

На правах рукописи



Щеднов Антон Владимирович

**ТЕХНОЛОГИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ КАНАЛОВ
ДЛЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ ПО МНОГОСЛОЙНЫМ
ШАБЛОНАМ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ АНОДОМ**

Специальности: 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки
05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель **Смоленцев Владислав Павлович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Усов Сергей Вадимович**,
доктор технических наук, профессор,
заместитель генерального директора ООО
«Технологические системы защитных
покрытий, г. Москва

Поташников Михаил Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент, ГБПОУ ВО
«Воронежский политехнический техникум»,
директор

Ведущая организация Федеральное государственное унитарное
предприятие «Научно-производственное
объединение «Техномаш», г. Москва

Защита состоится 17 ноября 2021 г. в 16⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ), ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (БГТУ) по адресу: г. Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <http://www.cchgeu.ru/> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Автореферат разослан «5» июля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. техн. наук,
профессор



Кириллов Олег Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность выполнения исследований по тематике диссертации. При создании новых поколений двигателей космических систем возросли требования к повышению ресурса изделий для обеспечения многоразовых пусков. Это потребовало создания новых систем защиты внутренней поверхности стенок зоны горения топлива путем нанесения теплозащитных эрозионностойких покрытий и интенсификации теплообмена от стенок к потоку охлаждающей среды, как правило, топливу, в состоянии кипения. В эксплуатируемых изделиях интенсификация достигается путем увеличения площади теплообмена, созданием системы продольных каналов и поясами тепловых завес в форме отверстий малого сечения от наружной поверхности стенки в зону горения. Такие завесы ослабляют механическую прочность камеры сгорания и реактивного сопла. Они чрезвычайно трудоемки для изготовления, что резко повышает себестоимость изделий. В условиях жесткой конкуренции между странами – создателями космической техники решение задачи снижения цены жидкостного ракетного двигателя приобретает уровень государственной проблемы в условиях конкурентной борьбы за рынки сбыта.

Одним из перспективных методов повышения ресурса является адекватная замена части дорогостоящих тепловых завес дополнительными локальными элементами на донных и боковых поверхностях охлаждения горячей зоны, дающих возможность устранить крайне нежелательные перекрытия каналов газовыми пробками. Однако все попытки изготовить такие элементы механической обработкой в форме углублений оказались возможными только для донной части каналов, что недостаточно для решения проблемы устойчивого течения охлаждающей среды. Кроме того, трудоемкость такой операции, охватывающей изготовление только части требуемых углублений, оказалось соизмеримой с созданием тепловой завесы и не получила применения для эксплуатируемых ракетных двигателей. В условиях создания изделий с многоразовым пуском решение этой проблемы стало еще более актуальным, что потребовало создания нового способа обработки с одновременным быстрым получением по длине сложнопрофильного канала большого количества углублений заданного сечения, их размещения на донной части и на ребрах в узких полостях зоны течения газожидкостной среды. Такой способ был разработан с участием соискателя путем многоместной комбинированной обработки одновременно всех углублений по многослойным шаблонам, в которых одним из слоев является дополнительный анод. Такой инструмент был создан впервые и защищен патентом Российской Федерации. Проверка его работы на опытных изделиях показала, что после детального исследования нового способа и изготовления требуемых устройств возможна эффективная интенсификация теплообмена для достижения заданного ресурса горячей зоны двигателя при снижении себестоимости производства таких деталей до желаемого уровня.

Актуальность темы работы подтверждается тем, что она выполнялась в рамках Федеральной космической программы России на 2016-2025 годы под шифром «Феникс», утвержденной в уточненном варианте постановлением Правительства РФ от 09.12.2017 года № 1513.

Целью выполнения работы является повышение ресурса горячей зоны тепловых двигателей многоразового использования с применением многослойных шаблонов для многоместной комбинированной обработки локальных элементов дополнительного охлаждения в труднодоступных для инструмента каналах с оптимизацией геометрии углублений путем управления электромагнитным полем через дополнительный анод.

Объект исследований: система наружного охлаждения газожидкостной средой, протекающей по фрезерованным каналам в горячей зоне жидкостных двигателей, обеспечивающей повышение ресурса изделий с многоразовым пуском.

Предмет исследований: технология комбинированной групповой обработки местных охладителей в труднодоступных для инструмента участках каналов по многослойным шаблонам, имеющим металлический слой с дополнительными анодами, обеспечивающими формирование электромагнитного поля для получения требуемого профиля углублений.

Задачи, решаемые в работе:

1. Создание комбинированных методов обработки для эффективного изготовления дополнительных элементов, обеспечивающих интенсификацию теплообмена через газожидкостную среду в горячей зоне теплового двигателя.

2. Разработка новых способов и средств технологического оснащения для управления электромагнитным полем через внешнее воздействие на зону анодного растворения припуска.

3. Исследование конструкции, связей с многослойным шаблоном, технологии изготовления и режимов применения дополнительного анода в разработанном способе многоместной обработки углублений.

4. Проверка эффективности локальных теплообменников на повышение ресурса, требуемого для создания перспективных двигателей многоразового использования.

5. Раскрытие перспектив интенсификации теплообмена потоком охлаждающей среды и создание новых средств управления газожидкостными средами в каналах охлаждения.

Научная проблема: отсутствие способов и механизма управления размерным съемом локальных углублений для интенсификации теплообмена в каналах с затрудненным доступом инструмента в зону обработки, что ограничивает ресурс изделий многоразового применения. Практически полное отсутствие научно обоснованных сведений о проектировании и использовании дополнительного анода, как части многослойного шаблона.

Вклад в технологическую науку: создание системы управления электрическим полем дополнительного анода, совместимой с контуром анодного растворения для получения углублений по многослойным шаблонам.

Методология, методы и достоверность исследований. В работе использованы результаты исследований в области технологии машиностроения, электрических методов обработки, положения теории подобия в технических системах, закономерности теории течения газожидкостных сред через узкие каналы, распределения электромагнитных полей при многоместной анодной

обработке.

Достоверность результатов подтверждается получением воспроизводимых результатов при моделировании и экспериментальном исследовании процессов, протекающих с использованием систем с дополнительным анодом, современных технических средств, совпадением данных различных исследователей, положительными результатами применения результатов работы при создании современных двигателей с увеличенным ресурсом, требуемым для систем многократного использования.

Научная новизна:

1. Научное обоснование методики отработки производственной технологичности при назначении варианта технологического процесса изготовления местных охладителей, что отвечает требованиям п.1 шифра специальности 05.02.08.

2. Теоретическое обоснование возможности изготовления по многослойным шаблонам локальных охладителей в форме профильных углублений с геометрией, обеспечивающей плавное течение на выходе потока газожидкостной среды для повышения теплоотдачи от стенки камеры сгорания и реактивного сопла, что отвечает требованиям п.3 шифра специальности 05.02.08.

