \frac{j}{2+j},$$

где j – отношение плотности тока в расчетной точке «А» к плотности на границе шаблона с заготовкой- «Г»

$$j = \frac{j_A}{j_\Gamma},$$

Здесь

$$j'_\Gamma = \frac{\chi(U-\Delta U_1)}{S_0} \quad (3.4)$$

В (3.2-3.4) χ - удельная электропроводность среды; S_0 – начальный межэлектродный зазор;

Применительно к обработке углублений по схеме на рисунке 3.3. описание процесса формирования углубления (3.2-3.4) отражает только качественный механизм явления.

В [73] для оценки величины уширения для титановых сплавов разработано численное уравнение, где величины слагаемых отражают истинные значения,

характерные для обработки углублений при нанесении маркировочных знаков и имеют разброс результатов в пределах 20% от длины углубления.

На практике при изученных составах и режимах обработки для бронзовых сплавов в [85] поднутрение рассчитывается по зависимости

$$\Delta L = \sqrt{S_0^2 + 2\eta \frac{\alpha}{\gamma_+} \chi(U - \Delta U)\tau}, \quad (3.5)$$

Находится по схеме на рисунке 3.3 при толщине шаблона $t_{ш} = 0,05-0,1$ мм. Ограничениями при выборе начального межэлектродного зазора по [86] служит диапазон от 0,05 до 0,5 мм.

$$S_0 = S + t_{ш} \quad (3.6)$$

По рисунку 3.3 создается высотой выступов h_v на шаблоне.

γ_+ - плотность обрабатываемого материала;

η - выход по току;

α - электрохимический эквивалент;

τ - время удаления припуска (при изготовлении углублений $Z = h_1$), которое составляет

$$\tau = \frac{Z(Z + 2S_0)\gamma}{2\eta\alpha\chi(U - \Delta U)}, \quad (3.7)$$

По (3.1) длина углубления сквозного отверстия $l_{ш1}$ в шаблоне, противолежащему углублению в канале (рисунок 3.2), составляет

$$l_{ш1} = \kappa_1 h_1 - 2 \sqrt{S_0^2 + 2\eta \frac{\alpha}{\gamma_+} \chi(U - \Delta U)\tau} \quad (3.8)$$

Длина выступа, формирующего турбулизатор, остается величиной равной l_2 на рисунке 3.2.

Ширина «в» сквозных отверстий в шаблоне зависит от ширины «В» каналов на рисунке 3.3. При постоянной ширине донной части канала не менее 1 мм

$$v = (0,8-0,9) B - 2 \sqrt{S_0^2 + 2\eta \frac{\alpha}{\gamma_+} \chi(U - \Delta U)\tau} \quad (3.9)$$

Как показано на рисунке 3.4 и в пояснениях к нему за счет уменьшения диаметра наружной оболочки и камеры сгорания ширина канала может значительно снижаться и становиться менее 1 мм, где не представляется

возможным разместить углубление 6 (рисунок 3.3). При использовании диэлектрического шаблона предпочтительнее наносить выступы величиной $0,3 \pm 0,1$ мм. Тогда приходится изготавливать углубления на одной из сторон боковой поверхности ребер в каналах, т. к. по ограничениям их толщины двухсторонние углубления не допустимы. Их размер b_6 по ширине в шаблоне составляет

$$b_6 = (0,6-0,7)H - 2\sqrt{S_0^2 + 2\eta\frac{\alpha}{\gamma+}\chi(U - \Delta U)\tau}, \quad (3.10)$$

При всех исследованных видах комбинированной обработки с анодным растворением припуска для шаблонов высоту выступов h_b принимают равной величине зазора S при прошивке углубления профильным инструментом

$$h_b = S,$$

где S в [43] предлагают рассчитывать по формуле:

$$S = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{(U - \Delta U)\chi_0 C_{H_2} R T_0 l_1}{V_0 P_0}} \quad (3.11)$$

где χ_0 - удельная электропроводность среды перед началом обработки; C_{H_2} электрохимический эквивалент выделения водорода (справочные сведения для различных рабочих сред); R -газовая постоянная; T_0 - абсолютная температура (К) жидкости в начале потока; V_0 - скорость течения жидкости на входе в канал, м/сек; P_0 - давление (кг/см^2) жидкости на входе; U - напряжение на электродах, ΔU - потери напряжения на электродах, S - межэлектродный зазор.

Расчетный зазор в конце обработки углубления S_k

$$S_k = S + t_{ш} + h_1 \quad (3.12)$$

Величина S_k является границей по толщине фрагмента шаблона и катодного устройства на этапе проектирования сборных электродов-инструментов.

Рекомендации по размещению углублений турбулизаторов и мест размещения выступов на шаблонах в тех местах каналов, где они необходимы по требованиям разработчиков охлаждающей жидкостной системы, указаны на рисунке 4.3.

Приведенная информация и расчеты позволяют научно обоснованно спроектировать шаблон электрода-инструмента для изготовления углублений турбулизаторов.

3.3 Моделирование процесса разделения электрода-инструмента на фрагменты в едином сборочном узле

В основу обоснования процесса разделения шаблона и катодного устройства положена геометрия каналов охлаждения. Моделирование гидродинамических процессов в каналах с турбулизаторами выполнялось на имитаторе.

На базе физической модели с учетом механизма массовыноса можно формализовать процесс проектирования системы охлаждения, раскрыть механизм массовыноса при электрохимической обработке углублений, установить технологические режимы процесса. Моделирование процесса имеет ограничения, вызванные начальными условиями и расчетами параметров обработки углублений комбинированным методом по шаблону.

Начальные условия включают: требуемый цифровой контур турбулизатора, необходимый для обеспечения безостановочного охлаждающего течения жидкой среды через каналы по охлаждаемой поверхности; предлагаемый разработчиком шаг между турбулизаторами; выбранные или рассчитанные электрические и гидравлические режимы комбинированной обработки деталей в нашем случае из бронзы; условия течения в канале охлаждающей среды.

Граничные условия включают: диапазон изменения соотношения газовой и жидкой среды, допустимый при течении охладителя по каналу и в процессе обработки [27,62] и возможность выполнения предлагаемой операции в условиях ограниченного доступа инструмента ко всем участкам зоны обработки углублений турбулизатора.

Для снятия ограничений и обработки бронзовых материалов требуется рассчитать часть режимов течения электролита, параметры технологичной обработки, нарушение которых при рабочих положениях шаблона может вызывать

«запирание» межэлектродного зазора с остановкой процесса получения одного или партии углублений.

В [22] теоретические зависимости для расчета минимальных межэлектродных зазоров предлагают выполнить через определение расстояния перемещения газового пузырька по турбулизатору, процесс его перемещения представлен на рисунке 3.6. Для обоснованного и предлагаемого разработчиком профиля углублений турбулизаторов и выбора их шага проектируют и создают индивидуальную съемную часть имитатора на рисунке 2.4, что, возможно выполнить в виде диэлектрического шаблона со сквозными отверстиями, выбирают параметры охлаждения на входе охлаждающей жидкости в канал охлаждения. Далее по критериальным соотношениям между условиями течения охлаждающей и рабочей среды (электролита) устанавливают параметры обработки комбинированным методом. Гидродинамические свойства электролита и охладителя будут формально подобны при выполнении критерия:

$$\frac{\rho_0 \cdot V_0 \cdot d_{г.о}}{\mu_0} = \frac{\rho_э \cdot V_э \cdot d_{г.э}}{\mu_э}, \quad (3.13)$$

Величину газонаполнения, как результат химических преобразований в зоне обработки, по длине канала при охлаждении изделия охладителем $\Gamma_o(X)$ рассчитывают по [22,23]. Для расчета параметров процесса комбинированной обработки, необходимых для создания условий, при которых газонаполнение будет соответствовать наличию газовой составляющей при высоких давлениях охлаждающей жидкости и ее температуре в потоке при охлаждении изделия, для выполнения данного расчёта, удовлетворяющего выше приведённые условия, можно воспользоваться зависимостью [23]:

$$\Gamma_o(X) = 1,25 \cdot 10^{-7} \cdot \eta_n \cdot \frac{j_0}{V_э} \cdot \frac{T_n}{T(X)} \cdot \frac{P(X)}{P_n} \cdot \chi, \quad (3.14)$$

где $1,25 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{А} \cdot \text{с}$ – объем водорода в нормальных условиях ($P_n=0,1 \text{ МПа}$; $T_n=291 \text{ К}$), выделяющегося при прохождении количества электричества $1 \text{ А} \cdot \text{с}$;

η_n – выход по току катодной реакции выделения водорода; j_0 – анодная плотность тока ($j_0 = \frac{\chi \cdot (U - \Delta U)}{S}$), где χ – удельная электропроводность среды,

V_9 – скорость течения электролита; $T(x)$ – распределение средних температур по длине потока; $P(x)$ – распределение давления по потоку охлаждающей среды.

При расчете комбинированной обработки углублений необходимо обоснованно назначать величину межэлектродных зазоров, изменение которых возможно в диапазоне, рассчитанном по приведенной методике с подтверждением правомерности результатов экспериментально.

Распределение средних температур по длине потока можно определить с помощью зависимости [23]:

$$T(X) = T_0 + \frac{U \cdot j \cdot L}{\rho \cdot c \cdot V_9} \cdot \chi, \quad (3.15)$$

где T_0 – начальная температура среды (на входе в межэлектродный зазор):

L – длина изучаемого участка обработки канала; ρ – плотность рабочей среды; c – теплоемкость рабочей среды.

Поскольку в (3.14) j , ρ , $V_9 = f(L)$, являются переменными величинами, то точное решение уравнения (3.14) возможно только для конкретных условий обработки с применением численных методов.

Распределение давления среды по длине обрабатываемого участка канала можно определить по формуле (3.14) из [23]

$$P(X) = P_{\text{вх}} - \frac{\Delta P}{L} \cdot l_p, \quad (3.16)$$

где $P_{\text{вх}}$ – давление рабочей среды на входе в межэлектродный зазор; l_p – длина рабочего участка инструмента; $\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}$ – перепад давления на входе и выходе из межэлектродного зазора.

При этом по ходу межэлектродного промежутка изменяется плотность тока $j(x)$, поэтому в зависимости (3.14) должно быть учтено это изменение при решении задачи 3 выполняемой работы.

3.4 Экспериментальное подтверждение расчетных параметров процесса комбинированной обработки углубления

Комбинированная обработка углублений в каналах охлаждающих систем, выполняемая по диэлектрическим шаблонам, относится к нестационарным технологическим процессам, в первую очередь из-за постоянного возрастания межэлектродного зазора по мере увеличения углубления. В начале процесса этот параметр увеличивается на толщину съемного диэлектрического шаблона, далее к нему добавляется величина углубления.

По мере обработки впадины турбулизатора требуется увеличивать напряженность поля путем роста напряжения на электродах инструмента. Проведенные исследования показали, что на динамику изменения параметров влияет большинство факторов, изучаемых при описании механизма обработки по шаблонам. Установлено, что часть физико-технических воздействий, приемлемых для бронз, могут положительно влиять на уровень технологичности процесса изготовления углублений.