3. Моделирование течения охлаждающей среды в каналах с профильными углублениями, размещенными в научно обоснованных местах в донной части и на ребрах каналов с использованием насосного эффекта от радиального перетекания газожидкостной среды в донную часть канала.

4. Структура и механизм подачи тока к дополнительному аноду через самостоятельный контур, совместимый с контуром анодного растворения углублений по всей обрабатываемой поверхности зоны охлаждения с фрезерованными каналами.

5. Научное обоснование геометрических параметров и размещения углублений в труднодоступных каналах для интенсификации теплообмена и устранения запаривания течения газожидкостного потока через канал.

Пункты 3; 4; 5 относятся к разделам 2; 3; 6 области исследований специальности 05.02.07.

Практическая значимость работы:

1. Разработка нового способа и инструмента для изготовления местных дополнительных охладителей на поверхности канала в горячей зоне тепловых двигателей.

2. Создание технологии автоматизированного проектирования и изготовления многослойных шаблонов с дополнительными анодами, обеспечивающими управление электромагнитными полями по всей поверхности с углублениями для дополнительного охлаждения.

3. Экспериментальное подтверждение эффективности применения дополнительных охладителей для повышения ресурса изделий и возможности адекватной замены ими части дорогостоящих тепловых завес в разрабатываемых конструкциях перспективных жидкостных ракетных двигателей.

4. Методики расчета и проектирования многослойного шаблона и дополнительного анода с комбинированным воздействием химической

составляющей процесса и управляемого магнитного поля.

5. Создание рекомендаций по проектированию и изготовлению дополнительного анода, его размещение в окнах многослойного шаблона при автоматизации операций по разработанным алгоритмам выполнения процедур.

Положения, выносимые на защиту, и личный вклад соискателя:

1. Личное участие при решении всех поставленных задач для достижения цели работы и получения результатов, имеющих научную и практическую значимость для обеспечения существенного вклада в развитие технологической науки в машиностроении.

2. Теоретическое обоснование и реализация результатов для проектирования многослойных шаблонов и дополнительных анодов, обеспечивающих интенсификацию охлаждения горячей зоны газожидкостной средой, протекающей через фрезерованные каналы.

3. Создание нового способа, инструмента для изготовления углублений требуемого профиля в каналах охлаждения и разработка технологического процесса обработки по многослойным шаблонам с дополнительными анодами.

4. Создание материальной базы и программ испытаний новых систем охлаждения в условиях производства при проектировании и отладке нового поколения двигателей многоразового использования с конкурентоспособными технико-экономическими характеристиками.

Апробация работы. Результаты работы и ее составные части представлялись и обсуждались на Международных научно-технических конференциях (ССП-2017, ССП-2018) (Воронеж, 2017, 2018); Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (Москва, 2016); VI Международном симпозиуме «Перспективные направления развития финишных методов обработки; микроволновые технологии» (Ростов-на-Дону, 2016); Международной научно-технической конференции «Лучшие технологические школы России» в рамках IV Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2017); IX Международной научно-технической конференции (ТМ-2017) (Волгоград, 2017); X Международной научно-технической конференции (ТМ-2018) (Воронеж, 2018), 5-th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2019) (Сочи, 2019); X International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (ISPCIME-2019) (Кемерово, Шерегеш, 2019); XI Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе» (Калининград, 2019), XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении (Тамбов, 2020).

Обоснование достоверности, реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы прошли проверку в цехах ВМЗ – филиала ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, доказали свою достоверность и приняты к производству ракетных двигателей в АО КБХА с реальным экономическим эффектом. Материалы проведенных исследований используются в учебном

процессе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет, ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет, ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет, ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет, ФГБОУ ВО Донской государственный технический университет.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ общим объемом 7,7 п.л., где соискателю принадлежит 3,8 п.л. В их число входит, 2 патента, 5 публикаций в изданиях по списку ВАК РФ и в системах «Scopus», «Web of Science».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, приложений, списка литературы из 116 наименований. Работа изложена на 146 страницах, содержит 48 рисунков и 5 таблиц.

Основное содержание работы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В **первой** главе приведен анализ доступных результатов исследований ученых научных школ Москвы, Санкт-Петербурга, Казани, Уфы, Тулы, Орла, Воронежа, Липецка, Ростова-на-Дону, Рыбинска, Саратова, Самары, Новосибирска и других городов России, а также исследования специалистов США, Японии, Англии, Германии, Китая и других стран в области технологии комбинированных методов обработки с наложением электрического поля, который позволил обосновать цель работы, задачи, решение которых обеспечивает достижение поставленной цели, пути решения поставленных задач, раскрыть перспективы дальнейших исследований в рассматриваемой отрасли машиностроения.

Установлено, что в доступной литературе не обнаружено достаточного количества информационных источников, отражающих специфику комбинированной обработки местных охладителей в форме углублений на донной поверхности и ребрах охлаждающих каналов на наружной поверхности горячей зоны тепловых двигателей. Для достижения ресурса, требуемого для осуществления многократного пуска двигателей, требуется создание системы охлаждения с углублениями, обеспечивающими эффективный теплонос с участков, не доступных для обработки традиционными методами. Необходима разработка новых способов и устройств, обеспечивающих надежное функционирование системы охлаждения для обеспечения требуемого ресурса перспективных изделий ракетной техники. Показано, что достижение поставленной цели возможно путем решения поставленных в работе задач, способствующих созданию изделий многоразового использования.

Во **второй** главе рассмотрены и обоснованы пути решения поставленных задач для достижения поставленной цели и сформированы научные гипотезы для проведения исследований и решения задач, поставленных в работе:

1. Жидкая среда для охлаждения горячей зоны тепловых двигателей существует в нагретом состоянии при температуре выше уровня перехода в газообразное состояние, поэтому формируется газожидкостная среда, которую

следует рассматривать как двухфазную, течение которой имеет существенные отличия от закономерностей течения жидкости.

2. Местные углубления в каналах для охлаждения с принятой ранее ступенчатой геометрией профиля вызывают остановку потока на выходе потока и способствуют запираанию потока газовой фазой, устранение которого требует повышения давления среды на входе и не всегда осуществимо, что подтверждается теорией подобия и результатами скоростной съемки процессов течения газожидкостной среды. Это вызывает необходимость применять в качестве дополнительных локальных охладителей углубления, вызывающие на входе в них требуемый отрыв потока от горячей поверхности канала, а на выходе – безударный выход смеси в поток.

3. За счет резкого расширения среды на входе потока в углубление создается перепад давлений, формирующий насосный эффект и радиальное перетекание потока в зону нагрева стенки, охлаждение фазы в донной части углубления и образование движения потока по винтовой линии. Это должно быть учтено при моделировании процесса, как способствующее повышению интенсивности охлаждения и достижение за счет этого требуемого ресурса горячей зоны двигателей многоразового использования.

4. Получение требуемой геометрии углублений возможно по шаблонам с регулируемым электромагнитным полем, воздействие которого может быть описано при использовании механизма действия дополнительного анода с индивидуальным режимом обработки по схеме, совмещенной с анодным растворением углублений по многослойным шаблонам.

5. Для расширения зоны одновременной обработки углублений в каналах на теплонагруженных участках деталей переменного геометрического профиля требуется разделить оребренную поверхность детали, классифицировать по кривизне и разработать технологию изготовления участков по индивидуальным шаблонам с использованием режимов обработки, учитывающих особенности течения в каналах газожидкостных охлаждающих сред, в частности, возможность использования многослойного гибкого шаблона с дополнительными анодами.

В главе обоснован выбор экспериментального оборудования и материальной базы, необходимой для решения задач, поставленных в работе. Создана научная база, использование которой дает возможность разработать механизм воздействия электрического поля дополнительного анода для формирования локальных углублений в пазах для жидкостного охлаждения горячей зоны тепловых двигателей.

Разработан алгоритм выполнения работы, позволяющий оптимизировать пути решения поставленных задач и ускорить достижение поставленной цели.

В третьей главе приведены научные основы комбинированной обработки по многослойным шаблонам с дополнительным анодом.

Показано, что моделирование процесса комбинированной обработки углублений по многослойным шаблонам с дополнительным анодом позволяет получить геометрию элементов дополнительного охлаждения в каналах, отвечающую требованиям разработчиков изделий и перспективную для создаваемых тепловых двигателей.

Следуя содержанию научной гипотезы 1, можно сформулировать начальные условия для проектирования математической модели течения рабочей среды над углублением при его формировании с использованием дополнительного анода. В рассматриваемом случае результат обработки по шаблонам является начальным этапом протекания топлива через имеющееся углубление в процессе работы двигателя. Метод подобия позволяет сблизить результаты исследований по формированию углублений комбинированным методом с воздействием этих элементов на стабильность течения газожидкостных сред как в процессе эксплуатации двигателя, так и при обработке углублений. Здесь критерием оценки работы получаемых нами углублений является предельное количество газовой составляющей в жидкости, при котором канал не перекрывается газовой пробкой, когда процесс прекращается как при обработке, так и в процессе эксплуатации изделий. Учет критерия позволяет по известным результатам испытаний камеры сгорания устанавливать оптимальную форму углублений (рис. 1), обеспечивающую охлаждение изделия при стабильном течении газожидкостной среды в каналах.

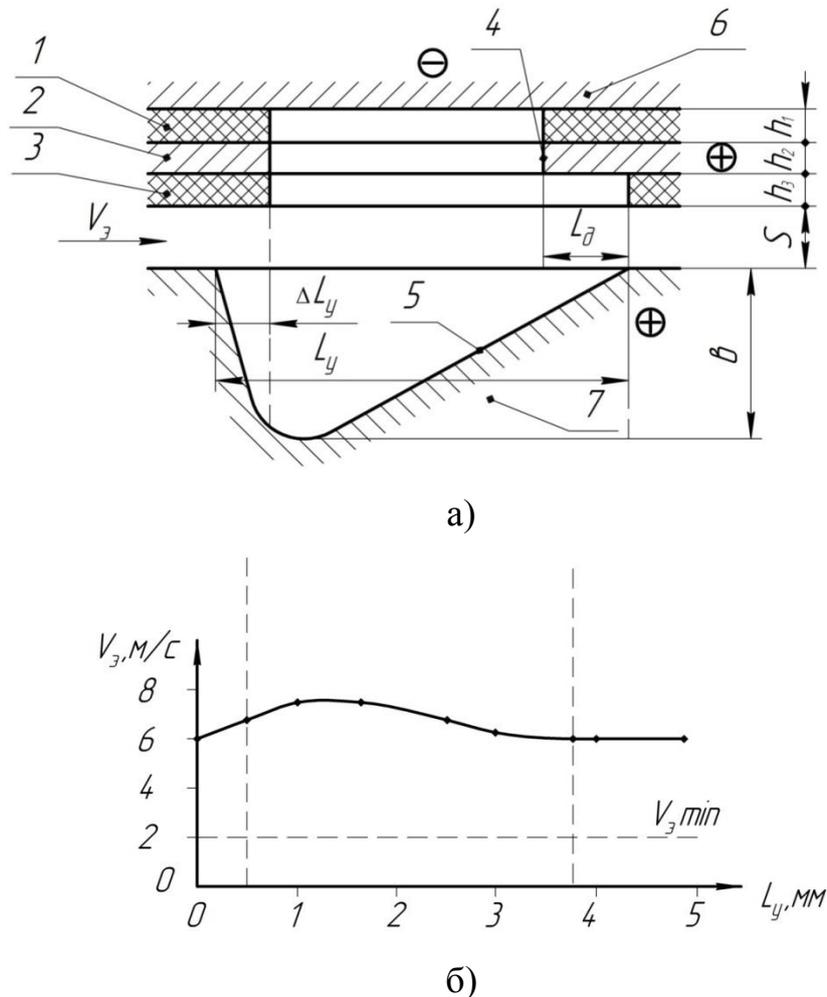


Рис. 1. Моделирование течения рабочей среды над углублением:
а) формирование углубления; б) влияние углубления на скорость течения электролита;

1, 3 – диэлектрический слой на многослойном шаблоне; 2 – металлический слой;
4 – дополнительный анод; 5 – профиль углубления на детали 7; 6 - катод

Граничными условиями модели являются предельные значения газонаполнения φ рабочей среды.

Для частных случаев при средних расходных величинах газосодержания φ_{cp} ($0,05 < \varphi_{cp} < 0,45$) находится по эмпирической зависимости

$$\varphi = 1,79 \frac{\varphi_p}{1+248\varphi_p}. \quad (1)$$

С учетом начальных и граничных условий можно спроектировать логическую модель, характеризующую течение рабочей среды при изготовлении углубления. Материалами скоростной съемки доказано, что течение газожидкостной среды подчиняется законам формирования подъемной силы крыла летательного аппарата. При этом в случае достаточной скорости течения происходит отрыв потока от донной части канала и образование вакуума в углублении, вызывающего перетекание рабочей жидкости по высоте ребра канала, то есть преобразование линейной трассы потока в винтовую, что ускоряет массовыйнос продуктов комбинированной обработки (в том числе газовой фазы) и снижает требования к скорости V_3 течения газожидкостной среды (рис. 1).

Моделирование процесса позволяет установить расчетные параметры для назначения режимов. На рис. 1 показана минимальная скорость течения рабочей среды $V_{3,min}$ и изменение скорости протекания жидкости над углублением.