Численные показатели расчетных и экспериментальных технологических процессов сравниваются по осредненным значениям, правомерным в течение всего периода формирования углублений. На рисунке 3.7 приведен диапазон допустимого по [43;24] использования межэлектродных зазоров в применяемых рабочих средах от начала обработки до завершения формирования углублений турбулизаторов в изучаемом диапазоне величин, ограниченном по глубине остаточной толщиной материала в донной части канала и у ребра. По [24] при изготовлении углублений остаточную толщину донной части и ребер каналов требуется сохранить не менее 0,5 мм. Зависимости на рисунке 3.7 приведена для межэлектродного зазора при обработке углублений до 0,5 мм с шаблоном (1) или без него (2)

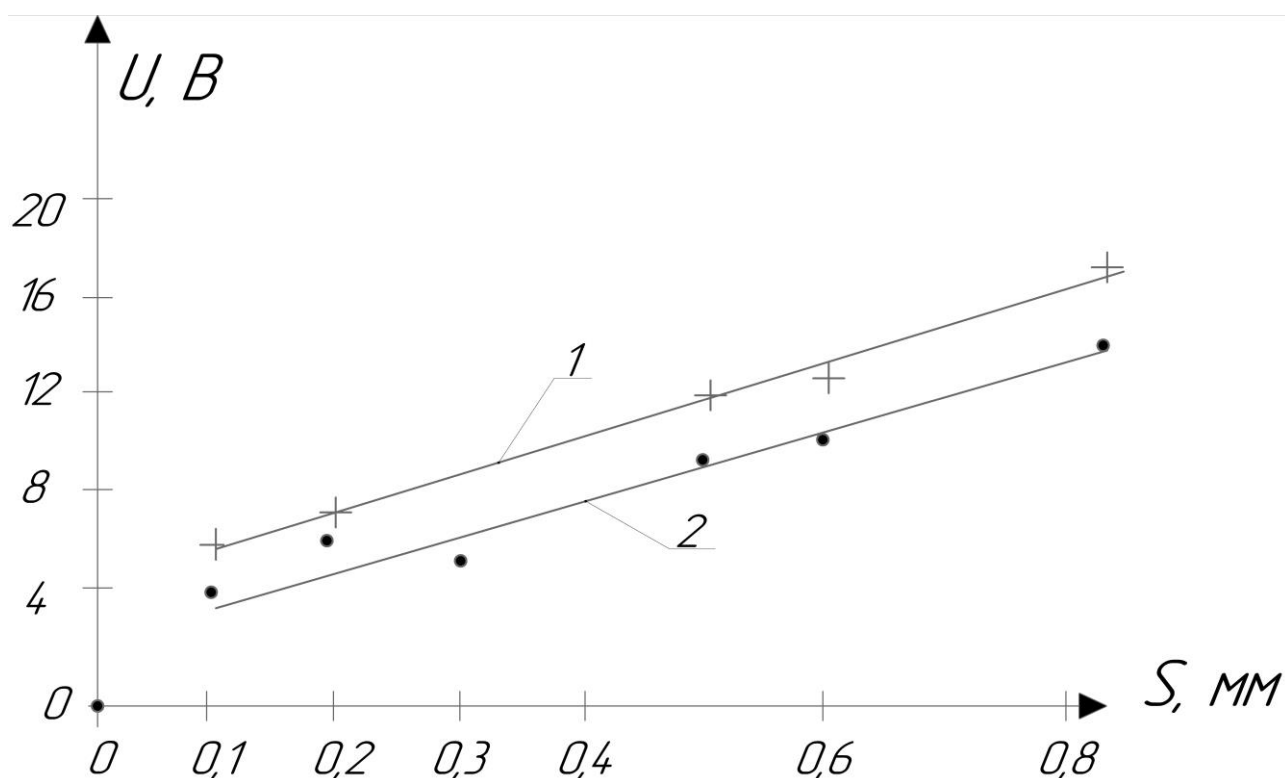


Рисунок 3.7 – Выбор напряжения на электродах при различных значениях межэлектродного зазора случае комбинированной обработки с применением шаблона (1) или без него (2)

Наличие диэлектрического шаблона (1 на рисунке 3.7) изменяет напряженность электрического поля в межэлектродном зазоре и снижает вероятность возникновения коротких замыканий между электродами, поэтому появляется возможность повысить напряжение между электродами при сохранении стабильности процесса. Расчетные зависимости напряжения на рисунке 3.7 выполнены без учета потерь напряжения в зазоре, изменяющимся в узком диапазоне. Точками показаны экспериментальные результаты, полученные на имитаторе при режимах обработки, идентичных расчетным значениям, что позволяет численно оценить расхождения результатов. В рассматриваемом на рисунке 3.7 интервале зазоров расхождение показателей не превысило 12%, что вполне допустимо, если учитывать возможное колебание начальных и текущих условий обработки, включая смещение шаблона в зазоре.

Оценку достоверности результатов расчета гидравлических режимов выполняли путем регулирования скорости течения электролита в зазоре величиной

давления жидкости на входе в канал без учета изменения противодействия (рисунок 3.8).

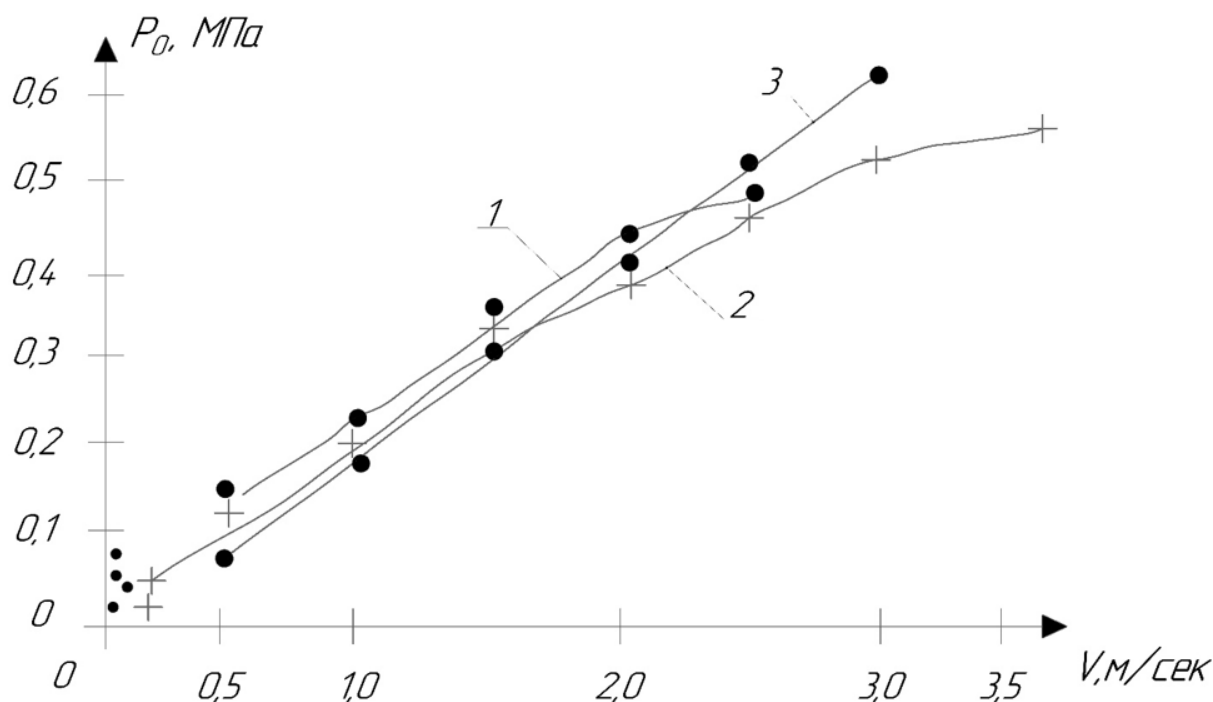


Рисунок 3.8 – Регулирование скорости течения жидкости перед началом углубления в канале по давлению (P_0) на входе в межэлектродный зазор.

1 - давление электролита на базе нейтральных солей при обработке углублений в каналах деталей из бронзы; 2 - то же в технической воде; 3 - расчетная зависимость для электролита

Исходные данные для расчета давления и измерения его величины при экспериментах (показано точками на рисунке 3.8):

Состав электролита для комбинированной обработки бронзы [73]:

- раствор нитрата натрия в воде-до 25 %;
- соли азотной кислоты 7-10 г/л.

Плотность тока - 5-6 А/см²

Средняя скорость течения электролита через межэлектродный зазор
1,5-1,7 м/сек.

Давление P_0 для получения рекомендуемой скорости течения электролита для рассматриваемого варианта изготовления углубления по шаблону составляет 0,35-

0.45 МПа. В этом диапазоне рассеивание размеров по давлению не превышает 5-6 %, что подтверждает правомерность полученных зависимостей и применения их для моделирования процессов многоместной обработки углублений по шаблону.

Выводы по главе

1. Решена задача управления потоком при комбинированной обработке с течением жидкости через шаблоны в предложенных электродах-инструментах с учетом расширенного использования турбулизаторов в каналах охлаждающей системы с различным доступом инструмента в зону обработки.

2. Расширено понятие полезности для оценки свойств механизма течения жидкости через рабочую зону шаблона при использовании его в качестве позиционирующего устройства совместно с электродом-инструментом, применив критерий подобия к механизму выноса тепла в системах охлаждения и массовыноса в комбинированных методах обработки с электрохимическим воздействием, что дало возможность наметить новые направления исследований по интенсификации работы теплообменных агрегатов и для повышения их долговечности.

3. Обоснованы предложения по оптимизации размещения турбулизаторов в каналах охлаждения и раскрыты возможности высокопроизводительной обработки углублений в местах с ограниченным доступом инструмента.

4. Заложена технологическая база для проектирования многоместных шаблонов в электродах-инструментах с параметрами, не ниже приведенных в заявке на инструмент при всех этапах его создания и использования.

Глава 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ

4.1 Конструкция и технологические возможности безызносного электрода-инструмента

На уровне изобретения с участием соискателя разработан «Многоместный сборный электрод-инструмент для электрохимической размерной обработки по шаблону углублений, образующих турбулизаторы в донной части и на ребрах охлаждающих каналов теплонапряженных машин и технологичный способ его изготовления».

Изобретение относится к области машиностроения и может применяться в жидкостном ракетном и авиационном двигателестроении для интенсификации охлаждения горячей зоны теплонапряженных машин при использовании технологичного способа его изготовления электрохимической размерной обработкой по шаблону.

Наиболее близким к предлагаемому патенту является патент на изобретение 2573465 [54] «Способ электрохимического изготовления углублений, образующих турбулизаторы на ребрах и в донной части охлаждающих каналов теплонапряженных машин и устройство для его осуществления» направленный на получение углублений, образующих турбулизаторы, ускоряющие вынос тепла где для изготовления шаблона используется эластичный материал, позволяющий за счет внешних растягивающих усилий растягивать шаблон до получения требуемого межэлектродного зазора, а устройство для применения заявленного способа выполняют с использованием датчика изменения толщины шаблона, регулятора продольного перемещения электрода-инструмента, блока для реализации управления, обеспечивающего возможность прижатия шаблона к донной части канала без изменения зазора со стороны ребер канала.

К недостаткам способа и устройства относится применяемый эластичный материал шаблона, который за счет значительного растяжения в местах

размещения сквозных углублений, применительно к охлаждающим системам снижает точность обработки углублений и ограничивает область применения электрохимической размерной обработки преимущественно прямолинейными участками каналов, хотя турбулизаторы востребованы на участках каналов различного профиля и от способа их обработки зависит трудоемкость изготовления каналов, а также технологичность всей охлаждающей системы изделия.

Предлагаемое изобретение направлено на устранение указанных недостатков и позволяет расширить область использования комбинированной обработки с электрохимическим воздействием электрического поля по шаблонам, повысить технологичность, ресурс и надежность изделий, а при производстве жидкостных ракетных двигателей повысить количество их безотказных пусков.

Это достигается тем, что в электроде-инструменте длина каждого маркированного по длине электрода-инструмента, фрагмента, назначается из условия сохранения межэлектродного зазора в пределах, обеспечивающих выполнение устойчивого процесса одновременного получения электрохимической размерной обработкой заданных углублений в каналах по гибким диэлектрическим шаблонам с выступами на границах переходных участков сквозных отверстий шаблона, имеющих размеры по контуру углублений в канале, уменьшенные на размеры поднутрения на величину, формирующуюся при наибольшем межэлектродном зазоре в процессе анодного растворения корпуса горячей зоны, служащей анодом при электрохимической размерной обработке углублений, где для обеспечения герметичности межэлектродного зазора со стороны заглушки один из зажимов на полке катодного устройства установлен напротив полосы герметичного покрытия на внутренней стороне катодного устройства с толщиной не более высоты выступов, а толщина металлического листа катодного устройства ограничена половиной ширины охлаждающего канала без удвоенной максимальной величины выступов и толщин шаблона. На рисунке 4.1 приведен разрез электрода-инструмента.