При плоском течении газожидкостной среды можно установить технологический параметр – перепад давления (ΔP) по длине прокачки компонента. Предложена и обоснована в диссертации для использования формула Дарси-Вейсбаха, которая применительно к рассматриваемому в работе случаю приобретает вид

$$\Delta P = \frac{1}{4} \xi \frac{\rho V_3^2 L_y}{h_1+h_2+h_3+S+b}, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления течению газожидкостной среды.

Для слабозагрязненного электролита на базе воды $\xi = \frac{K_1}{Re}$,

где K_1 – постоянная потока, которая равна $K_1 = 96$;

Re – число Рейнольдса, которое для рассматриваемого случая может быть принято, как для воды, без учета изменения вязкости ($Re=5 \cdot 10^5 - 10^6$);

ρ – плотность рабочей среды, которая может использоваться как средняя величина между величинами для воздуха и воды в зависимости от газонаполнения продуктами обработки среды. Это соотношение может изменяться в широких пределах, зависит от времени обработки и расстояния от точки входа газожидкостной среды в зону анодного растворения углубления и выбирается пропорционально длине углубления по справочному значению для воды при температуре протекания процесса анодного растворения;

V_3 – скорость течения рабочей среды над зоной обработки, которая может

изменяться в широких пределах. Это объясняет значительное превышение на рис. 1, принятое со значительным запасом для расчетов скорости над минимальной величиной, полученной экспериментально по результатам скоростной съемки потока в индивидуальном канале;

L_y - длина углубления по направлению течения потока;

$h_1 ; h_2 ; h_3 ; S ; b$ – приведены на рис. 1.

Формула (2) позволяет выполнить качественный анализ для выбора давления рабочей среды на входе в зону обработки, показавшей связь между скоростью течения среды и давлением на входе. Такое соотношение более точно может быть получено по закону Гагена-Пуазейля при течении среды внутри детали через зазор между коаксиальными цилиндрами с радиусом R :

$$\Delta P = \frac{8\mu V_{\text{ср}}}{R^2}, \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость среды.

Формула (3) справедлива для сферической части канала, но и здесь могут наблюдаться значительные отклонения режимных параметров от расчетных значений. Поэтому перепад давления на входе и выходе потока приходится уточнять по результатам экспериментов, проводимых на моделях или имитаторах, в том числе приведенных в работе, по известной скорости течения среды, установленной по ее объемному расходу W_c (литров в секунду, рис. 2).

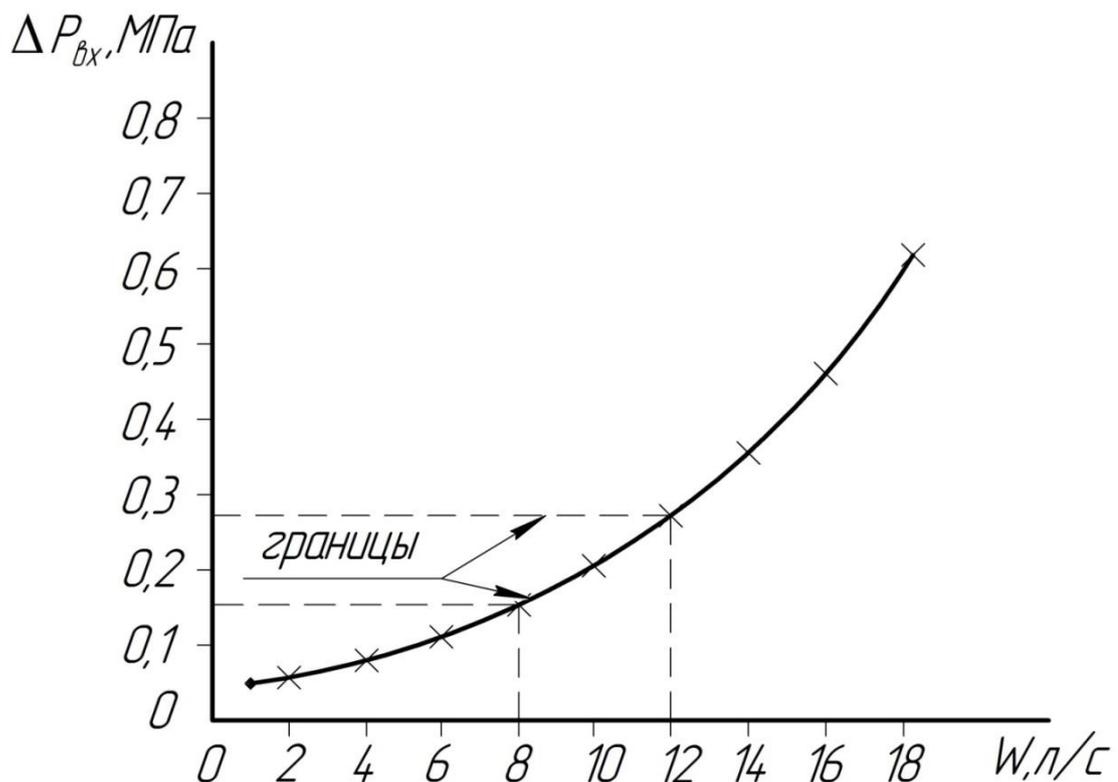


Рис. 2. К выбору давления на входе рабочей среды в зону обработки углубления

На рис. 2 приведен случай обработки углублений в каналах с шириной (H_1) 2 мм (рис. 3), с ребром, определяющим высоту канала, равную 3,5 мм, при числе каналов $n_c=429$.

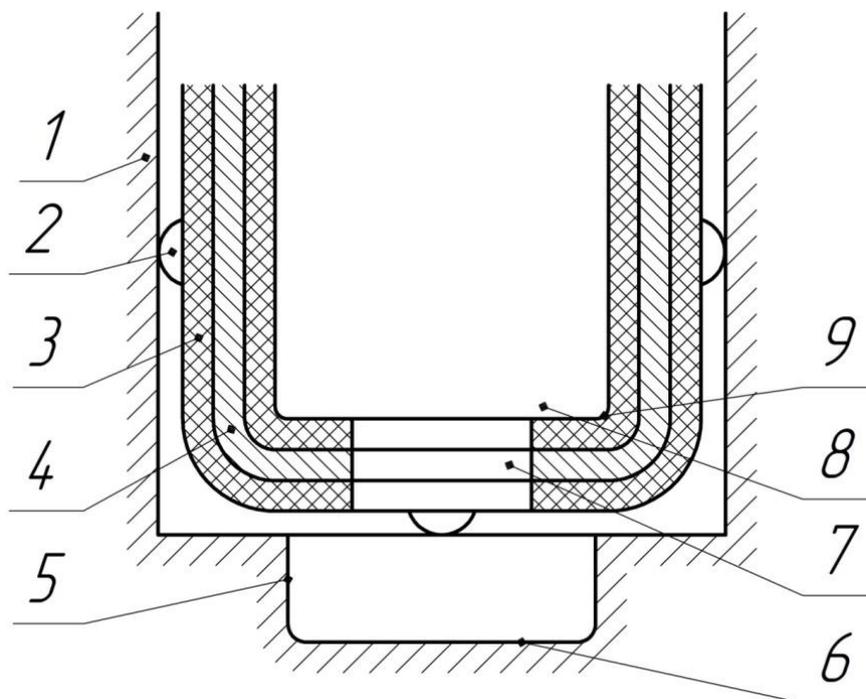


Рис. 3. Поперечное сечение углубления:

1 – боковая поверхность (ребро) канала; 2 – выступы на поверхности шаблона; 3, 4 – металлический слой шаблона с дополнительными анодами; 5 – боковая поверхность углубления; 6 – донная часть углубления; 7 – окно в многослойном шаблоне; 8 – катод; 9 – скругление катода

По рис. 1 среднюю скорость можно принять $V_{cp} = 6$ м/с. Для этих параметров расход $W_c = 10,3$ л/с, а по рис. 2 перепад давления ΔP составит 0,15 – 0,25 МПа. Тогда давление $P_{вх}$ рабочей среды на входе в межэлектродный зазор можно принять $P_{вх}=0,25 - 0,35$ МПа.

Разработанный механизм управляемого формирования электромагнитного поля в углублениях заданного профиля послужил основой разработки методики проектирования технологии их получения на донной и боковых ребрах каналов охлаждения по многослойным шаблонам с дополнительными анодами. Это значительно расширяет технологические возможности разработанного процесса, и способствует увеличению ресурса создаваемой техники до уровня, требуемого при многократных пусках изделий.

В работе впервые разработан механизм воздействия электромагнитного поля через дополнительные аноды на управление анодным растворением локальных участков детали с получением заданной формы углублений в местах, практически не доступных для металлообрабатывающего инструмента.

На базе модели и механизма формирования углублений на донной и боковых поверхностях каналов разработаны методики расчета параметров

дополнительного анода, позволившие оптимизировать его размеры и обеспечить возможность реализации нового способа, защищенного патентом.

В четвертой главе приведены особенности построения методики отработки производственной технологичности при назначении варианта технологического процесса изготовления местных охладителей по многослойным шаблонам с дополнительным анодом, что дало возможность предложить новые способы и устройства, обеспечивающие получение прогрессивных технологических показателей для получения требуемого ресурса изделий. Это позволило снизить трудоемкость изготовления деталей горячей зоны двигателей, повысить ресурс без ухудшения экономических показателей и конкурентоспособности создаваемых двигателей многоразового использования.

Обоснован по результатам экспериментов (рис. 4) выбор напряжения на электродах при использовании многослойных шаблонов

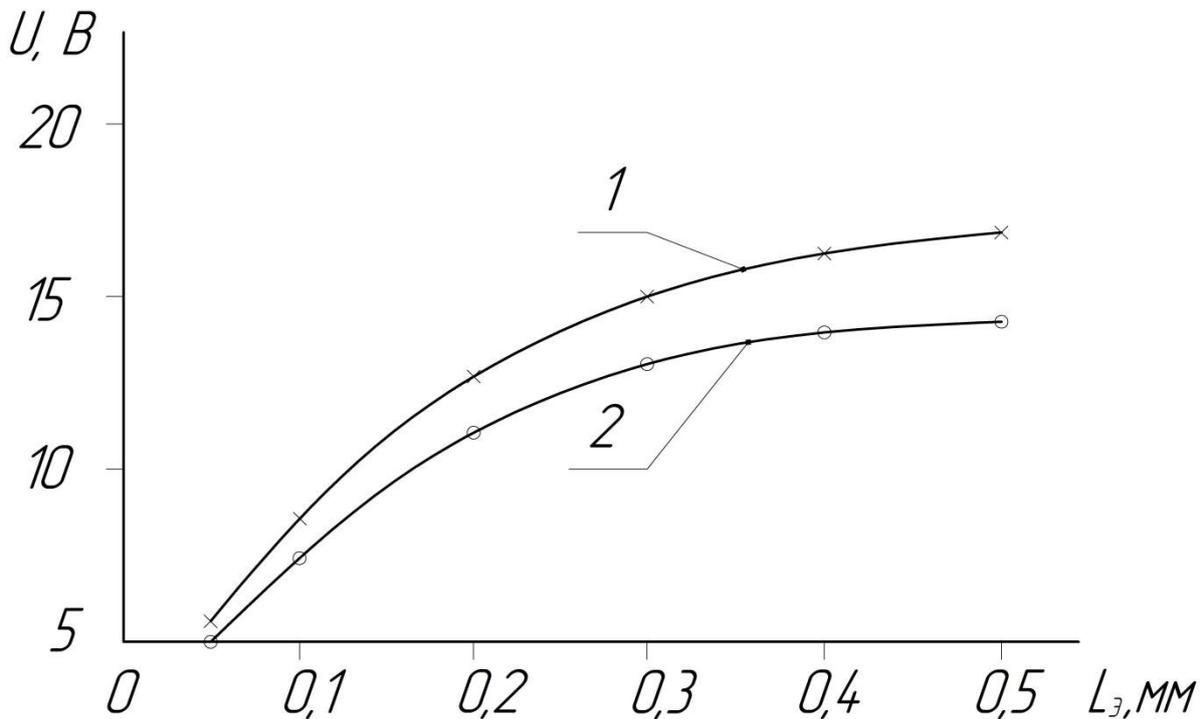


Рис. 4. Изменение предельного напряжения при комбинированной обработке для типовых случаев обработки неподвижными электродами.

Количество слоев шаблона – 3. Скорость прокачки электролита – 8м/с.

Материал детали: 1 – нержавеющая сталь; 2 – бронза

В материалах главы впервые научно обоснованы геометрическая форма, размеры и разработаны методики расчета дополнительных анодов, что позволило решить проблему придания дополнительным охладителям оптимальной формы, позволяющей получать углубления переменного профиля на донной и боковых поверхностях охлаждающих каналов. Для расчета размеров окон в многослойных шаблонах с дополнительными анодами требуется обосновать влияние электрического поля на изменение размеров углубления относительно такого параметра в шаблоне (поднутрение профиля), который зависит от материала

детали и глубины элемента охлаждения (рис. 5).