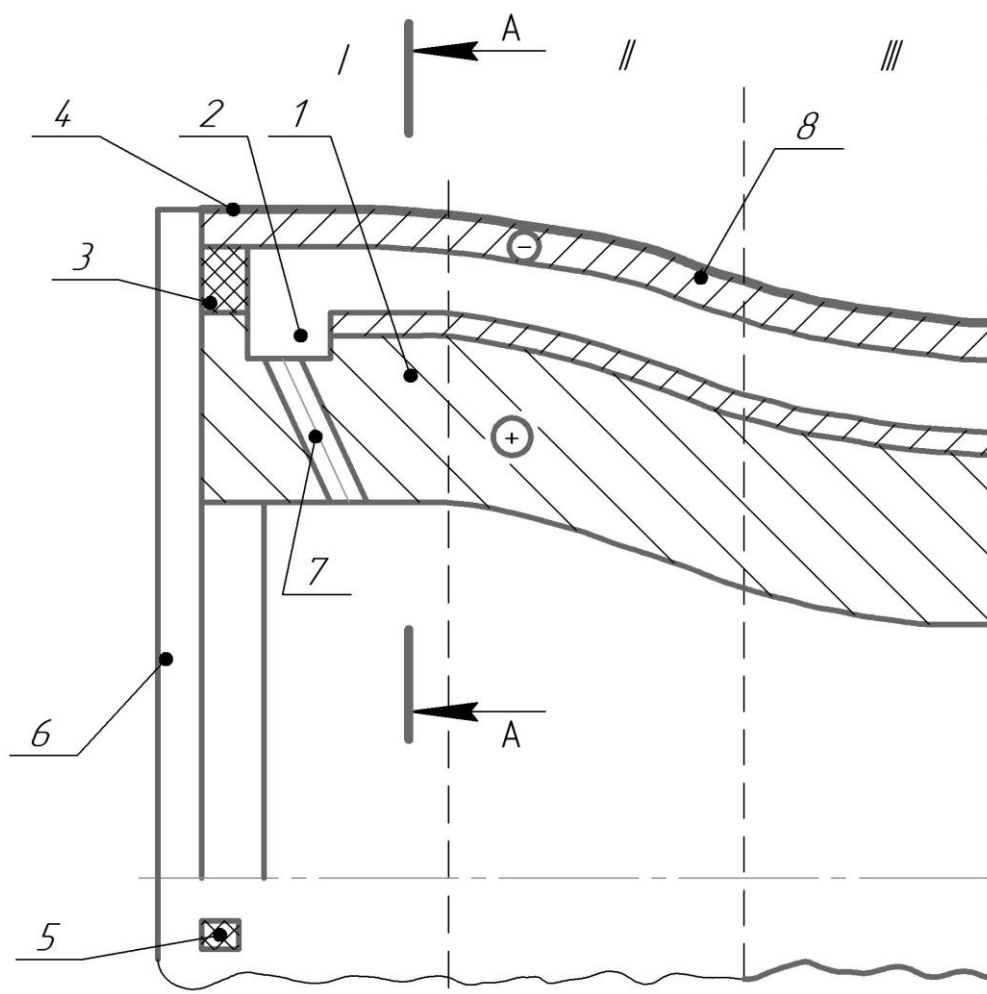


Рисунок 4.1 – Разрез электрода-инструмента

1 - корпус камеры сгорания; 2 - кольцевая проточка; 3 - полоса герметичного покрытия; 4 - наружная поверхность катодного устройства; 5 - зажим для закрепления половин фрагментов; 6 - заглушка для обеспечения направления движения жидкого электролита в канале; 7 - сквозное отверстие в корпусе камеры сгорания; 8 - катодное устройство

I, II, III – фрагменты (участки) электрода-инструмента, требуемые для сборки шаблона и катодного устройства в единый узел на макете камеры сгорания

Многоместный сборный электрод-инструмент включает (рисунок 4.1) металлический корпус 1 горячей зоны камеры сгорания, где на ней имеется кольцевая проточка 2 для выравнивания параметров течения охлаждающей жидкости со сквозным отверстием 7 внутри корпуса 1 камеры сгорания.

На рисунке 4.2 дано сечение по А-А фрагмента электрода-инструмента.

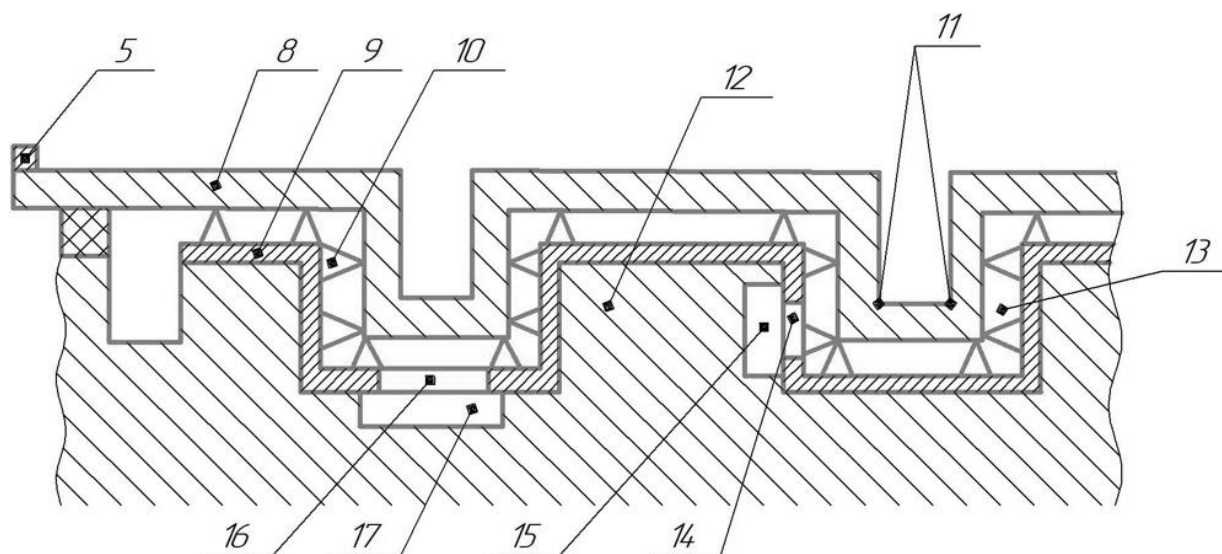


Рисунок 4.2 – Сечение по А-А фрагмента электрода-инструмента (смотреть рисунок 4.1)

8 - катодное устройство; 9 - гибкий диэлектрический шаблон; 10 - точечный выступ; 11 - один из фрагментов изогнутого катодного устройства; 12 - турбулизатор; 13 - охлаждающий канал; 14 - сквозное отверстие в шаблоне напротив ребра канала; 15 - углубление на ребре турбулизатора; 16 - сквозное отверстие, противоположащее донной части шаблона; 17 - углубление в донной части канала.

На наружной поверхности вдоль оси корпуса 1 горячей зоны имеются охлаждающие каналы 13 (рисунок 4.2) с углублениями 15;17, образующие турбулизаторы 12 в донной части и на боковой поверхности ребер каналов 13 постоянного и переменного сечения с прямой и криволинейной осью, изменяющие характеристики течения охлаждающей жидкости и интенсифицирующие вынос тепла через каналы 13 с труднодоступными для обработки углублениями 15;17 турбулизаторов в каналах 13 корпуса 1 горячей зоны машины, где размещен выполненный из двух сопрягаемых сборкой половин гибкий диэлектрический шаблон 9 со сквозными отверстиями 14;16 в местах, противоположащих

расположению углублений 15;17 в канале 13, изогнутый по профилю охлаждающего канала в корпусе 1, имеющий точечные выступы 10 для образования межэлектродного зазора для протекания токопроводящей рабочей жидкости при электрохимической размерной обработке углублений в каналах и состоящий из фрагментов I,II,III (рисунок 4.1) вдоль оси электрода-инструмента. На шаблоне 9 (рисунок 4.2) размещено катодное устройство 8 из листового материала, разделенное на аналогичные фрагменты, состоящее из двух сопрягаемых половин, изогнутых по профилю охлаждающих каналов 13 и закрепляемых между собой зажимами 5 (рисунок 4.1) на наружной поверхности 4 катодного устройства 8 с полосой герметичного покрытия 3 и заглушкой 6 для обеспечения направления протекания при электрохимической размерной обработке токопроводящей жидкой рабочей среды (электролита) над сквозными отверстиями 14;16 (рисунок 4.2) в шаблоне 9.

На рисунке 4.3 показан фрагмент развертки шаблона.

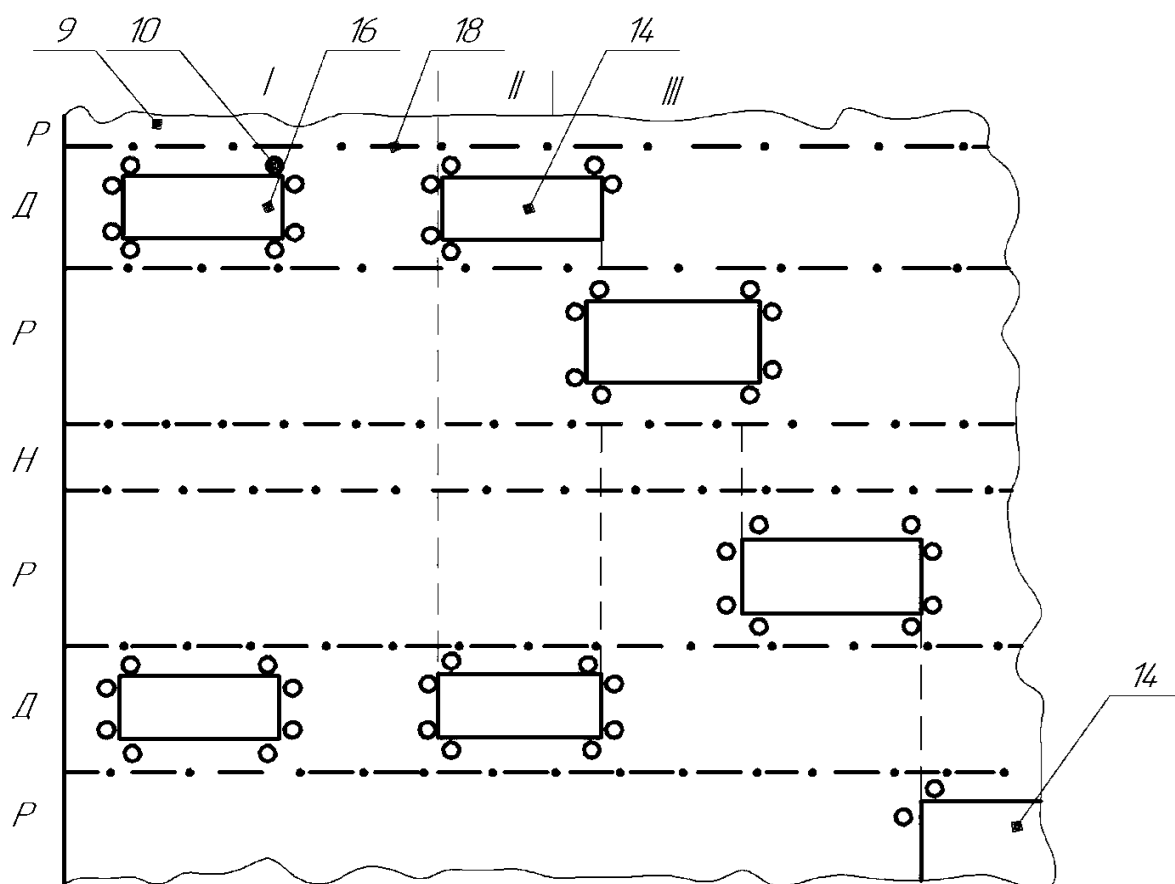


Рисунок 4.3 – Фрагмент развертки шаблона. (смотреть рисунки 4.1;4.2)

На фрагменте развертки шаблона 9 (рисунок 4.3) линии изгиба 18 шаблона 9 дают координаты мест размещения на шаблоне 9 сквозных отверстий 14 и 16, а также точечных выступов 10. На рисунке 4.3 Р-поверхность шаблона 7, противостоящая ребру канала в корпусе; Д-поверхность шаблона, противолежащая донной части канала; Н - поверхность шаблона 9, противолежащая наружной поверхности ребра канала в корпусе, I-участок шаблона 9 с каналом малого изгиба оси в корпусе наибольшего сечения и течением жидкой среды над турбулизаторами в донной части канала; II - участок шаблона 9 с каналом снижающегося переменного сечения корпуса, переходным характером течения жидкой среды над турбулизаторами и переменной величиной выступов 10 III-участок шаблона 9 с наименьшим сечением участка корпуса, изменением межэлектродного зазора в пределах допуска на протекание комбинированного процесса обработки по шаблону и течением жидкой среды над турбулизаторами на боковой поверхности ребра канала 13 в корпусе.

4.2 Проектирование технологического процесса изготовления турбулизаторов по многоместным многоразовым диэлектрическим шаблонам

Технологичный способ создания электрода-инструмента на рисунке 4.1 осуществляется в следующей последовательности выполнения технологического процесса: по профилю охлаждающих каналов 13 (рисунок 4.2) перед началом обработки в них углублений 15; 17 между турбулизаторами 12 на каждый фрагмент шаблона до его изгиба на гладкую сторону наносят слой легкоудаляемого покрытия толщиной не более минимальной величины начального межэлектродного зазора, а в каналах 13 контрастным не засыхающим красителем, наносят контур углублений 15; 17, после чего каждый фрагмент шаблона 9 изгибают по линиям изгиба 18 (рисунок 4.3) выступами 10 (рисунок 4.2) наружу по форме половинок фрагментов изогнутого катодного устройства 11, вставляют его внутрь половинки устройства 8, образуя комплекс, сжимают соседние части с каналом малого изгиба оси в корпусе наибольшего сечения, сохраняя покрытие на

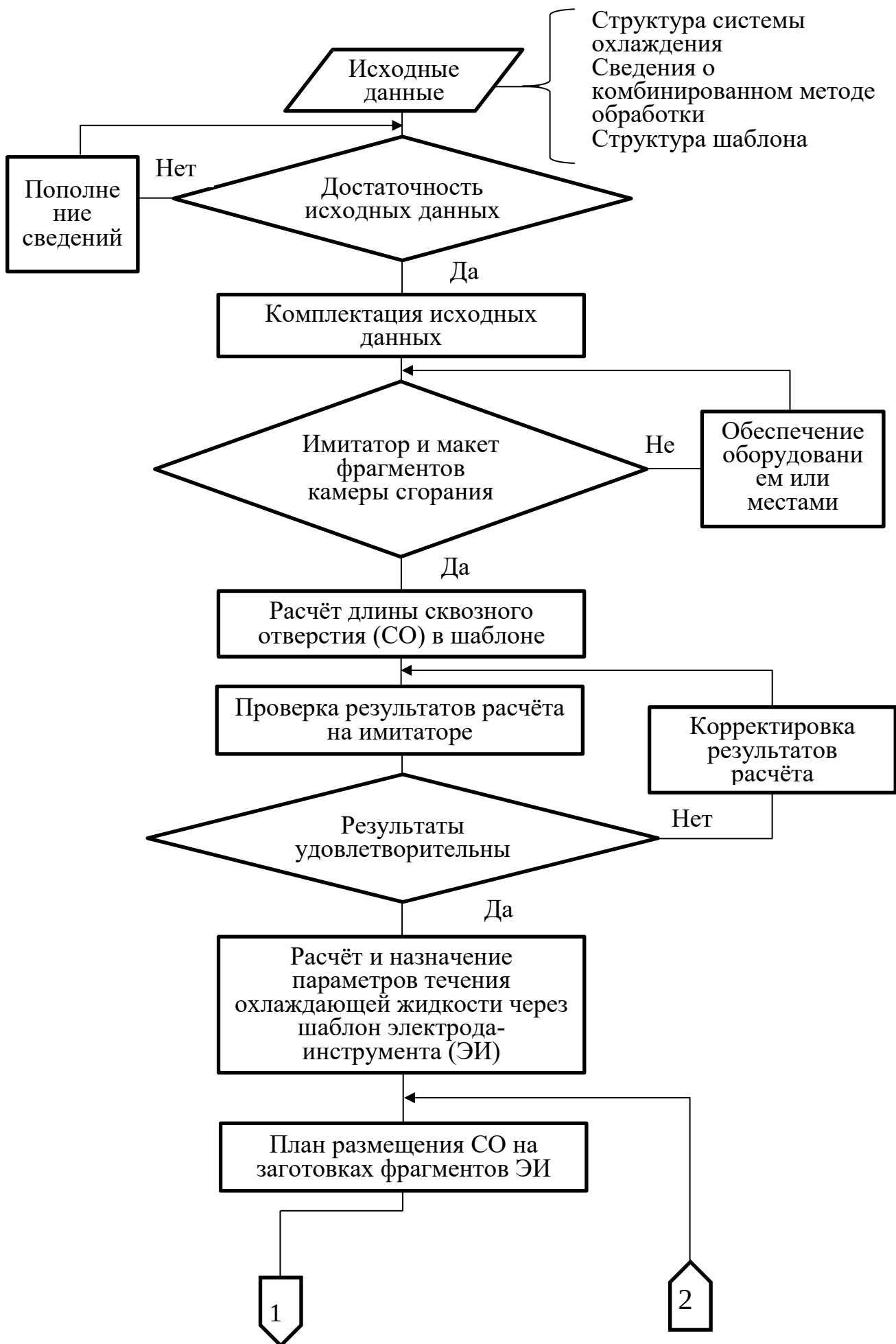
шаблоне 9, вставляют комплекс в канал 11, расширяют ребра катодного устройства 8 в месте изгиба до получения на покрытии гладкой поверхности шаблона 9 оттиска не засыхающим красителем контура углублений 15; 17, после чего снова сжимают соседние части шаблона 9 с частями 11 устройства 8 и вынимают шаблон 9 с катодным устройством 8 из канала 13. На следующем этапе изготовления электрода-инструмента полученный контур углублений 15; 17 на шаблоне 9 смещают внутрь на величину поднутрения при электрохимической размерной обработке по диэлектрическому шаблону 9, корректируют форму и размещение сквозных отверстий 14; 16 на шаблоне 9, наносят на него выступы 10, удаляют покрытие с шаблона и краситель из каналов, далее вставляют фрагменты половинок катодного устройства 8 с шаблоном 9 в рабочее положение в канале 13 корпуса, закрепляют половинки катодного устройства 8 зажимами 5 (рисунок 4.1) на отогнутых полках 4, один из которых устанавливают над поверхностью покрытия 3 катодного устройства 8, и после сборки электрод-инструмент готов к применению.

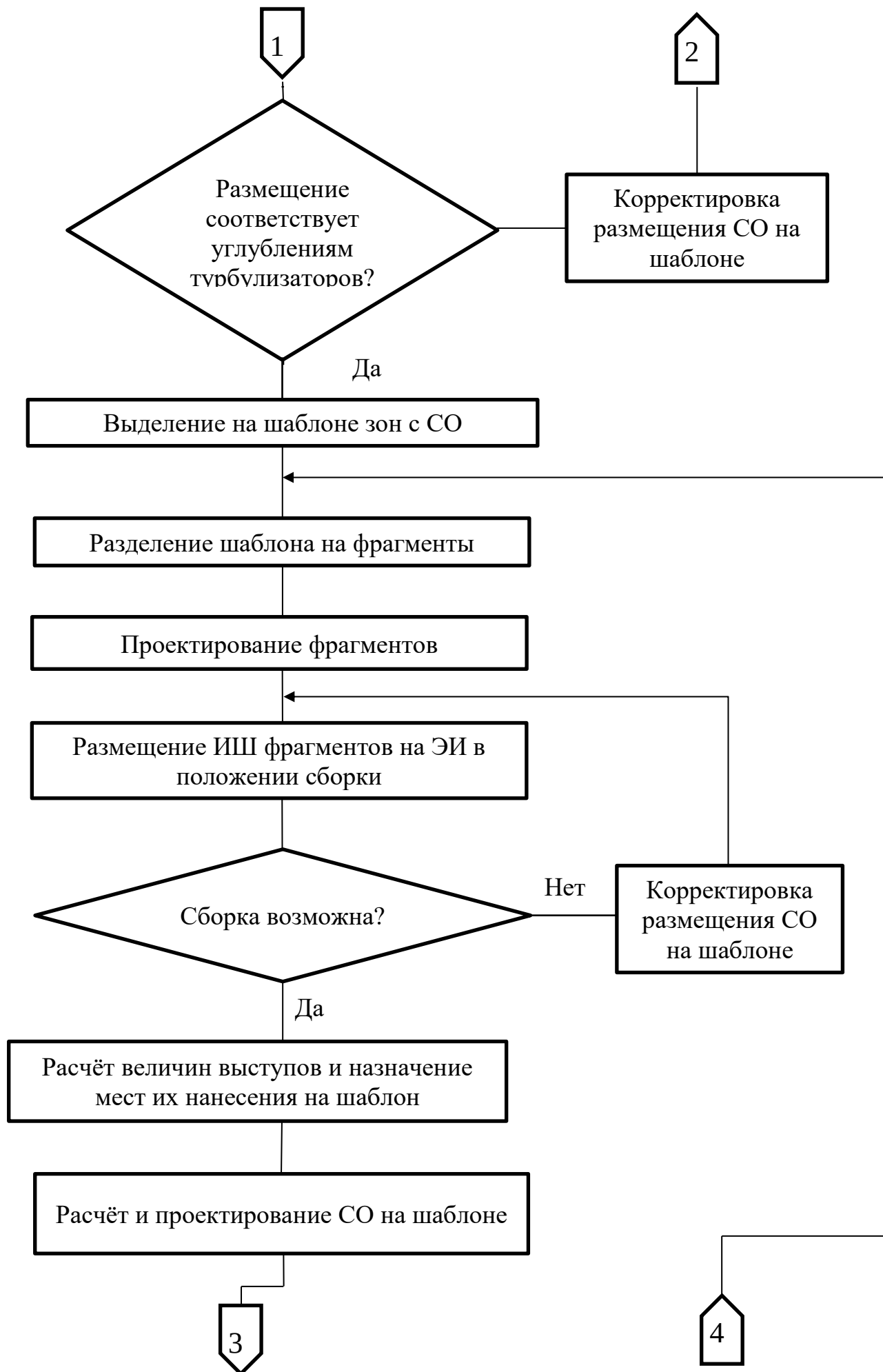
Многоместный сборный электрод-инструмент для электрохимической размерной обработки по шаблону углублений, образующих турбулизаторы в донной части и на ребрах охлаждающих каналов на примере камеры сгорания ЖРД применяют в следующей последовательности: заглушают внутреннюю полость корпуса камеры сгорания заглушкой 6 (рисунок 4.1) с изготовленными охлаждающими каналами 13 (рисунок 4.2) без турбулизаторов 12 со сквозными отверстиями 14;16 в собранном электроде-инструменте, подводят без давления жидкую рабочую среду (электролит) для электрохимической размерной обработки через отверстие 7 (рисунок 4.1) проливают её в проточку 2, где поток герметизируется покрытием 3, выравнивается по давлению между каналами 13 поступает на выход. Плавно повышают давление рабочей среды до получения равномерного потока на выходе из каналов. Режимы обработки выбираются по рекомендациям [88], глава 10. Подключают источник питания для электрохимической размерной обработки к корпусу 1 (анод) (рисунок 4.1), к

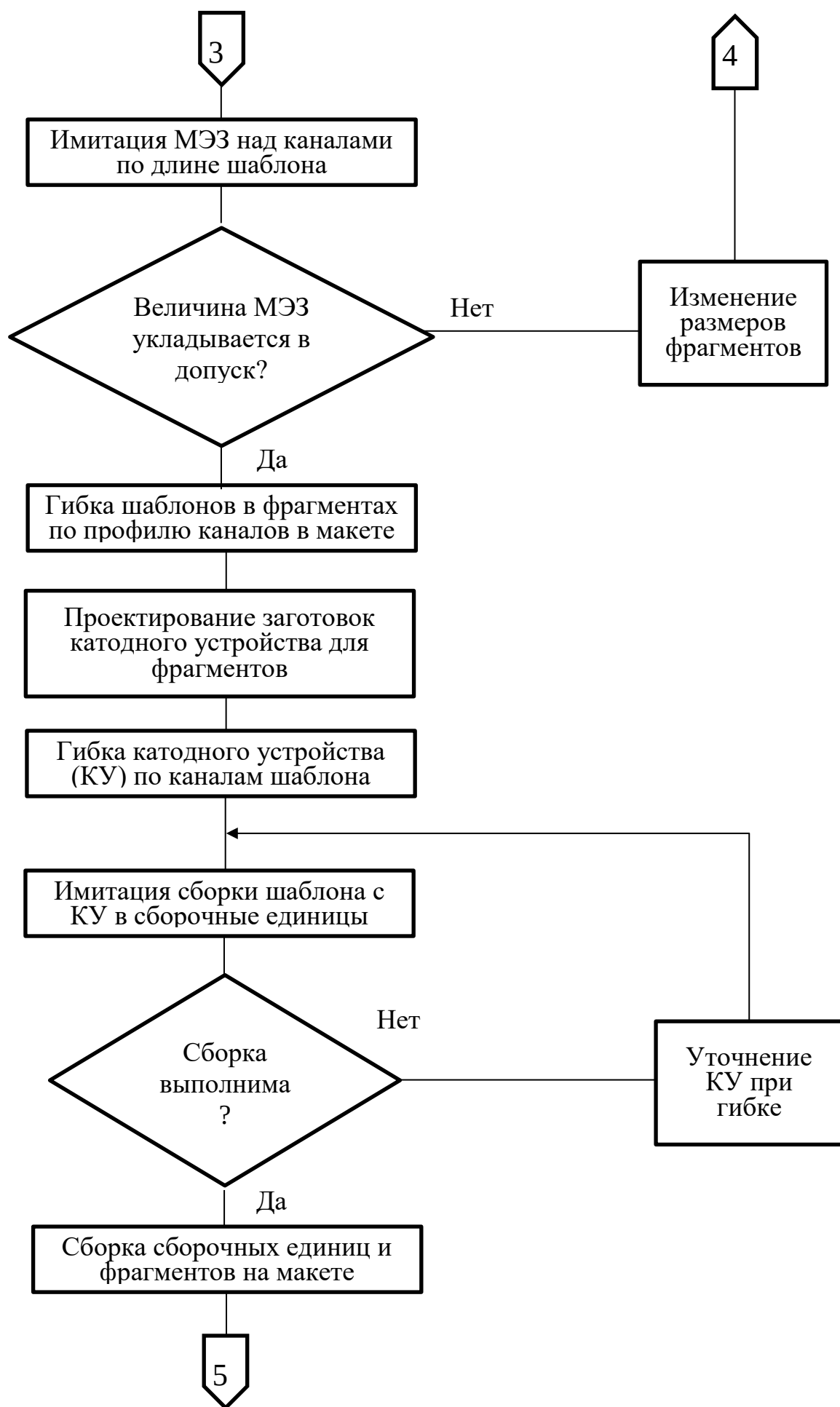
катодному устройству 8 и выполняют изготовление углублений 15; 17 (рисунок 4.2) по времени протекания процесса.