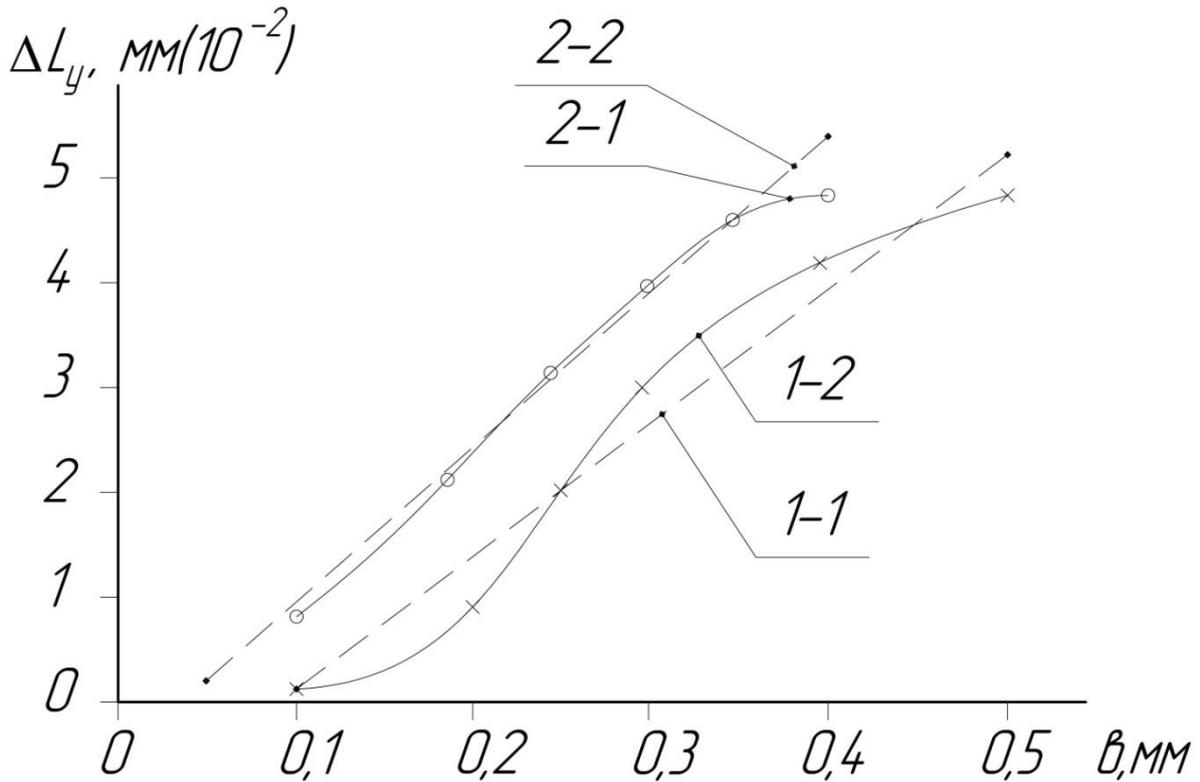


Рис. 5. Изменение поднутрения ΔL_y в зависимости от глубины “ b ” дополнительного охладителя.

Материал детали: 1 – 1X18H10T; 2 - бронза. Напряжение на электродах – 15В, напряжение на дополнительном аноде 6 В. 1-2, 2-1 – экспериментальная зависимость; 1-1, 2-2 – расчетная зависимость

Представленная в главе методика проектирования технологии изготовления углублений обеспечивает их получение на труднодоступных для инструмента донной и боковых ребрах каналов охлаждения современных и создаваемых тепловых двигателей, что отвечает достижению цели, поставленной в работе.

Разработаны и приведены в диссертации методики расчета параметров дополнительного анода, позволившие оптимизировать его размеры и обеспечить возможность реализации нового способа, защищенного патентом.

Для расчета требуемой ширины токоподвода к дополнительному аноду доказана правомерность рекомендаций о допустимой плотности тока J_m , приведенных в работе. При схеме охлаждения с дополнительными охладителями в каждом канале размещается n_y углублений. Обычно $n_y=3$, а количество поясов углублений по длине охлаждающих каналов одно. Тогда предельный ток I_m , который пропускает токопровод к каждому дополнительному аноду, составит

$$I_T = J_T \frac{h_2(2B+H_1+H_2)}{n_y}, \quad (4)$$

где обозначения приведены на рис. 1.

Критерием устойчивости и долговечной работы многослойного шаблона является возможность передачи тока по слою h_2 , без превышения допустимой величины J_m :

$$I_m \geq I_g.$$

Отсюда можно установить предельно допустимую толщину слоя h_2 , служащую ограничением для дополнительного анода:

$$h_2 = \frac{J_g H_1 L_g n_y}{J_m (2B + H_1 + H_2)}. \quad (5)$$

Расчеты, выполненные для принятых $J_g = 5 \cdot 10^{-2}$ А/мм²; $J_m = 6$ А/мм² (медный слой h_2); $H_1 = 1,2$ мм, $L_g = 0,8$ мм; $n_y = 3$; $B = 3,5$ мм; $H_2 = 1,5$ мм, дают величину $h_2 = 0,25$ мм, что позволяет иметь пятикратный запас прочности от перегрева дополнительного анода с толщиной, требуемой для подвода к нему технологического тока от собственного источника энергии, приведенного в работе.

Предложена новая (на уровне изобретения) конструкция и технология изготовления многослойных шаблонов с дополнительным анодом. Анализ размещения в пазе и условий работы с многослойными шаблонами показывает, что из-за ограниченной доступности канала в охлаждающей системе (узкий, глубокий паз) при большом количестве углублений с переменным профилем применение шаблонов с их традиционной формой, элементами и токоподводами было не осуществимым.

Выполнение процесса получения углублений переменной глубины с одновременным формированием профиля потребовало создания новых способов и устройств, часть которых предложена в патентах соискателя, где многослойный шаблон (рис. 6) имеет автономное размещение, выполненное на заготовке, и содержит три слоя, где средний является металлическим и включен в собственную схему подачи тока. Часть этого слоя формирует дополнительный металлический анод. Его функциональное назначение заключается в создании комбинаций электромагнитных полей, взаимодействие которых позволяет получить углубления с требуемым плавным выходом потока в процессе эксплуатации изделия.

Металлический слой шаблона (рис. 6) изготавливают, как правило, из медной фольги с толщиной не менее требуемой для подвода тока, что рассчитывается по методике, приведенной в работе, с учетом плотности подводимого тока, не вызывающего анодного разрушения дополнительного анода. Снаружи шаблон имеет диэлектрические слои, как правило, нанесенные на металлический слой исходного листа. Окна в шаблоне можно выполнять просечкой по размерам, полученным расчетным путем с учетом поднутрения профиля (рис. 6).

В работе приведен алгоритм проектирования технологического процесса изготовления многослойных шаблонов с дополнительными анодами, выполненными по методикам, предложенным соискателем.