4.3 Алгоритм расчета, изготовления и сборки электрода-инструмента с шаблоном

В работе спроектирован (рисунок 4.4) алгоритм создания электрода-инструмента, включающий управление этапами выполнения действий разработчика при расчете параметров инструмента, обоснованы пути повышения эксплуатационных характеристик объектов производства.







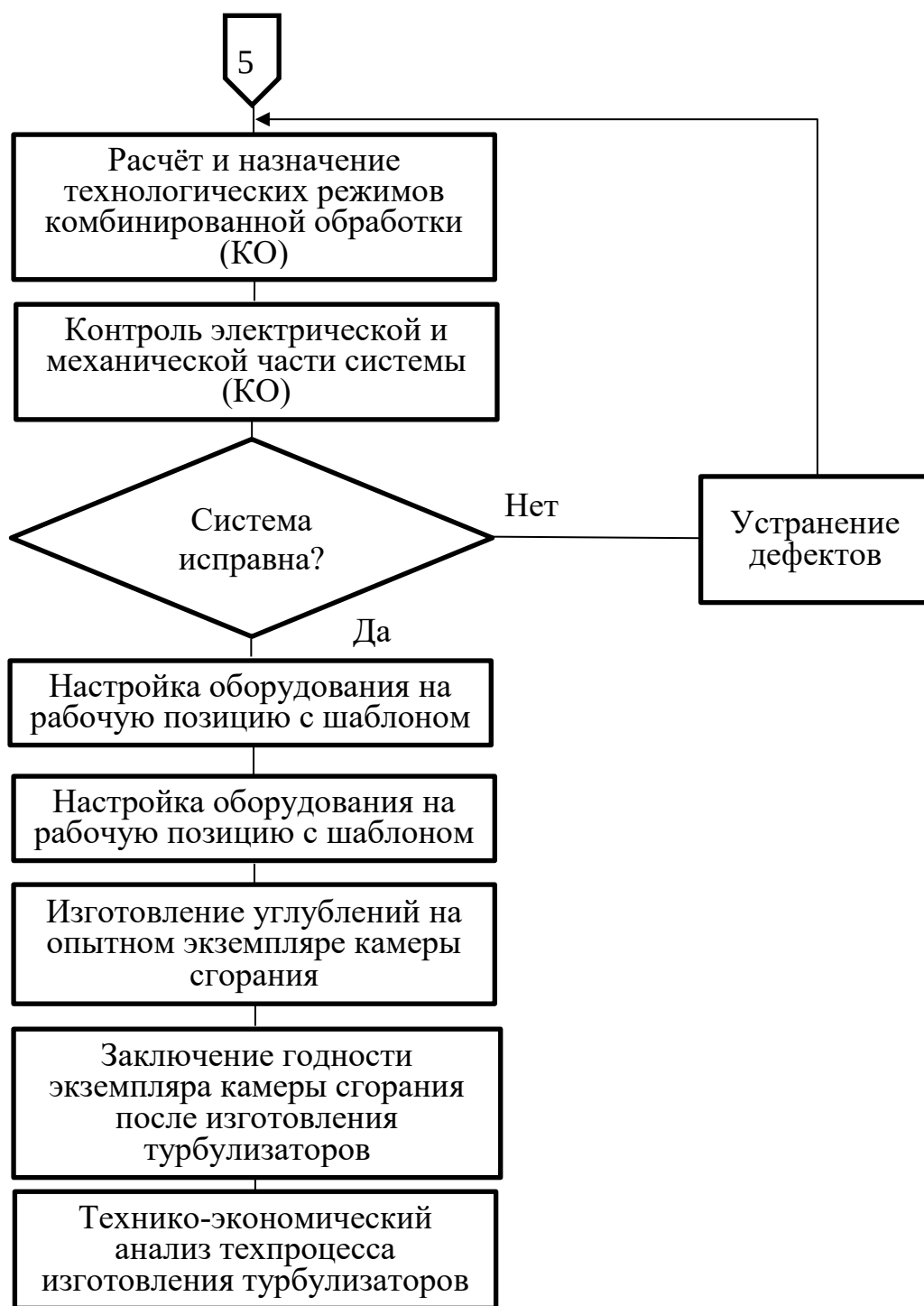


Рисунок 4.4 – Алгоритм создания и управления свойствами электрода-инструмента с гибким многоразовым диэлектрическим шаблоном

Алгоритм на рисунке 4.4 предназначен для управления действиями соискателя при решении задачи 2 с применением искусственного интеллекта. Для выполнения операций по расчету параметров, изготовлению составных частей электрода-инструмента, его сборки, испытания с применением современной технической базы требуется использовать исходную информацию, получаемую из технического задания на охлаждающую систему, создать последовательность проведения работ, спроектировать технологический процесс изготовления, сборки, испытания электрода-инструмента, выполнить операции по его совершенствованию, провести оценку технологичности разработанного комбинированного метода обработки по технико-экономическому анализу результатов исследования. Исходные данные включают:

- описание и обоснование структуры наиболее эффективных систем охлаждения горячей зоны жидкостных ракетных двигателей, анализ и обоснование выбора для расчета параметров существующих и перспективных систем. К ним относятся: размещение в охлаждающих каналах турбулизаторов, форма и размеры углублений, режимные параметры, результаты испытания системы и средств технологического оснащения;

- совместимость режимов используемых методов комбинированной обработки по шаблонам с характеристиками системы охлаждения на примере камеры сгорания жидкостного двигателя с применением турбулизаторов на участках каналов с различным доступом инструмента в зону обработки;

- структура и технологический процесс изготовления шаблона, катодного устройства, расчет и обоснование использования технологических режимов, управление процессом обработки при использовании в разработанных электродах-инструментах на современном этапе создания ракетных двигателей закономерностей теплопереноса. для материалов на базе медных сплавов

- более подробные рекомендации по использованию алгоритма можно получить в [73;86; публикациях соискателя].

4.4 Оценка уровня и поддержание свойств турбулизаторов. при эксплуатации теплообменных устройств

По рекомендациям [24;5 и др.] величина углублений турбулизаторов выбирается в пределах половины толщины стенки донной части и величины ребра канала. При обработке с шаблонами зазор между катодом и шаблоном, определяемый выступами на нем, может изменяться в диапазоне от 0,05 до 0,6 мм, а расстояние до углубления возрастает на толщину шаблона (0,05-0,3 мм). Здесь обеспечивается стабильное протекание процесса удаления припуска и требуемая интенсивность съема металла. Однако утонение стенки или ребра в месте расположения углублений может вызвать перераспределение напряжений в камере сгорания и снижение долговечности работы всего изделия. В [85;73 и др.] по результатам испытаний предлагается оценивать работоспособность изделий. Сравнительные усталостные испытания выполняются на стандартных образцах из бронзы, типа применяемой для корпуса камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей. За период выполнения операции на образце изготавливали надрез глубиной 0,5 мм, который имитировал углубление в начале турбулизатора у электрода-инструмента.

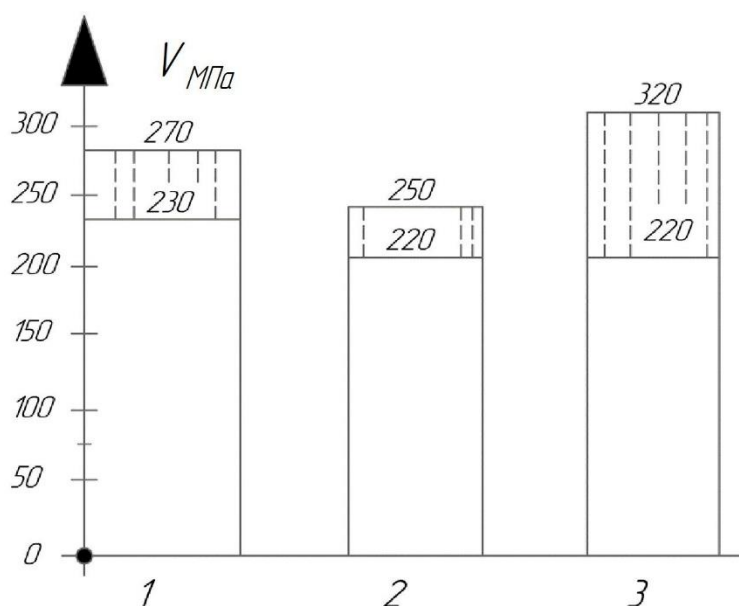


Рисунок 4.5 – Предел прочности при усталостных испытаниях на изгиб с кручением стандартных образцов из бронзы БрХ0,7 на базе $3 \cdot 10^3$ циклов

На рисунке 4.5 под пунктом 1 обработка надреза выполнялась электрохимической обработкой без использования шаблона дисковым электродом-инструментом с межэлектродным зазором 0,3мм при напряжении на электродах 11 В. Операцию выполняли с вращением образца на оборотах 50 об/мин и подачей диска на врезание со скоростью 5 мм/мин.

Надрезы у образцов второй группы на рисунке 4.5 выполнялись комбинированной обработкой неподвижными электродами-инструментами по диэлектрическим шаблонам толщиной 0,05 мм с использованием режимов: межэлектродный зазор -0,05 мм; напряжение на электродах 11 В.

Третья группа образцов выполнена по шаблону толщиной 0,1 мм, неподвижным электродом-инструментом. Режим обработки: зазор до шаблона-0,2 мм; напряжение на электродах 15 В.

Испытания на рисунке 4.5 проведены по ускоренной процедуре на базе $3 \cdot 10^3$ при использовании технических средств и режимов обработки, охватывающих основные варианты обработки образцов с надрезами, а полученные результаты подтверждают правомерность проведенных теоретических исследований, на базе которых решались задачи 2; 3 работы.

Выводы по главе

1. Разработана научно обоснованная система проектирования рабочей зоны диэлектрических шаблонов в электродах- инструментах нового типа с многократным их использованием в различных конструкциях горячей зоны изделий с турбулизаторами в каналах охлаждения и возможностью корректировки профиля по результатам испытаний, что позволяет интенсифицировать эффективность теплоохлаждения на стадии создания и освоения новых теплонапряженных агрегатов, в частности перспективных ракетных двигателей.

2. Предложены пути совершенствования новых видов электродов-инструментов путем научного обоснования численных методов проектирования и использования цифрового двойника при совершенствовании рабочей зоны гибких

шаблонов, что востребовано в машиностроении при создании перспективных теплонапряженных машин с эффективными системами жидкостного охлаждения и применением турбулизаторов для управления потоком.

3. Созданы средства технологического оснащения, которые позволяют расширить область многоразового использования шаблонов на родственные отрасли машиностроения, где они обладают высокой производственной технологичностью и способны обеспечить повышение эксплуатационных показателей создаваемых теплонапряженных изделий.

Глава 5 НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ЗОНЫ ИЗДЕЛИЙ НА ЭТАПАХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

5.1 Новые методы и технологические процессы создания изделий с эффективными охлаждающими системами

Выбор метода получения искусственной шероховатости, формирующей турбулизаторы, зависит от множества факторов: геометрических размеров изделия, материала детали, специфики работы детали с искусственной шероховатостью, экономическая целесообразность применения высокотехнологичных методов. Рассмотрим примеры актуальных технологий получения искусственной шероховатости, применяемых на предприятиях различных отраслей машиностроения.

Способы нанесения искусственной шероховатости на поверхность агрегатов турбовентиляторных и турбовинтовых двигателей с помощью лазерных методов обработки представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Способы изготовления турбулизаторов с помощью лазерных методов обработки

Метод	Тип лазера	Точность	Применение
Лазерная абляция	Ультракороткий импульсный	До 1 мкм	Сверхточные структуры
Лазерное структурирование	Волоконный (ИАГ)	5–50 мкм	Аэродинамические профили

Продолжение таблицы 5.1

Прямое лазерное интерференционно е структурирование (DLIP)	Наносекундны й	0,5–10 мкм	Регулярн ые микрореш етки
--	-------------------	---------------	------------------------------------

Применение данных методов позволяет изготовить деталь с требуемым профилем искусственной шероховатости соблюдая высокие требования по точности геометрических размеров, так и не создавая дефектного слоя на обрабатываемой поверхности.

При использовании новых технологий требуется преодолеть сложности исполнения намеченных решений, включающих:

1. Дороговизна и сложность обслуживание дорогостоящего оборудования;
2. Необходимость использования инертных газов для минимизации нарушений качества поверхностного слоя деталей в процессе обработки;
3. Потребность в специальной подготовке исполнителей и инженерно-технического персонала. При этом следует учитывать, что доля трудоемкости выполнения операции с использованием лазерной техники не превышает нескольких процентов, поэтому при подготовке исполнителей предусмотреть возможность быстрой переориентации исполнителей на родственные работы по изготовлению продукции.

Проведенные эксперименты доказывают перспективность работы в направлении интенсификация охлаждения горячей зоны летательных аппаратов и других видов теплообменных аппаратов за счет создания и применения локальных теплообменников с экономически обоснованными параметрами систем для повышения эксплуатационных характеристик перспективных изделий.

5.2 Перспективные пути выполнения исследований по интенсификации процессов охлаждения и ожидаемые результаты работ по совершенствованию теплонапряжённых машин в машиностроении

Приведенные в работе исследования позволили наметить перспективные пути дальнейших работ по совершенствованию систем охлаждения теплонапряжённых машин в машиностроении. В основу анализа перспективных вариантов применения турбулизаторов на рисунке 5.1 положен опыт и экспериментальные исследования, полученные на имитаторе и установке для испытаний изделий при приемке их в эксплуатацию, а также дальнейшее расширение исследований по пути совершенствования результатов в рамках решенных задач 3 и 4 представленной работы.

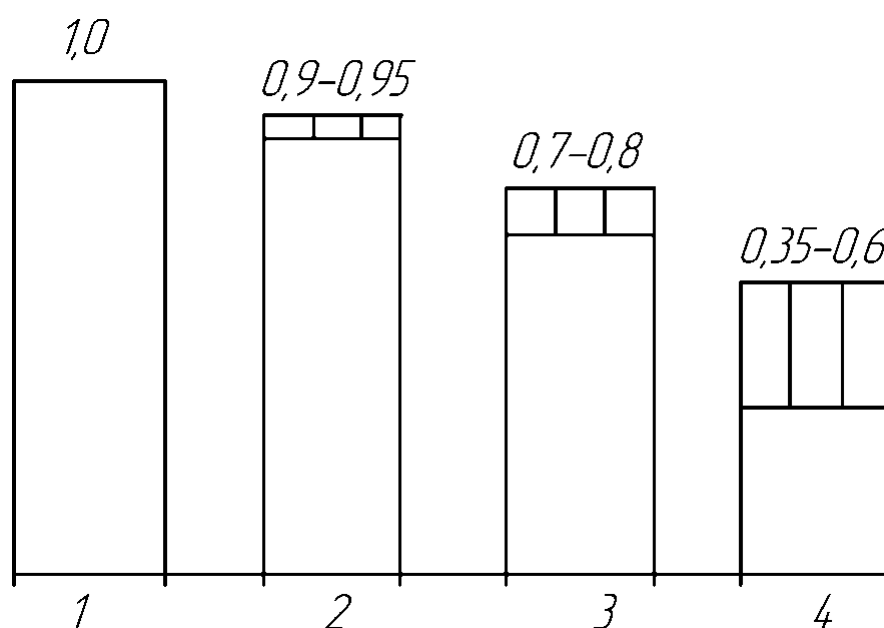


Рисунок 5.1 – Работоспособность системы охлаждения с турбулизаторами:

1. На донной и боковых поверхностях каналов, при научно обоснованных местах размещения и количестве углублений
2. На донной и боковых поверхностях каналов с регулярным назначением мест размещений и количества углублений
3. То же без турбулизаторов на боковой поверхности каналов
4. Без турбулизаторов в каналах

Проведенный по данным на рисунке 5.1 с использованием сведений из [24] анализ технологичности вариантов показал результативность технико-экономических исследований для планирования сроков выполнения и затрат на изготовление турбулизаторов в перспективных изделиях с применением комбинированных методов обработки.

5.3 Технико-экономический анализ эффективности использования предложенных электродов-инструментов для создания охлаждающих систем

Эффективность использования, созданного многоместного сборного электрода-инструмента показана на примере электрохимической размерной обработки по шаблону углублений, образующих турбулизаторы в донной части и на ребрах охлаждающих каналов теплонапряженных машин, и технологичного способа его изготовления.

Сведения из технического задания и результатов расчета параметров при выполнении представленной работы: на корпусе камеры сгорания ракетного двигателя из материала БрХ08 в охлаждающих каналах требуется выполнить в донной части 81 турбулизатор с шириной 1,8 мм и глубиной $0,5^{+0,1}$ мм, а на поверхности 12 рёбер сделать углубления шириной 10 мм и глубиной $0,4^{+0,2}$ мм. При проектировании турбулизаторов использовать покрытия марки «Штрих» и контрастный не засыхающий краситель на базе графитовой смазки с добавлением мелкодисперсного графита.

Режимы комбинированной электрохимической обработки: напряжение на электродах 14 В, рабочая токопроводящая жидкая среда-10% NaNO_3 с добавкой 1,5 % KBr , давление подачи рабочей жидкости через зазор 0,4-0,5 МПа, начальный межэлектродный зазор между поверхностью канала в камере сгорания и в имитаторах изменялся от 0,05 мм до 0,2 мм в зависимости от профиля охлаждающего канала или его фрагмента. Машинное время обработки с турбулизаторами по шаблону 1- 1,2 минуты.

Параметры шаблона-лавсановая пленка толщиной 0,05 мм; параметры катодного устройства в имитаторе – материал медь марки М; толщина листа - 0,3 мм.

Базовый процесс: при получении турбулизаторов в донной части каналов изделий с аналогичными параметрами выполнялся комбинированной электрохимической обработкой трёхместным медным инструментом, штучное время составляло 3,7 минут или 240 минут на комплект.

Результаты огневых испытаний и испытаний на имитаторе: при величине углублений в донной части канала – $0,5 \pm 0,1$ мм, на рёбрах $0,42^{-0,05}$ мм, что соответствует требованиям чертежа камеры сгорания. Измерение температуры камеры сгорания на её поверхности после огневых испытаний с одинаковым расходом охлаждающей среды и топлива (в виде керосина) показало снижение температуры на 100-150К, что служит основанием для пересмотра ресурса камеры сгорания в сторону повышения для достижения допустимого количества пусков с двигателем до 1,5-2,0 раз.

Трудоёмкость изготовления турбулизаторов по шаблонам составила 18 минут на комплект, что позволило снизить трудоёмкость изготовления комплекта более, чем в 38 раз. Таким образом, задачи, поставленные в работе для достижения поставленной цели выполнены в полном объеме.

5.4 Место предлагаемых технологических методов и устройств в долгосрочных программах создания теплонапряженных наукоемких машин

Результаты приведенных исследований востребованы во многих отраслях машиностроения. На рисунке 5.2 приведено устройство для интенсивного охлаждения жидкости турбулизаторами в трубах теплообменника парогенератора водо-водяного энергетического реактора.



Рисунок 5.2 - Теплообменник парогенератора водо-водяного энергетического реактора с каналами для охлаждения жидкости

В начальный период создания углублений были опробованы различные методы их изготовлению, пригодные для использования при ограниченном доступе инструмента в зону обработки. Они помогли решить проблему в целом. Однако индивидуальная обработка не позволила повысить производительность операции до уровня, требуемого заказчиком.

Решение было найдено после использования многоразового шаблона, при котором ограничение по трудоемкости было снято, в частности при выполнении плановых ремонтных и профилактических мероприятий.

Полученный в энергетике опыт изготовления турбулизаторов показал место новых комбинированных методов обработки и обосновал перспективные пути совершенствования технологических мероприятий на перспективу.

Полученные результаты стали основанием для предприятия по освоению серийного производства с внедрением предлагаемой технологии комбинированной электрохимической размерной обработки углублений заданных параметров при изготовлении турбулизаторов в охлаждающих системах горячей зоны ракетных двигателей и электрода-инструмента предлагаемой конструкции (Акт принятия к внедрению в приложении1).

Расчёт экономической эффективности от внедрения рекомендаций по совершенствованию системы охлаждения и технологии многоместного изготовления турбулизаторов в охлаждающих каналах показал, что при полезной загрузке оборудования на предприятии по времени не ниже 50 % за период планового выпуска тепловых двигателей эффект составит не менее 218 млн. (двести восемнадцать миллионов) рублей.

Выводы по главе

1.Обоснована возможность применения в горячей зоне жидкостных ракетных двигателей принципиально новых технологических приемов и инструмента в зоне теплообмена создаваемых тепловых агрегатов разрабатываемых поколений техники.

2.Проведены (в основном теоретические) обоснования для перспективных исследований по интенсификации теплоохлаждения перспективных изделий стали базой для формирования направлений развития науки в области повышения качества отечественных наукоемких изделий.

3. Сформирована система технико-экономической оценки и научно обоснованный выбор варианта охлаждения двигателей для обоснования заложенных в программных документах показателей развития отрасли на перспективу.

Заключение

1. Решена принципиально значимая для машиностроения задача интенсификации охлаждения горячей зоны тепловых машин за счет освоения технологии изготовления труднодоступных для инструмента боковых локальных углублений в охлаждающих каналах на базе многоместной комбинированной обработки. Результаты исследований позволили до 2 раз повысить вынос тепла из горячей зоны изделий, на порядок и более снизить трудоемкость операций по изготовлению охлаждающей системы и применительно к двигателям летательных аппаратов создать предпосылки для проектирования современных изделий с заданными эксплуатационными характеристиками. Решенная задача стала научным развитием решаемой проблемы интенсификации работы систем охлаждения за счет создания в доступной для изготовления донной части охлаждающих каналов локальных турбулизаторов и стала дальнейшим этапом повышения эксплуатационных свойств жидкостных ракетных двигателей, в том числе для многоразовых пусков с целью поднятия их ресурса до 1,5 раз и более.

2. Расширена область использования эффективных систем жидкостного охлаждения с использованием турбулизаторов за счет разработанных технологических приемов и средств оснащения, включая безыносные многоразовые технологичные электроды-инструменты, позволившие на несколько порядков снизить трудозатраты на изготовление турбулизаторов, в том числе в труднодоступных зонах охлаждающих каналов и до 3-4 раз снизить время подготовки системы охлаждения на подготовку к запуску очередной системы охлаждения.

3. Успешно решены все поставленные задачи для достижения цели работы, а полученные результаты приняты к внедрению для изделий авиационно-космической техники и для подготовки специалистов всех уровней в области машиностроения.

По материалам проведенных исследований сформированы следующие **выводы**:

1. Разработан механизм совместной обработки турбулизаторов на донной части и локальных углублений на боковой поверхности каналов охлаждения как части единой системы тепло- и массовыноса, позволивший интенсифицировать процесс с использованием технологической схемы группового бесконтактного удаления припуска, что дало возможность повысить температуру в зоне горения топлива в ракетных двигателях, увеличить импульс тяги и количество надежных пусков изделия до уровня, заданного в программах развития ракетно-космической отрасли на перспективу.

2. Создан материал для патента на новый способ и инструмент для комбинированной обработки локальных интенсификаторов охлаждения на боковой поверхности каналов, принятый к использованию в создаваемых системах охлаждения перспективных изделий.

3. Теоретически и экспериментально доказана эффективность разработанных комбинированных методов обработки для получения локальных элементов интенсификации охлаждения горячей зоны ресурсосберегающих выпускаемых и осваиваемых двигателей летательных аппаратов и теплообменных аппаратов машиностроения.