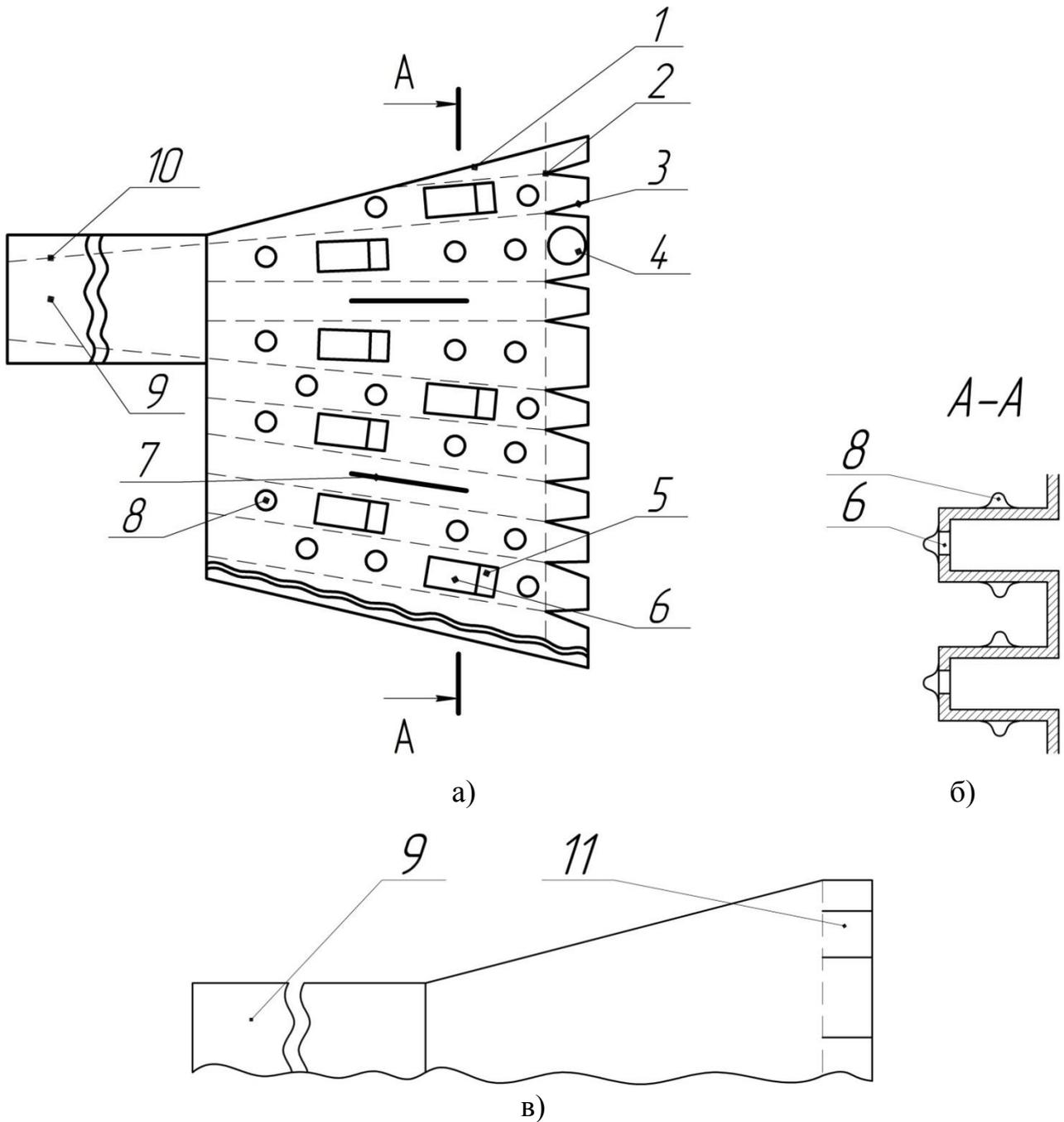


Рис. 6. Конструкция трехслойного шаблона с дополнительными анодами:
 а) развертка шаблона с дополнительным анодом; б) контур шаблона после установки на деталь (или макет детали); в) внешний вид шаблона при установке на коническую часть детали;

1 - наружный диэлектрический слой; 2 - линии перегиба шаблона при установке на детали; 3 - вырезка в месте стыковки шаблонов; 4 - отверстие для подвода рабочей среды на обратную поверхность шаблона; 5 - дополнительный анод; 6 - сквозное окно в шаблоне; 7 - продольные просечки на сферическом участке детали; 8 - точечный диэлектрический выступ со стороны канала в детали; 9 - токоподвод к дополнительному аноду через металлический слой шаблона; 10 - места перегиба токоподвода; 11 - участки токоподвода на соседние шаблоны с удалением в местах контакта диэлектрического слоя

Раскрыты пути интенсификации теплопередачи и охлаждения деталей рабочего тракта за счет расширения возможностей комбинированной обработки местных теплообменников в каналах. Так показано, что для создаваемых изделий достичь требуемого уровня тепловыноса удастся, если величину углубления с геометрией, полученной при использовании дополнительных анодов, повысить относительно достигнутых 0,5 мм. Однако на современном этапе использования многослойных шаблонов такой результат удалось получить только при ограниченном количестве углублений, где достигается стабильность протекания процесса. Соискатель продолжает исследования в таком направлении и надеется в ближайшее время решить проблему применительно к изделиям многоразового использования.

Для изготовления углублений в каналах с большим изменением кривизны профиля, типа приведенных в работе для создаваемых изделий, планируется использовать новые многослойные шаблоны с эластичным диэлектрическим наружным слоем, выполненным в форме плетеной сетки с направлением волокон, позволяющим в широких пределах изменять локальную длину шаблона при увеличении периметра сечения детали.

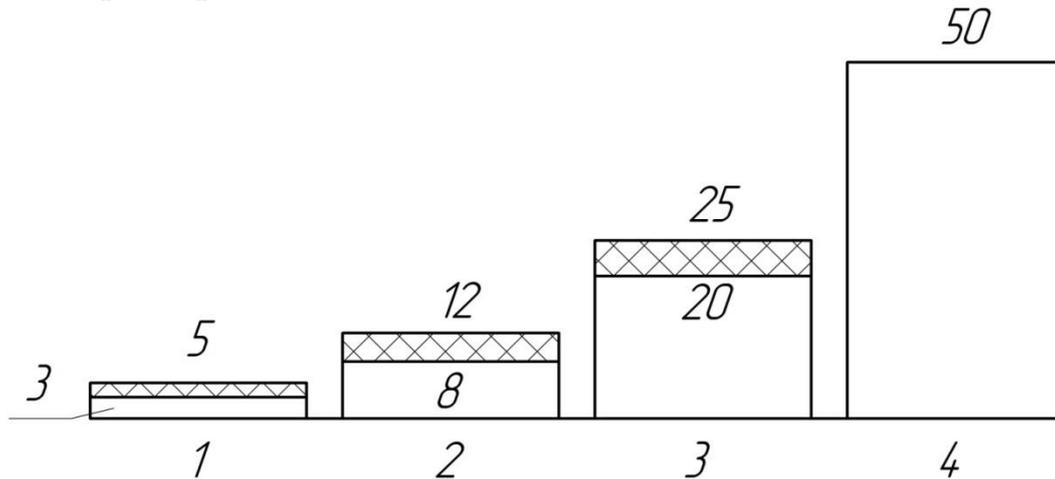


Рис. 7. Динамика увеличения ресурса горячей зоны ракетного двигателя по количеству безаварийных пусков:

- 1 - период создания и освоения жидкостных ракетных двигателей (ЖРД);
- 2 - период начала эффективного использования ЖРД для освоения космического пространства; 3 - состояние на текущий период; 4 - количество пусков при использовании ЖРД в системах многоразового применения

Рассматриваемые в работе эти и другие мероприятия, выполненные для повышения ресурса ракетных двигателей, позволили значительно повысить допустимое количество пусков изделий.