Список литературы

1. Алемасов В.Е. и др. Теория ракетных двигателей: Учебник для студентов высших технических учебных заведений / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.: ил.
2. Альбом течений жидкости и газа: Пер. с англ. / Сост. М. Ван-Дейк. – М.: Мир, 1986. – 184 с., ил.
3. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с., ил. (Серия «Проектирование»).
4. Алямовский А.А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Авторы: Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.: ил.
5. Бадерников А. В., Сурин В. П. Расчетный анализ работы оребрения со стороны газа в условиях интенсивного теплообмена. Научно-технический юбилейный сборник. // КБхимавтоматики: В 3 т. Т.2 – ИПФ «Воронеж», 2011. –С. 74-80.
6. Братухин А.Г., Язов Г.К., Карасев Б.Е. и др. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1977.
7. Булыгин Ю.А., Кретинин А.В., Музалёв И.А. Расчёт охлаждения камеры ЖРД: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. 160 с.
8. Васильев А.П. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 1. Учеб. для авиац. спец. вузов / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; под ред. В.М. Кудрявцева. – 4-е изд.//М.: Высш. шк., 1993 – 383 с.:
9. Волков Е.Б., Головков Л.Г., Сырицын Т.А. Жидкостные ракетные двигатели. М.: Воениздат, 1970. – 597 с.:

10. Воробей В.В., Логинов В.Е. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: Учебник. //М.: Изд-во МАИ, 2001. – 496 с.:
11. Газизуллин К.М. Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах// Воронеж: Изд-во ВГУ. 2002.-243 с.
12. Гидродинамическая неустойчивость//М: изд. «Мир»,1964-372 с.
13. Гортышов Ю.Ф., Олимпиаев В.В., Байгалиев Б.Б. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом. // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004.- 432 с.
14. Житников В.П., Зайцев А.Н.Импульсная электрохимическая размерная обработка// М: Машиностроение,2008-413 с.
15. Закирова А.Р. Электрохимическая размерная обработка каналов с управляемым положением их оси// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Воронеж, ВГТУ,2004-142 с.
16. Инженерные основы авиационной химмотологии / Л.С. Яновский и др.Под ред. В.Е. Алемасова// Казань.Из-во Казанского у-та,2005-714 с.
17. Иннтенсификация теплообмена (Учебный пример)/ Владимир Герасимов, Марк Баркан. //Февраль 1998 г. [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.metodolog.ru>.
18. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача // М:изд. «Энергия»,1969_440 с
19. Калинин Э.К. и др. Интенсификация теплообмена в каналах / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо. //М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.:
20. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / М:Машиностроение, 1939-364 с.
21. Коденцев С.Н. Технологический контроль качества комбинированной обработки деталей транспортных машин / С.Н. Коденцев, Е.Г. Сухочева // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: межвуз. сб. науч. тр. Вып. Воронеж: ВГЛТА. 2006. – С. 97–100.

22. Коровин А.А., Смоленцев Е.В. Получение турбулизаторов потока охладителя на поверхностях теплообмена деталей жидкостных ракетных двигателей // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011, Вып. 6. – С. 59-64.

23. Коровин А.А. Эффективные методы получения каналов охлаждения на поверхностях деталей жидкостных ракетных двигателей. //Вестник Воронежского государственного технического университета, Т.7, № 11.2, 2011, С. 29-32.

24. Коровин А.А. Изготовление теплообменных профилей для изделий, работающих с газожидкостными рабочими средами// Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Воронеж, ВГТУ, 2012-138 с.

25. Лазерная нанооблация алмаза и формирование поверхностных структур атомного масштаба / Т. В. Кононенко, В. В. Кононенко, Е. В. Заведеев [и др.] // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки 2025., Т. 520, № 1. – С. 24-33.

26. Ломакин И.В., Юхневич С.С., Смоленцев Е.В. Влияние комбинированных методов обработки на качество поверхностного слоя детали при получении искусственной шероховатости// Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2024. № 1 (83)- С. 272-278.

27. Ломакин И.В., Юхневич С.С., Устинов К.А. Использование электрохимической обработки для выполнения финишных операций при изготовлении фильтрующих элементов /Академические чтения по космонавтике. В 2 т.Т.2.М:2025-С456-457

28. Ломакин И.В. Обеспечение качества поверхностного слоя изделий при сложнопрофильной многоэлектродной обработке//Упрочняющие технологии и покрытия. 2026. Т. 22. № 3 (255)- С. 124-127.

29. Ломакин И.В., Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С. Перспективная технология электрохимической обработки фильтрующих элементов жидкостного ракетного двигателя //Решетневские чтения В 2-х частях.ч.2 Красноярск, 2024. – С.254-256.
30. Ломакин И.В., Рязанцев А.Ю. Применение электрофизических способов для обработки при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов // Гагаринские чтения - 2023. Сборник докладов XLIX Международной молодежной научной конференции. Москва, 2023. - С. 577-579.
31. Ломакин И.В., Рязанцев А.Ю. Разработка оснастки для изготовления детали «тройник» жидкостного ракетного двигателя /Всероссийский научно-технический форум: сб. докладов. Самара.2024-С-87-88
32. Ломакин И.В., Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Широкожухова А.А. Создание передовой технологии и оборудования для изготовления титановых шарбаллонов// Ивуз.Машиностроение.2021. № 12-С.37-41
33. Лыков А.В. Тепломассообмен//М:изд. «Энергия». 1972-560 с.
34. Маннапов А.Р., Зайцев А.Н. Особенности вырезки массивов малоразмерных близкорасположенных выступов методом импульсной электрохимической обработки // Труды МАИ (электронный журнал). - 2010. - Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14609>.
35. Машины и технологии для прецизионной электрохимической обработки [электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.titanecm.ru>.
36. Мелькумов Т.М., Мелик-Пашаев Н.И., Чистяков П.Г., Шуиков А.Г. Ракетные двигатели. М.: «Машиностроение», 1976. – 400 с.
37. Митяшкин Д.З. Электрические методы обработки деталей//Производство газотурбинных двигателей. М: Машиностроение,1966-С.13-16.
38. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. // Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 263 с.
39. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. //Л.: Энергия, 1980. – 144 с.

40. Миколуцкий, С. И. Исследование формирования микро- и наноструктур на поверхности твердых тел при облучении лазерными импульсами наносекундной длительности: специальность //01.04.05 "Оптика": диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Миколуцкий Сергей Иванович. – Санкт-Петербург, 2017. – 132 с.
41. Михайловский Е.В. Аэродинамика автомобиля. М. «Машиностроение», 1973. - 244 с.
42. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: «Энергия», 1977. – 344 с.
43. Основы повышения точности электрохимического формообразования /Ю.Н.Петров, Г.Н.Корчагин, Г.Н.Зайдман, Б.Саушкин // Кишинев.Изд. «Штиинца», 1977. -152 с.
44. Павлинич С.П., Маннапов А.Р., Гимаев Н.З. и др. Электрохимическое формообразование элементов аэродинамических уплотнений // Известия вузов. Авиационная техника. Казань, 2008. №. 3. – С. 69-73.
45. Павлинич С.П. Перспективы применения импульсной электрохимической обработки в производстве деталей газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. Уфа, 2008. Т. 11. - № 2 (29). - С. 105-115.
46. Патент №119663 РФ. Имитатор для определения оптимальных технологических режимов при получении турбулизаторов в каналах охлаждения электрохимическим методом / В.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, А.А. Коровин, Г.Н. Климова, // 2012. Бюл. изобр. №24.
47. Патент №2257981 РФ. Способ электрохимической обработки /А.Р Закирова,З.Б.Садыков,П.П. Смоленцев, К.М.Газизуллин //2005. Бюл. изобр. №22.
48. Патент №2275279 РФ. Способ электрохимического разделения листовых материалов / В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, С.А.Рябова, И.Т.Коптев //2006. Бюл. изобр. №12.

49. Патент №2275994 РФ. Способ электрохимической обработки листовой заготовки и устройство для его осуществления /А.Р Закирова, З.Б.Садыков, Е.В. Смоленцев, К.М.Газизуллин, И.А.Одинцов // 2006. Бюл. изобр. №13.

50. Патент №2464137 РФ. Способ получения локального участка охлаждения теплонагруженной детали / В.П. Смоленцев, И.Т.Коптев, И.Ю.Кузнецов, А.В.Титов, А.Н.Осеков //2012. Бюл. изобр. №29.

51. Патент №2470749 РФ. Способ электрохимической обработки локальных участков и устройство для его использования / И.Т.Коптев В.П. Смоленцев, А.А.Коровин,И.Ю.Кузнецов,А.Н.Осеков //2012. Бюл. изобр. №36.

52. Патент №2538456 РФ. Устройство для прошивки глубоких отверстий в металлических заготовках и способ с его применением / В.П. Смоленцев, Ю.В.Шаров,И.Т.Коптев, Е.В.Смоленцев, //2015. Бюл. изобр. №1.

53. Патент №2568404 РФ. Способ электрохимического изготовления углублений, образующих турбулизаторы на ребрах и в донной части охлаждающих каналов теплонапряженных машин и устройство для его осуществление / В.П. Смоленцев, Ю.В.Шаров, Е.В.Смоленцев, В.Л.Мозгалин //2016. Бюл. изобр. №2.

54. Патент №2573465 РФ. Способ изготовления шаблона из эластичного гибкого листового диэлектрического материала для электрохимической размерной обработки / В.П. Смоленцев, В.Л.Мозгалин, С.С.Юхневич, И.Т.Коптев //2015. Бюл. изобр. №32.

55. Патент №2625378 РФ. Способ групповой прошивки отверстий и устройство для его реализации / В.П. Смоленцев, А.В.Кузовкин, Ю.В.Шаров, В.В.Золотарев //2017. Бюл. изобр. №20.

56. Патент №2699471 РФ. Способ изготовления и шаблон для электрохимического получения углублений в пазах охлаждающего канала детали / В.П. Смоленцев, А.В.Щеднов, О.В.Скрыгин //2019. Бюл. изобр. №25.

57. Патент №2716925. РФ. Способ вакуумной сборки комплектов с нежесткой обечайкой и устройство для его осуществления /В.П. Смоленцев, С.В.Сафонов, Я.С. Смоленцева, Е.В. Паничев //2020. Бюл. изобр. №8.

58. Патент №2724212 РФ. Способ комбинированной многоэлектродной электрохимической и эрозионно-химической прошивки глубоких отверстий малого сечения в металлической детали и устройство для его осуществления / В.П. Смоленцев, О.В.Скрыгин, С.В.Сафонов, А.А.Широкожухова //2020. Бюл. изобр. №18.
59. Петров Ю.Н., Зайдман Г.Н., Саушкин Б.П. Улучшение технологических характеристик при импульсной электрохимической обработке длинномерных деталей// Размерная электрохимическая обработка деталей машин. Часть 2. Тула, 1975. - С. 3-7.
60. Паршиков О.Н., Яковлева А.П. Обработка стальных деталей электромеханическим методом //Главный механик.2014. №7-С.62-64.
61. Петров Ю.Н., Нистрян А.З., Саушкин Б.П.Исследование анодного поведения титановых сплавов при ЭХРО//Электронная обработка материалов,1983, № 6-С. 18-22
62. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов//М: Машиностроение,1982-400с.
63. Проклова В.Д. Электрохимическая обработка непрофилированным электродом-инструментом //М: Машиностроение,1976-54 с.
- 64.Проблемы гидродинамики и их математические модели. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В., Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973.
65. Проблемы гидродинамики и их математические модели. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В., Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973
66. Принцип действия электрохимического станка SFE [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.stankofinexpo.ru>.

67. Ребиндер П. А. Электрокинетические свойства капиллярных систем / П. А. Ребиндер. – М.: Машиностроение, 1956. – 264 с.
68. Редкозубова О.О. Импульсное анодное растворение макроскопически неоднородной поверхности с искусственной изоляцией. /Диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук. Кишинев, 2004.
69. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
70. Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике //М: «Наука»,1965
71. Седыкин Ф.В. Некоторые вопросы качественной теории тепло- и массопереноса при электрохимической размерной обработке/ Под общей редакцией Ф.В. Седыкина // Вопросы гидродинамики процесса электрохимической размерной обработки металлов. Материалы всесоюзного научно-технического семинара. Тула.Изд.ТГУ.1969
72. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. – 303с.
73. Смоленцев В.П. и др. Электрохимическое маркирование деталей / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, З.Б. Садыков // М.: Машиностроение, 1983. – 72 с.
74. Смоленцев В.П., Квасов С.В., Газизуллин К.М., Коптев И.Т. Анализ технологичности камеры сгорания. //Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Межвуз. сб. научн. тр., Вып. 9. Воронеж: ВГТУ, С. 64-68.
75. Смоленцев В.П., Коптев И.Т. Нетрадиционные методы обработки в точном машиностроении. // Междунар. научно-технич. конф. «ССП-2012», Воронеж: ВГКПТЭС, 2012, -С. 114-124.
76. Смоленцев В.П., Коптев И.Т., Газизуллин К.М. Технологические возможности и перспективы развития электроэрозионной и электрохимической размерной обработки. //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №2-5 (292), 2012.-С.7-12.

77. Смоленцев В.П., Коровин А.А. Изготовление турбулизаторов в каналах охлаждения жидкостных ракетных двигателей. //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, № 5 (289).2011. – С. 81-90.
78. Смоленцев В.П., Коровин А.А. Методы обработки полостей вафельных панелей // ТМ – 2010.Воронеж: ВГТУ, 2010 – С. 113-116.
79. Смоленцев В.П., Коровин А.А. Получение искусственной шероховатости в каналах охлаждения электрохимическим методом. // Металлообработка, № 6 (66) 2011 г. –С.16-20.
80. Смоленцев В.П., Коровин А.А. Эффективные методы удаления недорезов фрезерования при изготовлении перекрещивающихся пазов // Студент, специалист, профессионал: Сб. тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф., Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. - 122 с.
81. Смоленцев В.П., Сухоруков В.Н. Обеспечение точности сопрягаемых поверхностей // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении. Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3 Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. -С. 94-98.
82. Смоленцев В.П., Сухоруков В.Н. Процесс обработки сопрягаемых пазов // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении. Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3 Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. - С. 91-94.
83. Смоленцев В.П. Теория электрических и физико-химических методов обработки. В 2 ч. Ч. I: Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др. //Воронеж: ВГТУ, 2008.
84. Смоленцев В.П. Теория электрических и физико-химических методов обработки. В 2 ч. Ч. II: Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии и комбинированными методами: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др. – Воронеж: ВГТУ, 2008.

85. Смоленцев Г.П., Коптев И.Т., Смоленцев В.П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме // Воронеж: ВГТУ, 2000-103 с
86. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. //М: Машиностроение-1, 2005 – 511с.
87. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / Под ред. А.С. Юрьева // С.-Пб, АНО НПО «Мир и семья», 2001. - 1154 с.,
88. Справочник технолога/Под общей редакцией А.Г.Суслова // М: Инновационное машиностроение,2019-800с.
89. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
90. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. // М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
91. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с;
92. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений. // М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
93. Сухочев Г.А. Вопросы технологии обработки каналов охлаждаемых оболочек сложного профиля / Г.А. Сухочев, В.Н. Щербаков, С.Н. Коденцев // Нетрадиционные технологии в технике, экономике и социальной сфере: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 1999. Вып. 1. -С. 11–14.
94. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г. А. Сухочев. // М.: «Машиностроение», 2004. – 287 с.
95. Т. фон Карман. Аэродинамика. Избранные темы в их историческом развитии. Ижевск: РХД, 2001-208 с.
96. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник. М.: Атомиздат, 1979. – 213 с.

97. Усов С.В., Свириденко Д.С., Болдырев А.А., Ковалев С.В., Мандрыкин А.В. Оценка эффективности при внедрении высоких наукоемких технологий //Вестник Воронежского государственного технического университета, том 8, №7.1, 2012. – С.87-91.
98. Усов С.В., Свириденко Д.С., Смоленцев Е.В., Белякин А.С. Исследование влияния комбинированных методов обработки на трибологические характеристики поверхностного слоя деталей машин // Вестник Воронежского государственного технического университета.Т. 8, №5, 2012. – С.138-141.
99. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина // М.: Дрофа, 2002. - 656 с.
100. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. -//СПб.: СПб ГИТМО (ТУ). 2001. - 264 с.
101. Яковлева А.П. Поверхностное упрочнение электромеханической обработкой стальных деталей машин //Авиационная промышленность,2014,№1- С.32-33
102. Asakura S., Nobe K. Electrodisolution Kinetics of Iron in Chloride Solutions // J. Electrochem. Soc. 1971. Vol. 118, N 1.- P. 13.
103. Datta M., Landolt D. Electrochemical Machining under Pulsed Current Conditions // Electrochim. Acta. 1981. Vol. 26, N 7. -P. 899.
104. Fluerebrock F., Zerkle R.D., Thope J.F. Verification of a One-Dimensional Two-Phase Flow Model of the Frontal Gap in Electrochemical Machining. //Transaction of the ASME. Series B.-J. of Engineering for Industry, 98. N 2. 1976. -P. 431-437.
105. Konig W. and Degenhardt H. The Influence of Process Parameters and Tool-Electrode Geometry on the Development of the Overcut in ECM with High Current Densities. //Fundamentals of ECM, edited by Ch. Faust. Electrochem. Soc., Princeton. 1971.
106. Kozac J., Lubkowski K. The Basic Investigation of Characteristic in the Pulse Electrochemical Machining // Proc. XX MTDR Conf. Birmingham, 1979. -P. 625.
107. Landolt D. An Optical Study the Process of Hydrogen Evolution in High Speed Electrolyses. // J. Electrochem. Soc., 1971, N 1.

108. Rosset E., Datta M., Landolt D. Electrochemical Dissolution of Stainless Steel in Flow Channel Cells with and without Photoresist Masks // J. Appl. Electrochem. 1990. Vol. 20, N 1.- P. 69.

109. Tabares, I., Soldera, M., Voisiat, B. *et al.* Diffraction-based approach for real-time monitoring of nanosecond direct laser interference patterning structure formation on stainless steel. Sci Rep 14, 9599 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60420-z>

110. Wege zur Leistungssteigerung bei den elektrischadtragenden Bearbeitungsverfahren. Diskussionsbeiträge // Industrie-Anzeiger, 1971, Jg. 93, Nr. 60. - P. 1574.

111. Willson J.F. Practice and Theory of Electrochemical Machining.// New York, 1971. -171 p.

Приложения

1. Акт и документы для использования материалов в машиностроении
2. ЧПУ программа «Нарезание каналов охлаждения на камеру сгорания»

Приложение 1. Акт и документы для использования материалов в машиностроении

УТВЕРЖДАЮ:



АКТ

принятия к внедрению

работы по созданию многоместного сборного электрода-инструмента для электрохимической размерной обработки по шаблону углублений, образующих турбулизаторы в донной части и на ребрах охлаждающих каналов теплонапряженных машин, и технологичного способа его изготовления.

Комиссия в составе начальника отдела управления №515, кандидата технических наук, доцента Рязанцева А.Ю (председатель) и членов: аспиранта ВГТУ Ломакина И.В, доктора технических наук, профессора ВГТУ, почётного работника высшего образования, члена-корреспондента академии космонавтики Российской Федерации, заместителя заведующего кафедрой «Технология машиностроения» ВГТУ, Смоленцева Е.В составили настоящий акт по результатам работы АО КБХА и ВГТУ по созданию и испытанию электрода-инструмента и технологичного способа его изготовления за период с 1 сентября 2022 по август 2026 года в опытном производстве АО КБХА на установках для комбинированной электрохимической обработки на кафедре «Технология машиностроения» ВГТУ на имитаторе процесса изготовления углублений на образцах из материалов электрода-инструмента и камеры сгорания ракетного двигателя.

Исходные данные: на корпусе камеры сгорания ракетного двигателя из материала БрХ08 в охлаждающих каналах требуется выполнить в донной части 81 турбулизатор с шириной 1,8 мм и глубиной $0,5^{+0,1}$ мм, а на поверхности 12 рёбер каналов шириной 15 мм и глубиной $0,4^{+0,2}$ мм. При изготовлении турбулизаторов использовались покрытия марки «Штрих» и контрастный незасыхающий краситель на базе графитовой смазки с добавлением мелкодисперсного графита.

Режимы комбинированной электрохимической обработки: напряжение на электродах 18 В, рабочая токопроводящая жидкая среда 10% NaNO_3 с добавкой 1,5 % KBr , давление подачи рабочей жидкости через зазор 0,04-0,05 МПа, начальный межэлектродный зазор между поверхностью канала в камере сгорания и в

имитаторах изменялся от 0,06 мм. до 0,15 мм в зависимости от профиля охлаждающего канала или его фрагмента. Машинное время обработки с турбулизаторами по шаблону 3- 3,2 минуты.

Параметры шаблона-лавсановая пленка толщиной 0,04 мм: Параметры катодного устройства в имитаторе –материал медь марки М0, толщина листа, 0,2 мм.

Базовый процесс: при получении турбулизаторов в донной части каналов изделий с аналогичными параметрами выполнялся комбинированной электрохимической обработкой трёхместным медным инструментом, штучное время составляло 8,7 минут или 687 минут на комплект.

Результаты огневых испытаний и испытаний на имитаторе: величина углублений в донной части канала – $0,5 \pm 0,1$ мм, на рёбрах $0,42^{-0,05}$, что соответствует требованиям чертежа камеры сгорания. Измерение температуры камеры сгорания на её поверхности после огневых испытаний с одинаковым расходом охлаждающей среды и топлива (в виде керосина) показало снижение температуры на 100-150К, что служит основанием для пересмотра ресурса камеры сгорания в сторону повышения для достижения допустимого количества пусков с двигателем до 1,5-2,0 раз.

Трудоёмкость изготовления турбулизаторов по шаблонам составила 18 минут на комплект, что позволило снизить трудоёмкость изготовления комплекта более, чем в 38 раз.

Полученные результаты являются основанием предприятию для освоения серийного производства с внедрением предлагаемой технологии комбинированной электрохимической размерной обработки углублений заданных параметров при изготовлении турбулизаторов в охлаждающих системах горячей зоны ракетных двигателей и электрода- инструмента. предлагаемой конструкции.

Расчёт экономической эффективности от внедрения рекомендаций по совершенствованию системы охлаждения и технологии многоместного изготовления турбулизаторов в охлаждающих каналах показал, что при полезной нагрузке оборудования на предприятии по времени не ниже 50 % за период планового выпуска тепловых двигателей эффект составит не менее 218 млн. (двести восемнадцать миллионов) рублей.

Председатель комиссии

Члены комиссии:



А.Ю. Рязанцев

И.В. Ломакин

Е.В. Смоленцев

Приложение 2. Нарезание каналов охлаждения на камеру сгорания.

```
G40 G17 G710 G94 G90 G60 G601
G54
T="GRIB_D15_UG7" ; ФРЕЗА D15.6 УГЛОВАЯ НАСЕЧКА R7.8
M6
D1
TRAFOOF
HOME_
D1
S1200 M3
R0=$P_TOOLR-7.8
R1=0.04;1_КОРЕКТОР НА ОСЬ ФРЕЗЫ КОРЫТО - ВНИЗ 0.08 VREZANIE
CPRAVA -
R9=-0.08;2_КОРЕКТОР НА ОСЬ ФРЕЗЫ СПИНКА + ВЕРХ -0.07 VREZANIE
CLEVA -
R2=81 ;С КАКОГО РЕБРА НАЧАТЬ *****
R4=40 ;КОЛ_ВО РЕБЕР ВЫПОЛНИТЬ *****
R5=8 ; ВРЕЗАНИЕ ФРЕЗЫ В ДЕТАЛЬ
R6=10 ; ОТХОД ФРЕЗЫ ОТ ДЕТАЛИ
R7=1
R8=0
R10=1
R77=60; РАБОЧАЯ ПОДАЧА
G0 B105.603
C=DC(-27.63+3*(R2-1))
CYCLE832(0.025,012101)
ORIWKS
AROT Z=3*(R2-1)
g1 x=21 y=86 z=250 a3=0.89764 b3=0.24626 c3=0.36551 f4000
Z138
AA_:
R8=(R2-1)+R7
MSG("РЕЖЕМ РЕБРО N="<<R8)
r11=-13.7651-0.2646*(r0+r5)+0.8976*r1 r12=49.4710+0.9644*(r0+r5)+0.2463*r1
r13=137.9270+0.3655*r1
g1 x=r11 y=r12 z=r13 a3=0.89764 b3=0.24626 c3=0.36551 f=1600/R10
M8
r11=-13.7651-0.2646*r0+0.8976*r1 r12=49.4710+0.9644*r0+0.2463*r1
r13=137.9270+0.3655*r1
x=r11 y=r12 z=r13 a3=0.89764 b3=0.24626 c3=0.36551 f=r77
g1 f1;
r11=-13.7651-0.2646*(r0+r6)+0.8976*r1 r12=49.471+0.9644*(r0+r6)+0.2463*r1
r13=137.927+0.3655*r1
x=r11 y=r12 z=r13 a3=0.89764 b3=0.24626 c3=0.36551 f1600
```

```

;PEREXOD
r11=-13.4501-0.2646*(r0+r5)+0.9031*r9 r12=49.5574+0.9644*(r0+r5)+0.2478*r9
r13=138.053+0.3508*r9
x=r11 y=r12 z=r13 a3=0.90306 b3=0.24775 c3=0.35085 f1000
r11=-13.4501-0.2646*r0+0.9031*r9 r12=49.5574+0.9644*r0+0.2478*r9
r13=138.053+0.3508*r9
x=r11 y=r12 z=r13 a3=0.90306 b3=0.24775 c3=0.35085 f=r77
g1 f1;
r11=-13.4501-0.2646*(r0+r6)+0.9031*r9 r12=49.5574+0.9644*(r0+r6)+0.2478*r9
r13=138.053+0.3508*r9
x=r11 y=r12 z=r13 a3=0.90306 b3=0.24775 c3=0.35085 f1600
R10=4
R7=R7+1
IF (R7>R4) OR (R8>119)
Z300 a3=0.90306 b3=0.24775 c3=0.35085 M9 f5000
GOTO BB_
ENDIF
AROT Z3
GOTOB AA_
BB_:
M5
TRAFOOF
ROT
HOME_
CYCLE832()
M5
,C. 29-32.

```