В перспективе (рис. 7) планируется получить за счет комплекса рассматриваемых в работе и других конструкторских и технологических мероприятий повышение ресурса, обеспечивающего количество пусков до 50, что требуется для многократного использования перспективных ракетных систем.

Заключение

Решена научная задача по интенсификации процесса охлаждения горячей зоны тепловых двигателей путем создания новых способов и средств технологического оснащения для многоместной комбинированной обработки локальных охладителей в виде углублений заданной формы, получаемых по многослойным шаблонам, один из слоев которого содержит дополнительный анод, управляющий параметрами электромагнитного поля при анодном растворении припуска с труднодоступных для инструмента участков на боковой поверхности и ребрах узких охлаждающих каналов. В результате выполнения работы созданы условия для повышения ресурса изделий, обеспечивающих повышение количества безотказных пусков с 3-4 на первых поколениях двигателей до 20-25 в текущий период и до 45-50 в создаваемых летательных аппаратах новых поколений ракетной техники значительно снизить трудозатраты на создание охлаждающих систем, за счет чего уменьшить себестоимость изделий и повысить их конкурентоспособность. Анализ результатов работы позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработана и представлена в диссертации методология отработки производственной технологичности элементов охлаждения горячей зоны ракетных двигателей газожидкостной средой, в результате чего обоснован рациональный профиль локальных охладителей в виде углублений на боковой и донной поверхности каналов со ступенчатым входом и плавным выходом охлаждающей среды, что обеспечивает защиту от перекрытия потока в канале газовой фазой и интенсификацию теплоотвода от горячей стенки камеры сгорания и реактивного сопла.

2. Разработаны новые способы и многослойные шаблоны с дополнительным анодом для одновременного скоростного многоместного изготовления углублений в охлаждающих каналах на труднодоступных для инструмента участках каналов, что позволило получить требуемую геометрию углублений в элементах охлаждения и снизить время изготовления изделий.

3. В работе доказано, что размеры углублений в охлаждающих каналах зависят от наибольшей глубины местного элемента и при минимальной глубине 0,3-0,35 мм оптимальный шаг между соседними углублениями составляет от 18 до 20 глубин, то есть 6-7 мм, а длина этого элемента по потоку равна 10-12 глубин, то есть 4-5 мм. Это позволяет обоснованно проектировать проточные тракты в каналах для двигателей с повышенным ресурсом.

4. Разработана и обоснована приведенная в работе технология автоматизированного расчета параметров многослойного шаблона и дополнительного анода с учетом поднутрения на границах окна в шаблоне, что дало возможность предложить упрощенную методику определения размеров окна и дополнительного шаблона, длина которого по потоку для меди не превышает 0,8-1,0 мм.

5. На базе представленных рабочих гипотез разработаны математические модели, раскрывающие характер течения газожидкостных сред через узкое пространство между дополнительным анодом и углублением, что позволило обосновать выбор скорости потока в диапазоне 4-6 м/с, требующий в

рассматриваемом случае комбинированной обработки применения давления на входе в зазор 0,35-0,5 МПа.

6. Разработаны и описаны в работе методики автоматизированного расчета режимов получения углублений с заданной геометрией, для чего предложено создать автономный электромагнитный контур с дополнительным анодом и снизить на нем постоянное напряжение 5-6 В.

7. Обоснованы конструкции и предложены в диссертации методы расчета магистралей для подвода тока к электродам и дополнительному аноду, доказывающие возможность получения запаса сечения этих элементов до 4 раз, что расширяет область их использования на весь диапазон применяемых и создаваемых охлаждающих систем с фрезерованными каналами.

8. Приведенные в работе результаты стендовых и огневых испытаний деталей горячей зоны показывают, что дополнительные локальные охладители на донной части и ребрах каналов обеспечивают значительное удешевление изделия за счет замены части дорогостоящих тепловых завес на более технологичные углубления, что учитывается в разрабатываемых двигателях многократного использования.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и в международных базах Scopus, Web of Science:

1. Щеднов, А. В. Интенсификация массовыноса при комбинированных методах обработки материалов / А. В. Щеднов, О. В. Скрыгин, В. П. Смоленцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15. – № 9. – С. 369–374.

2. Щеднов, А. В. Способы и технологические приемы для создания системы охлаждения горячей зоны тепловых двигателей / А. В. Щеднов, Е. В. Паничев, В. П. Смоленцев // Справочник. Инженерный журнал. – 2020. – №10. – С. 10–14.

3. Щеднов, А. В. Технология комбинированной обработки каналов по многослойным шаблонам / А. В. Щеднов, В. П. Смоленцев, Н. С. Поташникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021.– Т. 17. – № 1. – С. 89–96.

4. Shchednov A. V., Technology of combined treatment of engine cooling elements / A. V Shchednov, V. P. Smolensev, J. S. Smolenseva // Proceedings of the 5th international conference on industrial engineering (ICIE 2019). – 2020. – P. 1241–1427.

5. Shchednov A. V. The mass transfer intensification of combined treatment products / Shchednov A. V., Skrygin O. V., Smolensev V. P., // MATEC Web of Conferences. – 297. – 01002. – 2019.

Патенты:

6. Патент № 2699471 Российская Федерация, МПК В23Н 3/00 (2006.01), В23Н 9/00 (2006.01). Способ изготовления и шаблон для электрохимического получения углублений в пазах охлаждающего канала детали : № 2018123057 :

заявл. 25.06.2018 : опубликовано 05.09.2019 / Смоленцев В. П., Щеднов А.В., Скрыгин О.В.; заявитель АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

7. Патент № 2716387 Российская Федерация, МПК В23Н3/08 (2006.01), В23Н3/10 (2006.01). Способ электрохимического удаления припуска с поверхности детали и устройство для его реализации. : № 2019104800 : заявл. 20.02.2019 : опубликовано 11.03.2020 / Смоленцев В. П., Скрыгин О. В., Щеднов А. В., Смоленцева Я. С.; заявитель АО КБХА . – 10 с. : ил. : – Текст : непосредственный.

Подписано в печать 2 июля 2021 года.
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № 94

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14